

Primljen / Received: 13.3.2019.
Ispravljen / Corrected: 19.10.2019.
Prihvaćen / Accepted: 6.3.2020.
Dostupno online / Available online: 10.4.2020.

Numerička istraživanja interakcije geomreža/mrežastih armatura i nekoherentnog zasipa u pokusu izvlačenja

Autori:



Doc.dr.sc. **Adis Skejić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Sarajevu
Građevinski fakultet
askeja@live.com
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Senad Medić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Sarajevu
Građevinski fakultet
senad.medic@gf.unsa.ba



Prof.dr.sc. **Tomislav Ivšić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
tom@grad.hr

Pregledni rad

Adis Skejić, Senad Medić, Tomislav Ivšić

Numerička istraživanja interakcije geomreža/mrežastih armatura i nekoherentnog zasipa u pokusu izvlačenja

Interakcija geomreža/mrežastih armatura i zasipa u zidovima od armiranog tla, kao i njeno kvantificiranje predstavljaju složen problem koji ovisi o brojnim faktorima. U ovom radu su prikazana i komentirana dosadašnja saznanja o numeričkim modelima pokusa izvlačenja kojim se ispituje interakcija armatura i nekoherentnog zasipa. Također su prikazani i rezultati posebno osmišljene skupine numeričkih simulacija, te su uspoređeni s preporukama američkih i europskih normi za provođenje ovakvih pokusa.

Ključne riječi:

geomreže, pokus izvlačenja geomreže, interakcija, numeričko modeliranje

Subject review

Adis Skejić, Senad Medić, Tomislav Ivšić

Numerical investigations of interaction between geogrid/wire fabric reinforcement and cohesionless fill in pull-out test

The interaction between geogrid/wire fabric reinforcement and fill material in reinforced earth walls, as well as its quantification, is a complex problem that depends on a number of factors. This paper presents and discusses state of the art related to numerical simulations of pull-out tests used for investigation of interaction between cohesionless fill and reinforcement. In addition, the results of a specially designed group of numerical simulations are presented and compared with recommendations of American and European standards related to such experiments.

Key words:

geogrids, geogrid pull-out test, interaction, numerical modelling

Übersichtsarbeit

Adis Skejić, Senad Medić, Tomislav Ivšić

Numerische Untersuchungen zur Wechselwirkung von Geonetzen/Maschenverstärkungen und inkohärenter Verfüllung in einem Expansionsexperiment

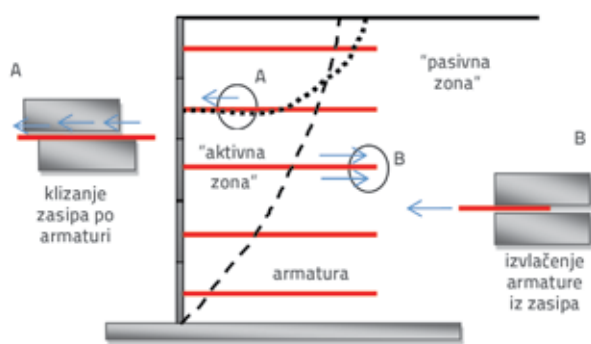
Die Wechselwirkung von Geonetzen/Maschenverstärkungen und Verfüllungen in verstärkten Erdwänden sowie deren Quantifizierung stellen ein komplexes Problem dar, die von mehreren Faktoren abhängen. In dieser Abhandlung werden die bisherigen Erkenntnisse über die numerischen Modelle der Expansionsexperimente dargestellt und kommentiert, mit denen die Wechselwirkung von Bewehrungen und inkohärenten Verfüllungen untersucht werden. Darüber hinaus werden auch die Ergebnisse einer speziell entwickelten Gruppe numerischer Simulationen dargestellt und mit den Empfehlungen amerikanischer und europäischer Standards für die Durchführung solcher Experimente verglichen.

Schlüsselwörter:

Geonetze, Expansionsexperiment des Geonetzes, Wechselwirkung, numerische Modellierung

1. Uvod

Analitičke metode zasnovane na principima mehanike krutih tijela i granične ravnoteže, te dopunjene empirijskim koeficijentima uspješno se primjenjuju u procjeni stabilnosti zidova od armiranog tla još od 70-ih godina prošlog stoljeća [1]. Mehanizam prijenosa opterećenja, prema pretpostavkama tih teorija, shematski je prikazan na slici 1., horizontalno položena geomreža trenjem pridržava aktivni klin zasipa na jednoj strani ("aktivna" zona - djelovanje), a na drugoj strani je usidrena u stabilnu armiranu zonu ("pasivna" zona - otpor). Linija koja razdvaja dvije navedene zone spaja točke na geomreži koje odgovaraju maksimalnoj vlačnoj sili u geomreži, te predstavlja potencijalnu plohu sloma.



Slika 1. Prikaz prijenosa opterećenja u "aktivnoj" i "pasivnoj" zoni zida od armiranog tla

Na razini zida, interakcija se definira klizanjem zasipa po geomreži, izvlačenjem geomreže i posmikom u kojem je geomreža nagnuta u odnosu na plohu smicanja [2].

Kritični mehanizmi sloma za provjeru unutarnje stabilnosti zida od armiranog tla su: prekid-vlačni slom geomreže i izvlačenje (čupanje) geomreže iz pasivne, sidrišne zone [3,4]. Za određivanje otpora izvlačenju (pullout resistance), ili "čvrstoće sidrenja" (anchorage strength), kako ju još neki autori nazivaju [5] koriste se posebni pokusi izvlačenja, a interpretacija se provodi na osnovi ekvivalentne čvrstoće kontakta zasipa i geomreže. Ekvivalentna čvrstoća kontakta predstavlja omjer prosječnog posmičnog i normalnog naprezanja na sučelju geomreže i zasipa. Navedena čvrstoća se, između ostalog, može utvrditi pokusom izvlačenja geomreža iz specijalno oblikovane kutije, a ovisi o velikom broju faktora zbog složene interakcije geomreže i zasipa. Kompleksnom ponašanju dodatno doprinosi interakcija zasipa sa stijenkama kutije iz koje se izvlači geomreža.

Brojni autori su do danas primjenjivali različite uređaje za ispitivanje ponašanja geomreže/mrežaste armature pri izvlačenju [2, 6-46]. Razlike u pojedinim istraživanjima ponajprije se odnose na opremu za testiranje, postupak provođenja pokusa te na vrstu i svojstva zasipa i geomreže [46]. Zbog toga na osnovi rezultata različitih istraživanja nije moguće uspostaviti jedinstvenu vezu između granične sile izvlačenja i svojstava geomreže i zasipa.

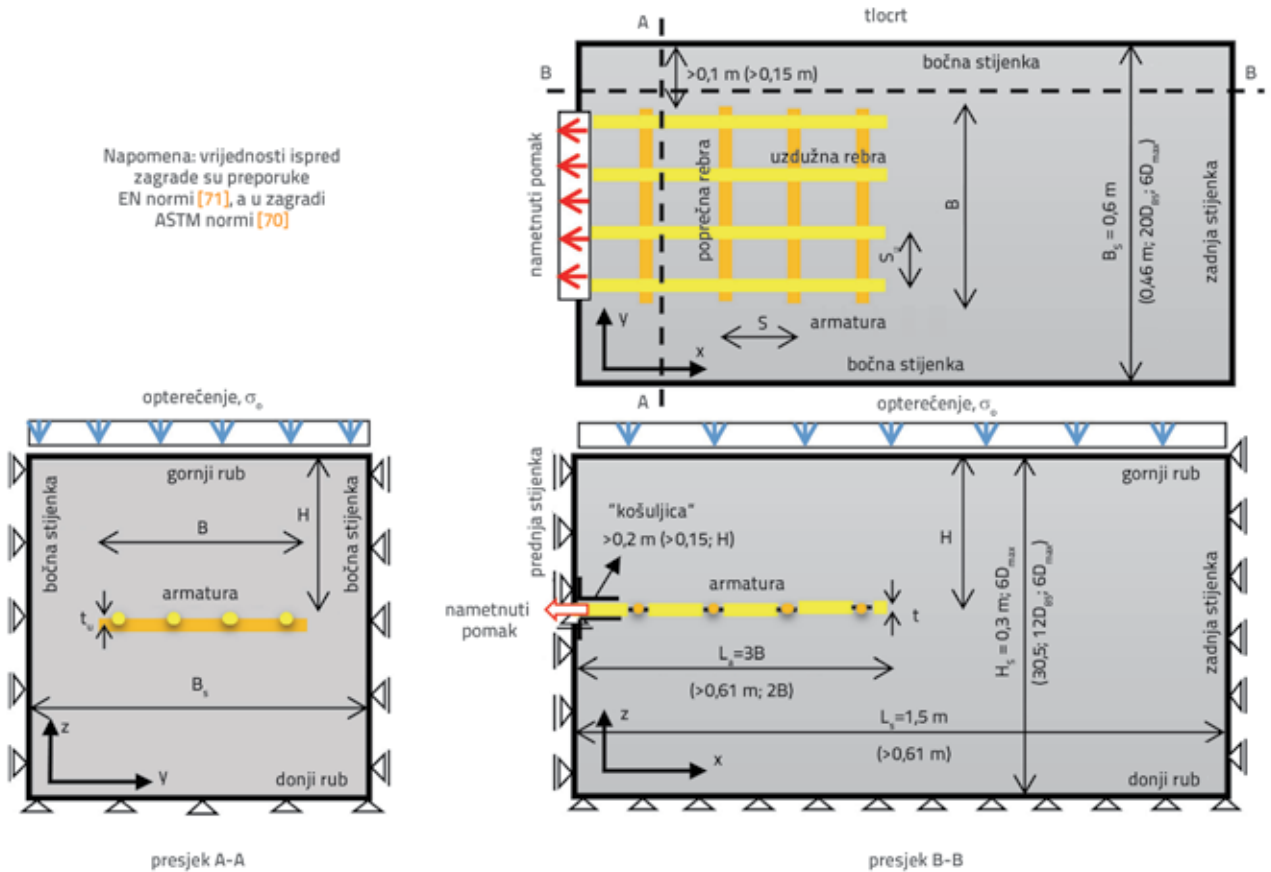
Zbog širokog raspona faktora koji utječu na otpor pri izvlačenju geomreže, za numeričko modeliranje zidova od armiranog tla također su uočene nekonzistentnosti pri odabiru ekvivalentne čvrstoće kontakta zasipa i geomreže/mrežaste armature. Tako većina istraživača prihvaća da je ekvivalentna čvrstoća kontakta jednaka čvrstoći zasipa [47-60]. Ovakva pretpostavka se opravdava relativno visokim otporom na izvlačenje geomreža i mrežastih armatura uslijed pasivnog otpora poprečnih rebara. U tom kontekstu su Ling i dr. [61] naveli da provođenje skupih pokusa, s ciljem da se precizno karakterizira čvrstoća sučelja u uvjetima izvlačenja, uopće nije opravdano. S druge strane, neki autori predlažu da se za modeliranje kontakta zasipa i geomreže u zidovima primijeni čvrstoća kontakta utvrđena upravo neovisnim pokusom izvlačenja [31, 62-65]. U navedenim primjerima čvrstoća je kontakta manja od čvrstoće zasipa, ali u literaturi postoje i primjeri rezultata pokusa izvlačenja koji su rezultirali (interpretiranom) čvrstoćom kontakta većom od čvrstoće zasipa [25, 30, 31, 66, 67]. Navedeni primjeri potvrđuju složenost mehanizma interakcije geomreža/mrežastih armatura i zasipa u pokusu izvlačenja.

2. Pokus izvlačenja i ekvivalentni koeficijent trenja

2.1. Pokus izvlačenja

Specijalno oblikovani uređaj za izvlačenje se sastoji od kutije različitih dimenzija (duljina/širina/visina od 0,25/0,15/0,15 m [68] do 3,4/3,4/1,2 m [69]) u koju se ugrađuje horizontalno položeni geosintetik ili drugi materijal za armiranje, obično u sredini visine, a zatim se izvlači s prednje strane kutije. Minažek i Mulabdić [35] navode da je u literaturi objavljeno više od 30 različitih uređaja za izvlačenje u pogledu dimenzija i drugih značajki uređaja za izvlačenje. Konkretno, postoje mali, srednji i veliki uređaji. Isti autori navode da je najviše velikih uređaja kod kojih volumen kutije iznosi od 1 do 2 m³. Prosječne dimenzije tih uređaja su 1,5/0,8/0,7 metara (duljina/širina/visina). Tipična konfiguracija pokusa izvlačenja prikazana je na slici 2.

U svijetu su razvijene i norme koje daju upute o pojedinostima provedbe pokusa izvlačenja. Na slici 2. su naznačene preporuke američkih (ASTM D6706) normi [70], te europskih normi (EN 13738) [71] s aspekta geometrijske konfiguracije pokusa. Preporuke EN normi su na slici 2. navedene kao kote (dužinske mjere) prikazane ispred zgrade, a ASTM normi kote u zagradi. Na izlaznom dijelu geomreže iz kutije, uobičajeno se ugrađuje "košuljica" koja treba umanjiti utjecaj prednje stijenke na otpor pri izvlačenju. Ponekad se umjesto "košuljice" prvo poprečno rebro geomreže postavlja dovoljno daleko od prednjeg ruba [66]. Postoje i primjeri ugradnje stiropora na kompletnu površinu prednje stijenke, a sve s ciljem umanjenja utjecaja njene krutosti na mobiliziranje otpora pri izvlačenju [28]. Površina zasipa u kutiji se može dodatno opterećivati radi simulacije prirodnih pritisaka (opterećenje, σ_0). Tijekom pokusa, na mjestu izvlačenja, mjere se sila i pomak. Na osnovi izmjerene granične sile utvrđuje se ekvivalentna čvrstoća kontakta geomreže i zasipa.



Slika 2. Konfiguracija uređaja za provođenje pokusa izvlačenja: tlocrt i karakteristični poprečni presjeci s osnovnim elementima i oznakama

Laboratorijski pokusi izvlačenja geomreže i mrežaste armature iz kutije ispunjene zasipom prvi put su izvedeni krajem 70-ih godina prošlog stoljeća [72-74]. Ipak, značajniji iskorak u istraživanju interakcije u uvjetima izvlačenja napravili su Dyer [75] i Palmeira [66]. Oni su sustavno osmislili program istraživanja i prezentirali rezultate pokusa izvlačenja koji su upućivali na osnovne mehanizme prijenosa opterećenja s mrežaste armature na zasip. Već tada je bilo poznato da se za geomreže i mrežaste armature otpor pri izvlačenju sastoji od dvije osnovne komponente, a to su:

- otpor trenjem po uzdužnim i poprečnim rebrima
- pasivni otpor zasipa ispred poprečnih rebara.

Tim komponentama treba dodati i doprinos trenja čestica tla uklještenim u otvore mreže [35, 76]. Mobilizacija komponenti otpora ne ostvaruje se istovremeno, nego ovisi o veličini relativnog pomaka [76, 77]. Pri malom relativnom pomaku između zasipa i geomreže mobilizira se ukupno trenje na sučelju, a daljnjim prirastom relativnog pomaka progresivno se mobilizira pasivni otpor tla ispred poprečnih rebara geomreže.

2.2. Interpretacija rezultata pokusa izvlačenja

Sila izvlačenja, koja je mobilizirana pri graničnom proklizavanju geomreže i zasipa, bitna je za ocjenu ekvivalentne čvrstoće

kontakta geomreže i zasipa. Posmična čvrstoća na sučelju nekoherentnih materijala i geomreže može se definirati na više načina, a ovdje će biti izdvojena dva:

- preko ekvivalentnog koeficijenta trenja (f^*), koji su predložili Jewell i dr. [78]. Ovaj koeficijent predstavlja omjer mobiliziranog posmičnog naprezanja (τ_{ult}) u trenutku potpunog proklizavanja geomreže i odgovarajućeg normalnog naprezanja na sučelju mreže i zasipa (σ_n), prema izrazu (1):

$$f^* = \frac{\tau_{ult}}{\sigma_n} = \frac{F_p}{2A\sigma_n} = \frac{F_p}{2L_a B \sigma_n} \quad (1)$$

- gdje je F_p granična sila izvlačenja utvrđena pokusom, L_a je duljina geomreže, a B širina geomreže u skladu s oznakama na slici 2.
- relativno u odnosu na čvrstoću zasipa (C_i). Ova veličina predstavlja omjer ekvivalentnog koeficijenta trenja sučelja ($f^* = \tan \delta$) i koeficijenta trenja zasipa ($\tan \varphi$), prema izrazu (2):

$$C_i = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \quad (2)$$

Ovaj omjer se u literaturi naziva koeficijentom interakcije.

3. Numeričko modeliranje pokusa izvlačenja

Definiranje naponsko-deformacijskog stanja unutar kutije uređaja tijekom izvlačenja bitno je za tri praktična aspekta:

- da se simulacijom interakcije na razini pokusa izvlačenja rezultati mogu ekstrapolirati na zidove i druge slučajeve pokusa koji nisu istraženi fizičkim modelima zbog velikog broja kombinacija geomreža, zasipa i veličina uređaja za izvlačenje
- da se numerički utvrde mehanizmi interakcije geomreže i zasipa koji nisu izmjereni ili opažani fizičkim modelima zbog kompleksnosti takvog mjerenja
- da se uspostavljanjem numeričkog modela pokusa izvlačenja omogućiti utvrđivanje uvjeta poboljšanja provedbe pokusa. Konkretno, numeričkim simulacijama može se istražiti utjecaj uvjeta ispitivanja na rezultate pokusa izvlačenja.

Zbog važnosti i velikih mogućnosti koje pružaju napredne numeričke simulacije, ne iznenađuje činjenica da je do danas

objavljen velik broj ovakvih analiza. Brojna istraživanja u kojima su predloženi postupci modeliranja pokusa izvlačenja složenim numeričkim analizama, najčešće su se provodila metodom konačnih elemenata i metodom konačnih razlika kao 2D simulacije [21, 32, 37, 40, 64, 77, 79-85]. Osnovni detalji nekih od spomenutih istraživanja komentirani su u nastavku.

3.1. Pregled objavljenih istraživanja

Pregled osnovnih karakteristika numeričkih modela (metoda konačnih elemenata i metoda konačnih razlika), počevši od prvog istraživanja koje su proveli Yogarajah i Yeo [79] pa sve do danas, dan je u tablici 1.

Rubni uvjeti

Većina objavljenih analiza su 2D numeričke simulacije s istim rubnim uvjetima koji podrazumijevaju:

Tablica 1. Pregled osnovnih karakteristika objavljenih numeričkih simulacija pokusa izvlačenja metodom konačnih elemenata i konačnih razlika

Autor (godina), referenca	Program	Analiza	Zasip	Geomreža/mrežasta armatura	Sučelje zasipa i geomreže/mrežaste armature	Prednja stijenka
Yogarajah i Yeo (1994.), [79]	Sage Crisp	2D, MKE	ME (MC)	element štapa (LE truss element)	MC, elementi nulte debljine	aps. kruto
Shuwang i dr. (1998.), [86]	-	3D, MKE	ME (MC)	ploča s otvorima (NLE plate with openings)	Nelinearne opruge, link elementi sučelja	aps. kruto
Bergado i dr. (2003.), [64]	Sage Crisp	2D, MKE	2DE (MC)	element štapa (LE truss element)	MC, elementi sučelja nulte debljine	aps. kruto
Perkins i Edens (2003.), [22]	ABAQUS	3D, MKE	SE (BSP)	element membrane (EPC membrane element)	MC, elementi nulte debljine	aps. kruto
Sugimoto i Alagiyawanna (2003.), [77]	-	2D, MKE	2DE (DP)	element štapa (LE truss element)	MC, elementi nulte debljine	aps. kruto
Teerawattanasuk i dr. (2003.), [87]	FLAC	3D, MKR	SE (MC)	volumenski element (LE solid element)	MC, elementi nulte debljine	aps. kruto
Palmeira i Dias (2008.), [88]	Plaxis	2D, MKE	2DE (MC i HS)	element užeta (LE „geogrid“ element) za uzdužna i elem. grede (LE plate element) za poprečna rebra	MC, elementi sučelja nulte debljine	aps. kruto i glatko
Khedkar i Mandal (2009.), [28]	Plaxis	2D, MKE	2DE (MC)	element užeta (LE „geogrid“ element) za uzdužna i elem. grede (LE plate element) za poprečna rebra	MC, elementi sučelja nulte debljine	0,8 cm stiropor
Alam i dr. (2014.), [40]	FLAC	2D, MKR	2DE (MC)	2D element (LE 2D element)	MC, elementi sučelja nulte debljine	aps. kruto
Rouse i dr. (2014.), [89]	FLAC	2D, MKR	2DE (MC)	element grede (EP beam element)	MC, elementi sučelja nulte debljine	aps. kruto
Abdi i Zandieh (2014.) [37]	Plaxis	2D, MKE	2DE (MC)	element užeta (LE „geogrid“ element) za uzdužna i elem. grede (LE) za poprečna rebra	MC, elementi sučelja nulte debljine	1,0 cm stiropor
Mosallanezhad i dr. (2016.), [90]	ABAQUS	3D, MKE	SE (MC)	volumenski element (solid element)	MC, elementi sučelja nulte debljine	aps. kruto

Napomena: LE – linearno elastično; NLE – nelinearno elastično; EP – elasto-plastično; MKE – metoda konačnih elemenata; MKR – metoda konačnih razlika; MC – Mohr Coulomb-ov model, EPC – elasto-plastično s vremenski ovisnim deformacijama (creep); HS – deformacijsko očvršćavajući model; BSP – Bounding Surface Plasticity model [91]; DP – Drucker Pragerov model; 2DE – 2D element; SE – volumenski (solid) element

- idealno glatku, horizontalno nepomičnu prednju stijenku
- horizontalno i vertikalno nepomičnu donju stijenku
- horizontalno nepomičnu, idealno glatku zadnju stijenku,
- slobodno opterećenu gornju površinu
- nametnutu silu ili nametnuti pomak na prednjem kraju geomreže.

Budući da je većina istraživanja zasnovana na 2D modelima, bočne stijenke kutije uređaja za izvlačenje su idealno glatke, a širina modela iznosi 1.0 metar (ravninsko stanje deformacija).

Modeliranje materijala zasipa

Materijal zasipa iz kojeg se izvlače geomreže u većini objavljenih numeričkih studija je pjeskovito tlo. U većini objavljenih naponsko-deformacijskih simulacija korišten je elastični, idealno plastični model (Mohr-Coulombov model) ponašanja materijala. Poznato je da zbijeni nekoherentni materijali pri većim posmičnim deformacijama pokazuju "omekšanje" u naponsko-deformacijskoj vezi što se očituje smanjenjem kuta unutarnjeg trenja i kuta dilatacije (npr. [92]). Iako ovo ponašanje može imati znatan utjecaj na rezultate numeričkih simulacija, do danas prema saznanjima autora ne postoji objavljena studija u kojoj je pokus izvlačenja simuliran takvim ponašanjem zasipa. Također, rijetki su primjeri konstitutivnih modela zasipa koji obuhvaćaju ovisnost kuta unutarnjeg trenja o normalnom naprezanju. Jedno takvo istraživanje su proveli Rouse i Fannin [89] i pokazali da je bitno modelirati smanjenje kuta unutarnjeg trenja s povećanjem normalnog naprezanja kada se simuliraju pokusi pri vertikalnom naprezanju ispod 50.0 kPa.

Modeliranje geomreže/mrežaste armature

Najznačajnija razlika u objavljenim numeričkim simulacijama pokusa izvlačenja odnosi se na način modeliranja geomreže/mrežaste armature. Zbog toga će objavljene simulacije pokusa izvlačenja u ovom radu biti opisane na osnovi četiri načina modeliranja. Konkretno, pokazat će se detalji za sljedeća četiri modela u pokusu izvlačenja:

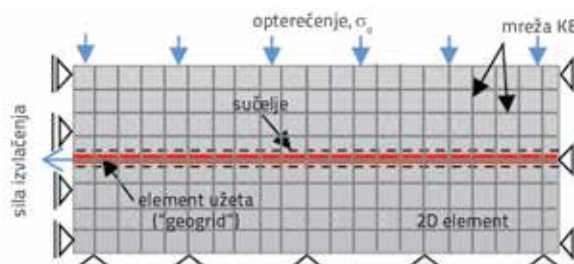
- mrežasta armatura/geomreža modelirana tankim zamjenskim elementom užeta – "geogrid" element (linijski vlačni element jedinične širine),
- mrežasta armatura/geomreža modelirana uzdužnim rebrima (element užeta – "geogrid" element) i poprečnim rebrima (element grede),
- mrežasta armatura/geomreža modelirana samo poprečnim rebrima (kruti 2D element),
- 3D model mrežaste armature/geomreže (volumenski elementi).

U svim spomenutim modelima dodatno je korišten posebni element sučelja (interface element) na kontaktu zasipa i geomreže, kako bi se numeričkom simulacijom obuhvatili relativni pomaci (diskontinuitet u polju pomaka) između zasipa i geomreže, tj. proklizavanje pri izvlačenju. Ovaj kontakt

najčešće se modelira korištenjem elemenata nulte debljine s elastoplastičnim svojstvima (krutost i čvrstoća).

3.1.1. Mrežasta armatura/geomreža modelirana zamjenskim elementom užeta – "geogrid" element

Većina objavljenih numeričkih simulacija podrazumijeva izvlačenje geomreža simuliranih linijskim elementom (element užeta – "geogrid" element) sposobnim da preuzme vlačno naprezanje, ne obuhvaćajući izravno doprinos otporu uzdužnih i poprečnih elemenata mreže. Yogarajah i Yeo [79] među prvima su predložili ideju numeričkog modeliranja pokusa izvlačenja (slika 3). Oni su geomrežu modelirali zamjenjujućim linearno elastičnim tankim elementom užeta jedinične širine ("geogrid" element), a složeno ponašanje kontakta geomreže i zasipa pojednostavili su elementom sučelja nulte debljine [93] sa Mohr-Coulombovim konstitutivnim modelom. Slični modeli korišteni su i kasnije [77, 87]. Navedeni postupak modeliranja pokusa izvlačenja prije svega se provodio s ciljem da se povratnom analizom numerički potvrdi veličina granične sile izvlačenja [64, 77, 79].



Slika 3. Numerički modeli pokusa izvlačenja s mrežastom armaturom simuliranom elementom užeta jedinične širine (preuzeto i modificirano iz [79])

Osim navedenih, postoje i primjeri numeričkih simulacija ovoga tipa koje su imale cilj da se provjeri kako deformacijska (reološka) svojstva geomreže i model kontakta utječu na rezultate modeliranja pokusa [22]. Rezultati tih simulacija su pokazali da modeliranje deformacija puzanja geomreže nema poseban utjecaj na rezultate, dok krutost geomreže i svojstva kontakta znatno utječu na mobilizaciju posmičnog naprezanja na sučelju geomreže i zasipa.

Dimenzije kutije

Palmeira i Dias [88] su, koristeći model geomreže sa zamjenskim elementom užeta jedinične širine te Mohr-Coulombov model za zasip, istraživali utjecaj krutosti gornje stijenke kutije i ukupne visine kutije na mobilizirani otpor pri izvlačenju. Navedeni autori su istraživali utjecaj dimenzija kutije na ukupno 9 modela s tri duljine kutije (0,5; 1,0; 2,0 m), te tri visine kutije (0,3; 0,6; 1,0). U navedenim simulacijama, geomreža je bila postavljena u sredini visine, a na osnovi izračunanih mobiliziranih otpora je utvrđeno da se mobilizirani otpor na izvlačenje smanjuje s povećanjem visine. To smanjenje iznosi oko 10 % za povećanje visine kutije

(H_g) sa 0,3 m na 1,0 m, pri čemu povećanje s visine 0,3 m na visinu 0,6 m gotovo ne utječe na veličinu sile potrebne za izvlačenje geomreže. Ovi rezultati nisu interpretirani, nego je tek pozivanjem na rezultate pokusa iz literature [7, 17] zaključeno da visina kutije treba biti veća od 0.6 m.

Rezultati numeričkih simulacija [88] odnose se i na utjecaj duljine "košuljice" na mobilizirani granični otpor. Za duljinu geomreže od 0,5 m, s vlačnom krutošću $EA = 200.0 \text{ kN/m}$, za kutiju visine 1,0 m i duljine 1,2 metra utvrđeno je da povećanje duljine "košuljice" uzrokuje povećanje graničnog otpora. Treba napomenuti kako se u analizi služilo pretpostavkama da je trenje na stijenkama kutije umanjeno podmazivanjem i iznosi, $\delta_p = 6^\circ$. Te su analize provedene s geomrežom koja je simulirana kao zamjenski element užeta jedinične širine, pri čemu je duljina košuljice simulirana izoliranjem geomreže od zasipa na dijelu košuljice. Ovo je jedini primjer numeričkog modeliranja pokusa u kojem je obuhvaćeno trenje po stijenkama kutije.

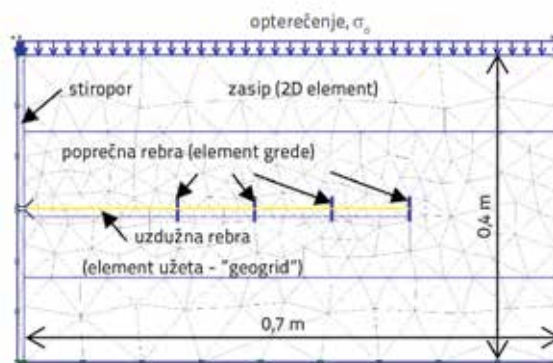
Iako je primjena modela geomreže simulirane linijskim elementom užeta ("geogrid" element) u novije vrijeme zamijenjena modelom mreže koja obuhvaća i poprečna rebra, numeričke analize pokusa izvlačenja ovakvog oblika aktualne su i danas [85].

3.1.2. Mrežasta armatura/geomreža modelirana uzdužnim i poprečnim rebrima

Pregledom dostupne literature utvrđeno je da je tek u četiri primjera objavljenih istraživanja numeričkog simuliranja pokusa izvlačenja korišten 2D model armature s uzdužnim ("geogrid" element) i poprečnim rebrima (elementi ploče ili kruti membranski elementi) [28, 37, 57, 88].

Palmeirai Dias [88] predložili su primjenu numeričkog modeliranja armature s ciljem usporedbe predviđenih i izmjerenih rezultata. Usporedba je dana u obliku dijagrama ovisnosti pomaka i sile na prednjem kraju armature, te veličine horizontalnog tlaka na prednjoj stijenci kutije uređaja za izvlačenje. Autori ocjenjuju da korišteni alat predviđa rezultate koji su u skladu s rezultatima mjerenja. Ipak, ovaj model se zbog jednog detalja bitno razlikuje od ostalih navedenih modela. Naime, prema [88], čvrstoća sučelja uzdužnih rebara i zasipa definirana je koeficijentom interakcije ($C_i = 0,95$), što znači da je trenje zasipa i uzdužnih rebara gotovo jednako trenju zasipa. U drugim radovima [28, 37, 57] navedeno trenje je modelirano koeficijentom interakcije $C_i < 0,2$, ili je trenje uzdužnih rebara potpuno zanemareno [40]. Navedene vrijednosti koeficijenta interakcije između zasipa i uzdužnih rebara su utvrđene povratnom analizom na osnovi rezultata pokusa izvlačenja izoliranih uzdužnih rebara. Očekivano, utvrđene su relativno niske vrijednosti ekvivalentne čvrstoće kontakta u usporedbi s čvrstoćom zasipa budući da je doprinos uzdužnih rebara u otporu na izvlačenje znatno manji od doprinosu poprečnih rebara koji je izravno obuhvaćen modelom. Khedkar i Mandal [28] su metodom konačnih elemenata na dvodimenzionalnom modelu (Plaxis 2D – [94]) simulirali poprečna rebra specijalno oblikovanih sačastih čeličnih mreža

formiranih od limova različitih visina i konstantne debljine. Numerički model s osnovnim elementima je prikazan na slici 4. Različite visine limova modelirane su linearno elastičnim elementima grede sposobnim da preuzmu savijanje, razvlačenje i tlak. Variranjem razmaka poprečnih rebara uspjeli su optimizirati odnos visine i razmaka lima mreže ugrađene u pijesak. Konkretno, maksimalan otpor izvlačenju ostvaruje se za omjer razmaka i visine poprečnih elemenata mreže (S/t) od oko 3,5. Numerički model s armaturom modeliranom uzdužnim i poprečnim rebrima, nakon uspješne verifikacije, iskorišten je da se ocijeni utjecaj nekih rubnih uvjeta pokusa na mobilizirani otpor pri izvlačenju [28].



Slika 4. Numerički model pokusa izvlačenja s armaturom od uzdužnih i poprečnih rebara, Plaxis 2D [94]: metoda konačnih elemenata [28]

Metodologija istraživanja utjecaja rubnih uvjeta sastojala se u tome da se obje dimenzije kutije udvostruče, zadržavajući dimenzije armature i poprečnih rebara konstantnim. Interpretirajući sliku ukupnih pomaka zasipa u kutiji pri graničnoj sili izvlačenja, autori zaključuju da su dimenzije kutije korištene u pokusu adekvatno odabrane. Naime, izračunani pomaci na uvećanom modelu, na udaljenosti od prednje stijenske jednakoj duljini stvarne kutije, zanemarivi su. Osim usporedbe veličine zone zahvaćene pomacima, uspoređena je i slika srednjeg efektivnog naprezanja unutar kutije pri opterećenju graničnom silom. Zanemarive razlike u intenzitetu srednjeg efektivnog naprezanja na rubovima kutije pokazuju da daljnje uvećanje dimenzija kutije u odnosu na dimenzije fizičkog modela korištene u laboratoriji u ne bi utjecalo na rezultate pokusa.

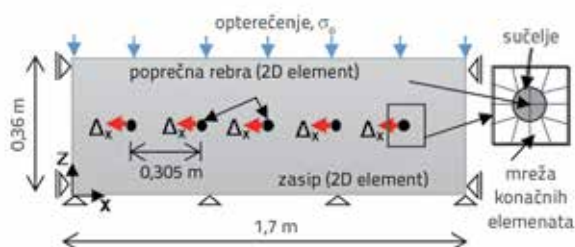
Abdi i Zandieh [37] koristili su isti numerički model te uspješno simulirali objavljene rezultate mjerenja. Ti su autori numeričkim simulacijama istraživali utjecaj duljine kutije na raspodjelu srednjeg efektivnog naprezanja i veličinu zone kutije zahvaćene pomacima pri graničnoj sili izvlačenja. Istraživanje je pokazalo da, za pjeskoviti materijal, zona kutije zahvaćena dodatnim srednjim efektivnim naprezanjem uslijed nametnutog izvlačenja armature ne zahvaća područje udaljenije od 20,0 cm izvan slobodnog (zadnjeg) kraja armature. Na osnovi tih rezultata, autori zaključuju da je duljina kutije od 100,0 cm adekvatna za duljinu armature od 80,0 cm.

U oba navedena istraživanja kontakt je između zasipa i poprečnih rebara određen istom čvrstoćom i krutošću kao i zasip. Iako nisu provedene posebne analize osjetljivosti koje potvrđuju opravdanost ove pretpostavke, očekuje se da čvrstoća i krutost sučelja poprečnih rebara i zasipa nisu od velike važnosti za mobilizaciju i granični otpor pri izvlačenju. Naime, odvajanje zadnjeg kraja poprečnog rebra omogućeno je modelom materijala zasipa koji isključuje vlačno naprezanje (tension cut-off), a prednja se strana poprečnog rebra tijekom pokusa utiskuje horizontalno u zasip.

Numerički model pokusa izvlačenja s ovako simuliranom armaturom mogao bi se primijeniti za istraživanje utjecaja geometrije kutije i armature te svojstava zasipa na graničnu otpornost na izvlačenje. Pretpostavlja se, zbog izravnog doprinosa poprečnih rebara, da će utjecaj trenja zasipa i prednje stijenke, kao i utjecaj visine zasipa iznad razine armature, biti drugačiji od onoga utvrđenog s armaturom koja je modelirana elementom užeta jedinične širine. Takvo istraživanje je provedeno u ovom radu, a detalji su opisani u poglavlju 4.

3.1.3. Mrežasta armatura/geomreža modelirana samo poprečnim rebrima

Alam i dr. [40] su metodom konačnih razlika na 2D modelu (FLAC 2D – *Itasca Consulting Group*, 2002 – [95]) simulirali pokus izvlačenja niza poprečnih rebara usvajajući pretpostavku da je većina otpora pri izvlačenju neistezljivih armatura posljedica pasivnog otpora zasipa ispred poprečnih rebara (slika 5.).



Slika 5. Numerički model pokusa izvlačenja s armaturom koja se sastoji samo od poprečnih rebara, FLAC 2D: metoda konačnih razlika (preuzeto i modificirano iz [40])

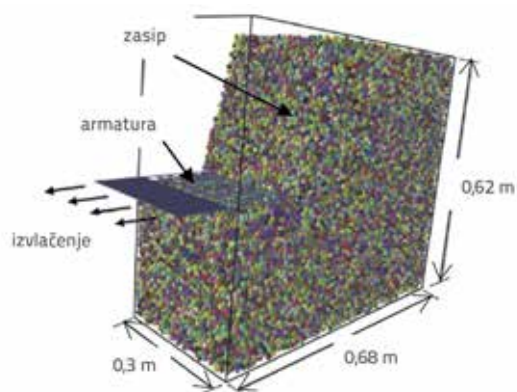
Ovakvim pristupom numeričkom modeliranju nameće se poprečnim rebrima isključivo horizontalni pomak koji može odstupati od eksperimentalno izmjerenih pomaka unutar kutije uređaja za izvlačenje. Odstupanje se događa zbog nesimetričnog deformiranja poprečnih rebara kao posljedice volumenskih deformacija na sučelju. Ovakav trend pomaka potvrđen je eksperimentalnim istraživanjima [33] što se može obuhvatiti modelom armature kod kojeg je opterećenje aplicirano na prednji kraj armature.

3.1.4. Trodimenzionalna mrežasta armatura/geomreža

Palmeira i Dias [88] naglasili su da bi modeliranje trodimenzionalne geometrije geomreže/mrežaste armature

bilo veoma kompleksno, ali danas postoje i takvi primjeri. Naime, numerički 3D model pokusa izvlačenja metodom konačnih elemenata s eksplicitnom 3D geometrijom mreže proveli su Hussein i Meguid [96]. Oni su korištenjem programskog paketa ABAQUS 3D (*Dassault Systems Simulia Corp* – [97]) istraživali utjecaj pojedinih parametara modela na rezultat simulacije te pokazali da poprečna rebra analizirane jednoosne geomreže doprinose nosivosti na izvlačenje tek 36 % od ukupnog otpora. Objavljena numerička simulacija ne sadrži detaljnu analizu osjetljivosti koja potvrđuje da rezultati ne ovise o gustoći mreže konačnih elemenata iako ovaj problem može biti bitan, budući da je eksplicitno modelirana geometrija geomreže čija su poprečna rebra veoma malog promjera (oko 1,0 mm).

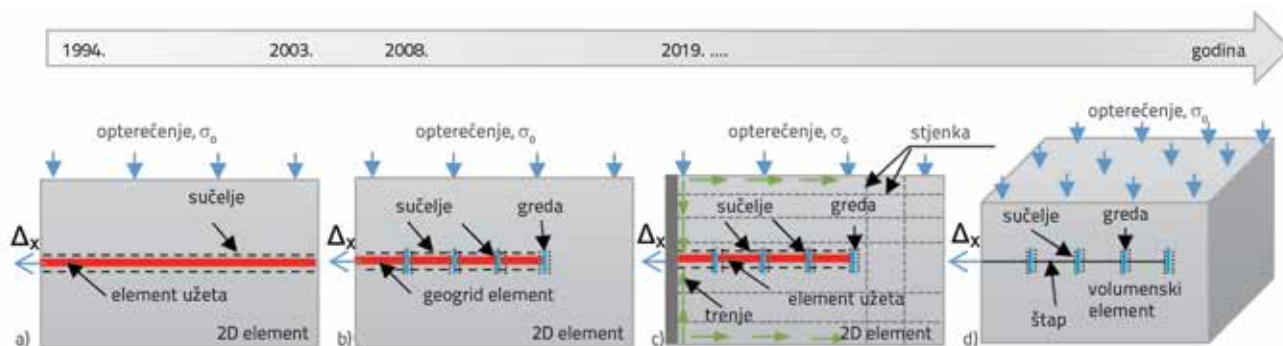
Osim navedene 3D numeričke simulacije metodom konačnih elemenata, u literaturi su objavljeni i rezultati složenih numeričkih simulacija koje se baziraju na metodi diskretnih elemenata [98]. Dodatno, Tran i dr. [99] su prezentirali numerički model koji opisuje i savijanje poprečnih elemenata mreža pri izvlačenju (slika 6.). U tom radu autori su razvili 3D numerički model koji predstavlja spregu konačnih (KE) i diskretnih (DE) elemenata, s elementima sučelja koji povezuju KE i DE domene. Konkretno, mreža je modelirana volumenskim konačnim elementima (solid elementi), a tlo diskretnim elementima.



Slika 6. Numerički 3D model koji predstavlja spregu konačnih (KE) i diskretnih (DE) elemenata [99]

Autori su ovim modelom potvrdili mjerenjima uočeni trend koncentracije naprezanja na prednjem kraju istezljivih geomreža, te pokazali da implementirani model uspješno opisuje ponašanje istezljivih mreža u uvjetima izvlačenja. Slični zaključci su utvrđeni i u [100]. Na ograničenje praktične primjene takvih složenih modela upozorili su 2016. godine i Bathurst i Ezzein [101], jer ovakve složene numeričke simulacije nisu uspješno primijenjene za numeričko simuliranje konstrukcija (zidova) od armiranog tla. Ipak, neki zaključci i ideje istraživanja interakcije geomreža i zasipa koji se zasnivaju na DEM analizi prikazni su u nastavku.

DEM analiza je pogodna za istraživanje utjecaja veličine zrna i otvora geomreže na otpornost pri izvlačenju. Jednu takvu skupinu simulacija proveli su McDowel i dr. [102] te pokazali da je odnos veličine otvora geomreže i promjera zrna zasipa



Slika 7. Ilustracija modela mrežastih armatura i geomreža objavljenih od 1994. do danas: a) element užeta jedinične širine s elementom sučelja; b) uzdužna rebra (element užeta) s elementom sučelja i poprečna rebra kao element grede; c) samo poprečna rebra kao kruti 2D element; d) 3D model s eksplicitnom geometrijom geomreže [93]

od 1,4 optimalan, tj. da rezultira najvećim vršnim otporom na izvlačenje od svih analiziranih geometrijskih konfiguracija (sva zrna su promjera 40,0 mm). Prema ovom istraživanju, navedeni omjer otvora geomreže i promjera zrna zasipa osigurava najbolje uklještenje zrna u otvore mreže. Slično istraživanje su proveli Wang i dr. [103] gdje su DEM numeričkim simulacijama izučavali utjecaj broja poprečnih rebara na otpor pri izvlačenju, te pokazali da granična sila izvlačenja raste s porastom broja poprečnih rebara.

U literaturi postoje i primjeri istraživanja utjecaja zbijenosti zasipa, oblika zrna te krutosti geomreža na interakciju zasip – geomreža, ali se uglavnom ograničavaju na uspješnu verifikaciju modela te vizualizaciju prijenosa opterećenja s geomreže na zasip (npr. [104, 105]).

U zaključku pregleda dosadašnjih istraživanja navodi se kronologija razvoja numeričkih modela pokusa izvlačenja metodom konačnih elemenata i konačnih razlika. Modeli opisani u poglavljima 3.1.1. i 3.1.2. ilustrativno su naznačeni na slikama 7.a i 7.b, a na slikama 7.c i 7.d su prikazani modeli koje će biti korišteni u ovom radu (poprečni presjek kutije za 2D modele i kompletna geometrija kutije za 3D model).

Numeričke simulacije pokusa izvlačenja s modelom geomreže koji uključuje otvore mogao bi se primijeniti za istraživanje utjecaja geometrije kutije i rubnih uvjeta pokusa na graničnu otpornost na izvlačenje. Pretpostavlja se, zbog izravnog doprinosa poprečnih rebara, da će utjecaj trenja zasipa i bočnih stijenki, kao i utjecaj širine geomreže u odnosu na širinu kutije, biti drugačiji od onoga utvrđenog s mrežastom armaturom koja je modelirana elementom membrane ili 3D volumenskim elementom. Takvo istraživanje je provedeno u ovom radu, a detalji su opisani u poglavlju 4.

4. Novi model i rezultati numeričkih 2D i 3D simulacija

Budući da se u ovom radu posebice istražuje utjecaj rubnih uvjeta na otpor pri izvlačenju, osmišljena je skupina 2D i 3D simulacija pokusa [93] kojima će se utvrditi utjecaj trenja bočnih stijenki na ekvivalentni koeficijent trenja.

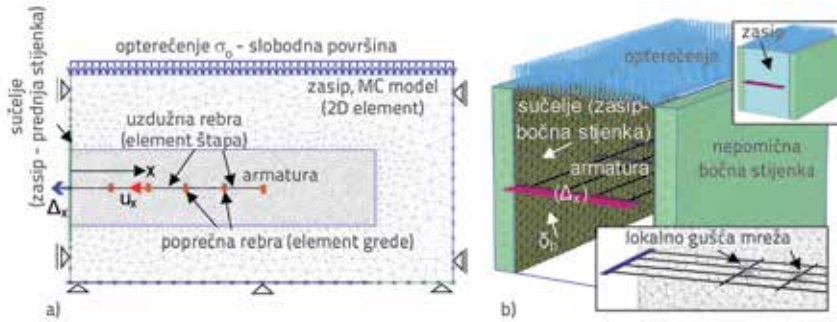
Detalji novog numeričkog modela prikazani su slikom 8. Taj se model mrežaste armature sastoji od poprečnih i uzdužnih rebara. Poprečna rebra su modelirana elementima grede čija je visina jednaka promjeru poprečnog rebra, a uzdužna elementom štapa koji povezuje pojedina poprečna rebra. Predloženi model mrežaste armature je relativno jednostavan jer je ukupni otpor na izvlačenje sveden na pasivni otpor zasipa ispred poprečnih rebara, a trenje na kontaktu zasipa i uzdužnih rebara je zanemareno. Ova pretpostavka opravdana je rezultatima eksperimentalnih istraživanja, prema kojima poprečna rebra pridonose ukupnom mobiliziranom otporu pri izvlačenju mrežaste armature znatno više od uzdužnih rebara (iznad 90 %, [40]).

Rubni uvjeti numeričkog modela pokusa odgovaraju uvjetima eksperimenta u kojem se istražuje interakcija geomreže i zasipa u uvjetima izvlačenja [66]. Konkretno, prednja i stražnja stijenka kutije nepomične su u horizontalnom smjeru, a donja je stijenka kutije nepomična u vertikalnom i horizontalnom smjeru. Na slobodnoj površini kutije aplicirano je površinsko opterećenje koje simulira različito vertikalno naprezanje u razini poprečnog rebra, kakvo se može očekivati u realnim konstrukcijama. Opterećenje je aplicirano izravno na površinu zasipa, što adekvatno simulira opterećenje koje se nanosi preko zračnog jastuka pri provedbi pokusa.

Na prednjem kraju uzdužnog rebra nametnut je horizontalni pomak (Δ_x), koji se u inkrementima povećava do potpunog proklizavanja mrežaste armature u odnosu na okolno tlo (zasip). Uslijed nametnutog pomaka, povećava se horizontalno naprezanje ispred poprečnih rebara, što uzrokuje prirast mobiliziranog otpora (F_p) i pomaka uzduž mrežaste armature (u_x).

Na osnovi iscrpnih analiza osjetljivosti [93], usvojeni su sljedeći detalji numeričkog modela na kojem će se istražiti utjecaj rubnih uvjeta na rezultate:

- Izabrane su izrazito male vrijednosti prosječne dimenzije konačnih elemenata i to prema kriterijima da se za svaki analizirani model provjeri da daljnje povećanje gustoće ne utječe na rezultat više od 1 % u odnosu na prethodni stupanj gustoće (2D model – slika 8.a), odnosno da se iskoriste



Slika 8. Novi numerički model pokusa izvlačenja mrežaste armature :a) 2D model; b) 3D model [92]

maksimalni kapaciteti programa u pogledu broja elemenata (3D model – slika 8.b).

- Veća gustoća konačnih elemenata korištena je u zoni oko poprečnih rebara (budući da gustoća u toj zoni znatnije utječe na rezultat), a manja gustoća elemenata u zoni udaljenijoj od poprečnih rebara. Time su omogućene znatne uštede u trajanju proračunskih analiza uz zanemariv utjecaj na rezultat.
- Pri numeričkoj 2D simulaciji pokusa izvlačenja primijenjeni su trokutni konačni elementi s 15 čvorova i 12 Gaussovih integracijskih točaka. Pri 3D analizama korišten je konačni element u obliku tetraedra s 10 čvorova i 4 točke integracije.
- Mohr-Coulombov i Hardening Soil modeli tla dali su iste vrijednosti graničnih sila izvlačenja za iste parametre čvrstoće, pa je u daljnjim analizama primijenjen Mohr-Coulombov konstitutivni model.
- Budući da ne postoji bitna razlika za simulacije izvlačenja nametnutom silom ili nametnutim pomakom na prednjem kraju mrežaste armature, u ovom radu je za simulacije izvlačenja izabrano modeliranje izvlačenja s nametnutim pomakom.
- Rezultati analiza osjetljivosti pokazuju da gornja i donja granica koeficijenta horizontalnog tlaka u stanju mirovanja u rasponu od 0,2 do 1,0 predviđaju gotovo istu mobilizaciju otpora pri izvlačenju kao i slučaj modeliranja početnog stanja napreznja korištenjem izraza koji je predložio Jaky [106].
- Utjecaj položaja stražnje i donje stijenke kutije na granični otpor je zanemariv u usporedbi s položajem prednje i gornje

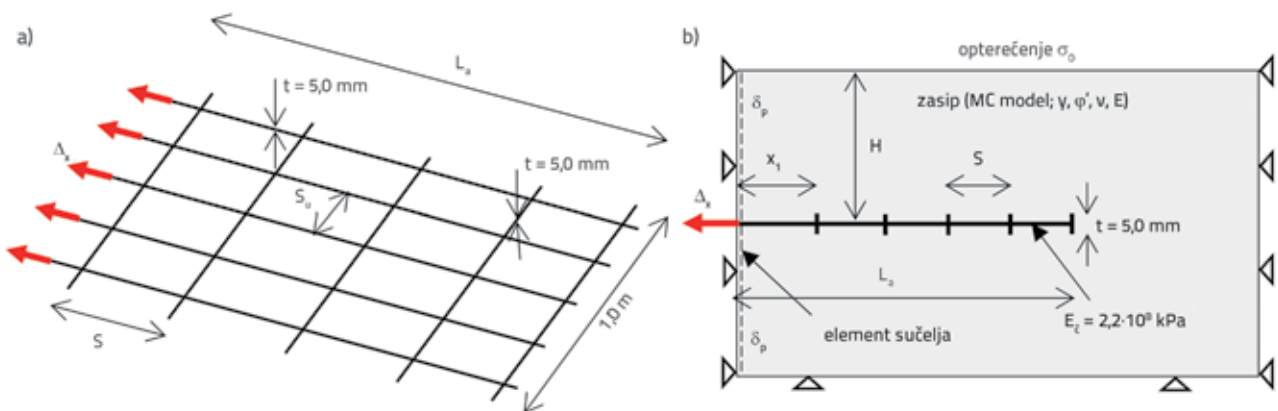
stijenke. Zbog toga je, posebna pozornost usmjerena na ispitivanje utjecaja visine zasipa iznad mrežaste armature na nosivost pri izvlačenju.

- Budući da se rezultati simulacije bez analiziranja i s analiziranjem velikih deformacija (ažurirana Lagrange-ova formulacija) razlikuju, primijenjena je analiza koja obuhvaća velike deformacije.

Rezultati numeričkih simulacija su uspoređeni s objavljenim eksperimentima [30, 39] i analitičkim rješenjima koja

se baziraju na principima granične ravnoteže. Pokazalo se da novi numerički model uspješno opisuje mehanizme prijenosa opterećenja utvrđene mjerenjima na mikrorazini, kao i da je globalni odgovor modela u skladu s objavljenim rezultatima mjerenja [93]. Nakon navedene optimizacije i verifikacije novog modela, proveden je niz dodatnih simulacija (ukupno 144 2D modela i 11 3D modela) pokusa izvlačenja s ciljem da se utvrdi utjecaj rubnih uvjeta i geometrije mrežaste armature na granični otpor pri izvlačenju. Modeli se međusobno razlikuju po visini zasipa iznad armature (H), geometriji mrežaste armature (S/t i Lₓ), položaju armature u kutiji (x₁), zbijenosti zasipa (definirano kutom unutarnjeg trenja, kutom dilatacije i modulom elastičnosti), trenju zasipa i stijenki kutije (δₚ = 0°; 6° i 25°), te omjeru širine kutije i širine mrežaste armature (Bₛ/B). Pojedine veličine su naznačene na slici 9. i prije na slici 2., a geotehnički parametri zasipa prikazani su u tablici 2.

Opterećenje na površini zasipa je u svim simulacijama izabrano tako da je početno vertikalno efektivno napreznje u razini geomreže $\gamma \cdot H + \sigma_0 = 40,0 \text{ kPa}$ (odgovara dubini od približno 2,0 m ispod vrha zida, gdje je vjerojatnost izvlačenja u realnom zidu najveća). Čelična mrežasta armatura s promjerom poprečnih i uzdužnih rebara od 5,0 mm korištena je u svim analizama. Takva, relativno kruta, neistezljiva mrežasta armatura onemogućava otkazivanje armature uslijed prekoračenja vlačnog napreznja, pa je pogodna za provođenje pokusa izvlačenja.



Slika 9. Oznake pojedinih veličina: a) geometrijska svojstva mrežaste armature i b) postavka pokusa i oznake

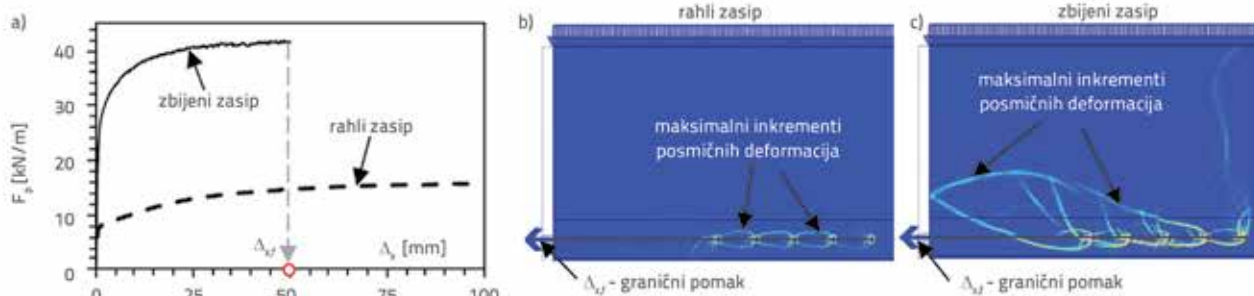
Tablica 2. Geotehnička svojstva zasipa

Parametar, oznaka, jedinica	Rahli zasip	Zbijeni zasip
Volumna težina, γ [kN/m ³]	17,0	17,0
Efektivni kut unutarnjeg trenja, ϕ' [°]	31,0	44,0
Kut dilatacije, ψ [°]	3,0	11,0
Efektivna kohezija, c' [kN/m ²]	0,01	0,01
Referentni modul elastičnosti, E_{ref} [kN/m ²]	10000,0	50000,0
Poissonov koeficijent, ν	0,3	0,3

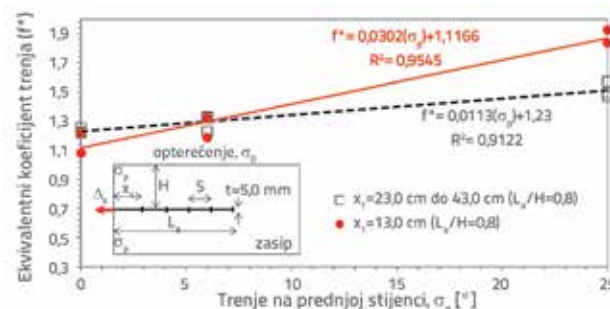
Tipični rezultati 2D simulacije prikazani su na slici 10. gdje je naznačen utjecaj zbijenosti zasipa na prirast otpora tijekom izvlačenja (slika 10.a). Očekivano, veća zbijenost rezultira većom silom izvlačenja i bržom mobilizacijom otpora (F_p) s prirastom nametnutog pomaka na prednjem kraju mrežaste armature (Δ_x). Zona maksimalnih inkrementa posmičnih deformacija pri graničnom pomaku (slika 10.b) upozorava na mehanizam sloma zasipa uslijed izvlačenja. Kod zbijenog zasipa, taj slom uzrokovan je dostizanjem graničnog pasivnog otpora ispred svih poprečnih rebara čime se formiraju dvije plohe sloma (ispod i iznad razine geomreže). Te dvije plohe se prostiru prema prednjoj stijenci kutije, čime se mobiliziraju trenje na sučelju zasipa i ove stijenke. Zona sloma definirana maksimalnim inkrementima posmičnih deformacija kod rahlog zasipa lokalizirana je oko poprečnih rebara, te su pomaci zasipa na većim udaljenostima od mrežaste armature znatno manji nego kod zbijenog zasipa.

Zbog toga je utjecaj rubnih uvjeta na rezultate pokusa izvlačenja geomreža iz rahlog zasipa osjetno manji nego za slučaj izvlačenja iz zbijenog zasipa. Budući da se kod zidova od armiranog tla u pravilu koristi zbijeni nekoherentni zasip, a ne rahli, samo slučaj zbijenog zasipa će biti analiziran pri istraživanju utjecaja rubnih uvjeta na rezultat pokusa.

Utjecaj trenja na prednjoj stijenci na ekvivalentni koeficijent trenja zbijenog zasipa i mrežaste armature prikazan je na slici 11. U skladu s rezultatom prikazanim na slici 10.b, te danom interpretacijom, veće trenje na prednjoj stijenci ima za posljedicu porast otpora na izvlačenje (tj. povećanje ekvivalentnog koeficijenta trenja, f^*).



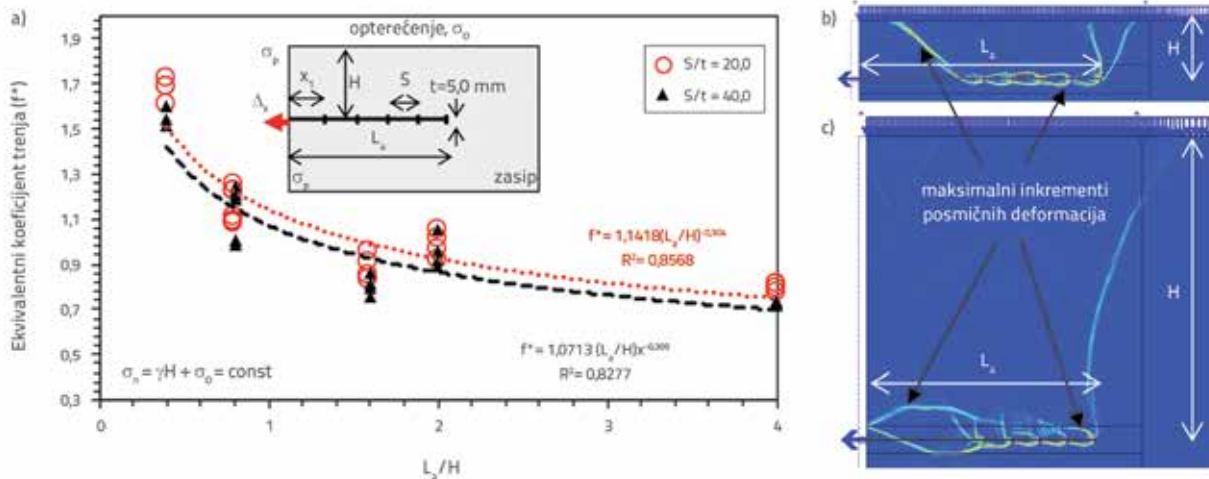
Slika 10. Utjecaj zbijenosti zasipa na tipični rezultat simulacije: a) ovisnost sila – pomak; b) mehanizam izvlačenja iz rahlog zasipa; c) mehanizam izvlačenja iz zbijenog zasipa



Slika 11. Utjecaj trenja na prednjoj stijenci na ekvivalentni koeficijent trenja [93]

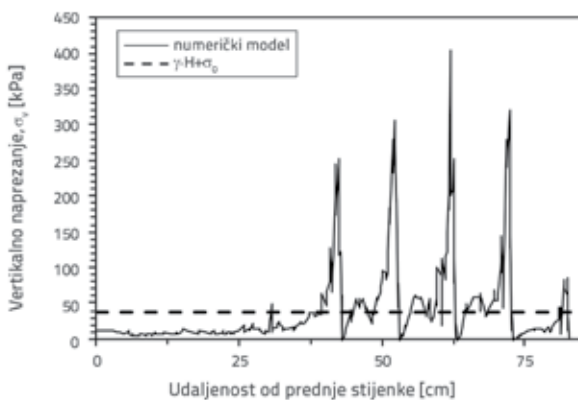
Povećanjem udaljenosti prvog poprečnog rebra od prednje stijenke, osjetno se smanjuje utjecaj trenja što pokazuje blaže položen regresijski pravac utvrđen za slučaj udaljenosti, $x_1 = 23,0$ cm, u usporedbi s udaljenosti, $x_1 = 13,0$ cm. Za slučaj rahlog zasipa taj utjecaj je praktički zanemariv, budući da se slom zasipa u ovakvom materijalu događa lokalno, ne mobilizirajući veću masu zasipa. Ovi rezultati su u skladu s eksperimentima u kojima je kroz prozirno staklo utvrđena veličina zone zasipa oko geomreže, koja se pomiče tijekom nametnutog izvlačenja na prednjem kraju [33].

Na slici 12.a je prikazan utjecaj omjera duljine mrežaste armature i visine zasipa iznad razine armature (L_a/H) na ekvivalentni koeficijent trenja (f^*) zbijenog zasipa i armature. Rezultati se odnose na model s idealno glatkom prednjom stijenkicom te omjerom razmaka i promjera poprečnih rebara (S/t) od 20,0 i 40,0. Korištenje kratkih mrežastih armatura u odnosu na visinu nadsloja (npr. $L_a/H = 0,75$ na slici 12.b) ima za posljedicu drugačiji mehanizam sloma te značajniji utjecaj rubnih uvjeta na rezultat simulacije u odnosu na slučaj geometrijskih konfiguracija s većim odnosom duljine mrežaste armature i visine nadsloja (npr. $L_a/H = 4,15$ na slici 12.b). Zbog različitog mehanizma izvlačenja, kod manjih omjera L_a/H (kraća mrežasta armatura – slika 12.c) dolazi do povećanja prosječnog normalnog naprezanja u razini armature (σ_p) pri graničnom pomaku u usporedbi s početnim, $\gamma H + \sigma_v$, što ima za posljedicu da interpretirana vrijednost ekvivalentnog koeficijenta trenja (f^*) bude znatno veća nego kad klizna površina ne zahvaća prednji rub (slika 12.b).

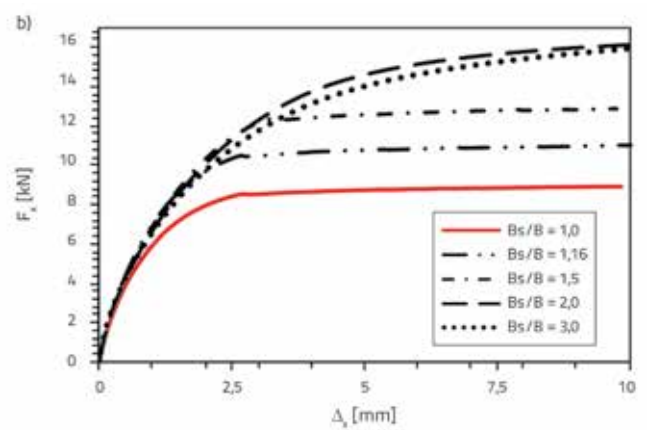
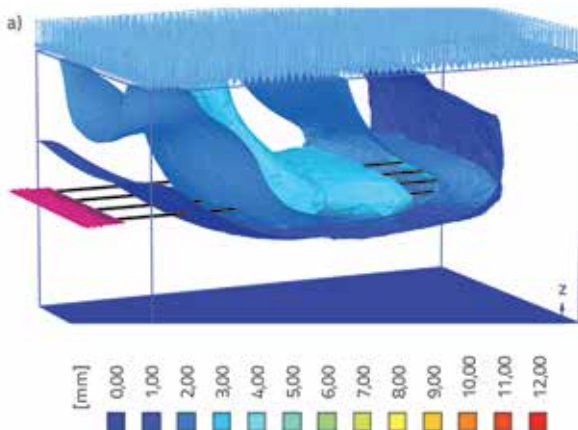


Slika 12. Utjecaj omjera duljine mrežaste armature i visine zasipa iznad razine armature (L_a/H) na ekvivalentni koeficijent trenja (f^*); b) mehanizam izvlačenja za $L_a/H = 4,15$; c) mehanizam izvlačenja za $L_a/H = 0,75$ [93]

Na slici 13. su prikazani dijagrami vertikalnih naprezanja na kontaktu mrežaste armature i zasipa (presjek 5,0 mm iznad ravnine geomreže) pri graničnoj sili izvlačenja.



Slika 13. Raspodjela normalnih naprezanja pri graničnoj sili izvlačenja, 5,0 mm iznad razine geomreže



Slika 14. a) Ukupni pomaci zasipa pri graničnoj sili izvlačenja mrežaste armature $B_s/B = 1,5$; b) Utjecaj širine kutije (uz konstantnu širinu mrežaste armature) na granični otpor pri izvlačenju

Tablica 3. Utjecaj podmazivanja bočnih stijenki (simulirano smanjenjem trenja kontakta stijenki i zasipa) i zbijenosti zasipa na granični otpor pri izvlačenju utvrđen 3D modelom

Zasip i trenje $B_s/B = 1,16$	Vrlo zbijeni zasip			Slabo zbijeni zasip		
	$\delta_b = 3^\circ$	$\delta_b = 6^\circ$	$\delta_b = 25^\circ$	$\delta_b = 3^\circ$	$\delta_b = 6^\circ$	$\delta_b = 25^\circ$
$F_{p,ult}$ [kN]	10,8	11,3	17,2	5,7	5,9	8,2

dalje od prednje stijenke, te korištenjem dovoljno malih visina zasipa u odnosu na duljinu armature, ostvareni ekvivalentni koeficijenti trenja manji su ili jednaki tangensu kuta unutarnjeg trenja zasipa (za analizirane slučajeve zasipa).

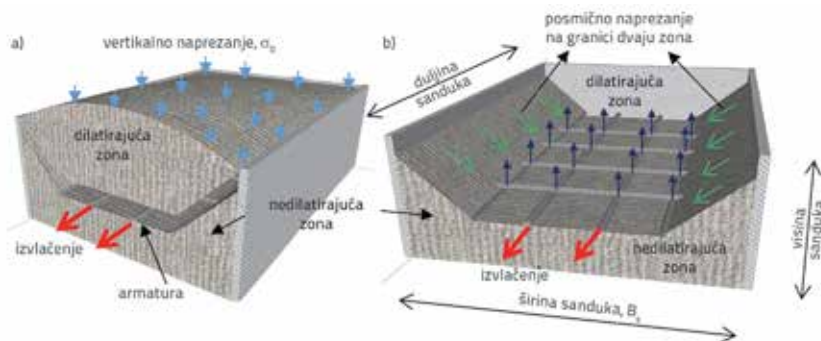
Trodimenzionalne numeričke simulacije iskorištene su za analiziranje utjecaja širine mrežaste armature i trenja na bočnim stijenkama na rezultat pokusa. Budući da je utjecaj trenja zasipa i prednje stijenke detaljno istražen 2D analizama, ta stijenka je u svim 3D analizama modelirana kao idealno glatka. Analiziran je slučaj mrežaste armature s tri poprečna

rebra ugrađena u zbijeni zasip, pri vertikalnom opterećenju od 30,0 kPa, a sve u skladu sa slikom 8. Konstantna širina armature od 30,0 cm korištena je u kombinaciji sa širinom kutije od 30,0; 35,0; 45,0; 60,0 i 90,0 cm, čime su definirane veličine omjera širine kutije uređaja za izvlačenje i širine armature (B_s/B) od 1,0; 1,16; 1,5; 2,0 i 3,0. Rezultati numeričkih simulacija su prikazani na slici 14. Slika 14.a pokazuje ukupne pomake zasipa oko mrežaste armature pri graničnoj sili izvlačenja, a zavisnost sile i pomaka prednjeg kraja armature je dana slikom 14.b. Rezultati pokazuju da korištenje mrežastih armatura užih od kutije ima za posljedicu povećanje sile izvlačenja, što je u skladu s eksperimentalnim istraživanjima provedenima s geomrežama [46].

Također, pokazano je da korištenje mrežaste armature čija širina nije znatno uža od kutije (omjer širine kutije i armature, $B_s/B = 1,16$), uz "podmazivanje" bočnih stijenki (modelski simulirano smanjenjem čvrstoće ovog sučelja), znatno smanjuje utjecaj trenja zasipa i ovih površina. Još se vidi i da smanjenje trenja već na $\delta_b = 6^\circ$ rezultira stanjem naprezanja koje odgovara gotovo idealno glatkoj bočnoj stijenci (tablica 3.). Na osnovi rezultata 3D analiza mogu se izdvojiti dva osnovna trenda:

- trenje na bočnim stijenkama znatno utječe na granični otpor pri izvlačenju mrežastih armatura iz relativno uske kutije,
- doprinos trenja bočnih stijenki na uvećanje graničnog otpora veći je u slučaju zbijenog zasipa nego za slučaj rahlog zasipa.

Navedeni trendovi su u skladu s eksperimentalnim istraživanjima [46], koji su istakli nedostatke pokusa izvlačenja u slučaju da se on izvodi s geomrežom koja je znatno uža od kutije. Na slici 15 su ilustrirani rezultati 3D modela u kojem je geomreža uža od kutije. Prilikom izvlačenja pojavljuju se dvije karakteristične zone



Slika 15. Ilustracija 3D efekta pri izvlačenju mrežaste armature uže od kutije: a) deformirana konfiguracija zasipa; b) posmično naprezanje na granici dilatirajuće i nedilatirajuće zone zasipa [93]

nasipa – gornja, dilatirajuća zona (iznad geomreže – pomaci usmjereni vertikalno prema vrhu kutije) i donja – nedilatirajuća zona (ispod geomreže), u kojoj se zasip vrlo malo deformira. Na granici dviju zona pojavljuje se posmično naprezanje, kako je prikazano na slici 15.b. Ova komponenta naprezanja povećava normalno naprezanje na bočnim rubovima mrežaste armature/geomreže. To uzrokuje povećanje otpora na izvlačenje u odnosu na slučaj kada ovaj efekt ne postoji (tj. kada je mrežasta armatura široka kao kutija), što je i prije prepoznato kod trakastih tipova geosintetika [24]. Budući da se mrežaste armature, za razliku od geosintetičkih/čeličnih traka, u zidovima najčešće izvode tako da pokrivaju cjelokupnu površinu, ovaj efekt treba reducirati pri pokusu izvlačenja mreža i to korištenjem geomreža koje nisu uže od kutije, te podmazivanjem bočnih stijenki kutije prije ugradnje zasipa.

5. Zaključak

Numeričko modeliranje može biti pomoć u razumijevanju mehanizama interakcije pri provedbi pokusa izvlačenja i pomoć pri izradi preporuka o provedbi pokusa izvlačenja. Numeričke simulacije izvlačenja različitih geometrijskih konfiguracija mrežastih armatura iz različitih vrsta zasipa iskorištene su za unaprijeđenje shvaćanja mehanizma interakcije u uvjetima pokusa izvlačenja. Na osnovi pregleda objavljenih simulacija u literaturi, numerički modeli pokusa izvlačenja geomreža/mrežastih armatura iz nekoherentnog zasipa se mogu klasificirati u četiri osnovne skupine:

- modeli pokusa s mrežastom armaturom/geomrežom kao zamjenskim elementom užeta jedinične širine ("geogrid" element)

- modeli pokusa s mrežastom armaturom/geomrežom koja se sastoji od uzdužnih rebara simuliranih elementom užeta jedinične širine i poprečnih rebara modeliranih kao grede stvarne debljine,
- modeli pokusa s mrežastom armaturom/geomrežom koja se sastoji samo od poprečnih rebara,
- modeli pokusa s trodimenzionalnom mrežastom armaturom/geomrežom.

Numerički modeli koji simuliraju otpor na izvlačenje poprečnih rebara ili uzdužnih i poprečnih rebara kao zasebnih cjelina, uspješno opisuju ponašanje uočeno pokusima [28, 37, 40, 88]. Navedeni numerički modeli mogu adekvatno opisati ovisnost sile i pomaka te time predvidjeti vrijednost ekvivalentnog trenja kontakta mrežaste armature/geomreže i zasipa koji se koristi pri konvencionalnim proračunskim dokazima unutarnje stabilnosti zidova od armiranog tla. Utjecaji pojedinih elemenata utvrđeni fizičkim pokusima koje navode Moraci i dr. [25] zapravo se ne razlikuju od trendova koje pokazuju numeričke analize iz ovog rada.

Numeričke simulacije provedene u sklopu ovog rada pokazuju da na rezultat pokusa izvlačenja najviše utječu:

- omjer visine zasipa iznad geomreže (H) i duljine mrežaste armature (mjereno od prednje stijenke – L_a),
- trenje zasipa i stijenki kutije (dominantno prednje, ali znatno i bočnih stijenki).

U radu je analiziran širok spektar geometrijskih konfiguracija mrežastih armatura i kutije. Na osnovi rezultata numeričkih analiza, sa svim ograničenjima koje one donose, dane su preporuke o provođenju pokusa izvlačenja. Konkretno, kutiju za izvlačenje mrežaste armature/geomreže iz zbijenih nekoherentnih materijala, radi eliminiranja utjecaja rubnih uvjeta na rezultat pokusa, treba oblikovati na sljedeći način:

- koristiti duljinu košuljice veću od 20,0 cm što je u skladu sa EN i ASTM normama
- koristiti male visine zasipa iznad mrežaste armature (H) u usporedbi s duljinom geomreže (L_a). Konkretno, omjer treba biti $L_a/H > 1,5$, uzimajući u obzir preporuke ASTM i EN normi vezane za potrebnu visinu kutije u funkciji veličine zrna zasipa
- mrežaste armature postavljati blizu bočnih stijenki, a prije ugradnje zasipa podmazati stijenske kutije radi smanjenja trenja na kontaktnoj površini sa zasipom (posebno prednja i bočne stijenske). Pravila pripreme stijenki kutije definirana su ASTM normom.

Ove preporuke o provođenju pokusa nastale su kao rezultat provedenih numeričkih analiza autora i za svojstva materijala i uvjete koji su u njima korišteni. Preporuke treba razmotriti i s obzirom na ograničenja koja numeričke analize donose, pa se ne mogu poopćavati. U svakom slučaju, prijedlozi poboljšanja provedbe pokusa moraju biti razmotreni i sa stajališta iskustava koja dolaze iz provedbe pokusa.

LITERATURA

- [1] Anderson, P.L., Gladstone, R.A., Withiam, J.L.: Coherent gravity: The correct design method for steel-reinforced MSE wall, Earth Retention Conference 3, pp. 512-521, 2010.
- [2] Choudhary, A.K., Krishna, A.M.: Experimental investigation of interface behaviour of different types of granular soil/geosynthetics, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2 (2016) 1, pp. 1-11.
- [3] Holtz, R.D.: 46th Terzaghi Lecture: Geosynthetic Reinforced Soil: From the Experimental to the Familiar, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143 (2017) 9, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001674](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001674)
- [4] Christopher, B.R., Gill, S.A., Giroud, J.P., Juran, I., Mitchell, J.K., Schlosser, F., Dunncliff, J.: Reinforced soil structures Volume I. Design and construction guidelines, No. FHWA-RD-89-043, 1 (1990).
- [5] Koerner, R.M.: Designing with Geosynthetics 4th Edition, Prentice Hall, pp. 761, 2008.
- [6] Ingold, T.S.: Laboratory pull-out testing of grid reinforcements in sand, ASTM geotechnical testing journal, 61 (1983) 3, pp. 101-111.
- [7] Ochiai, H., Hayashi, S., Otani, J., Umezaki, T., Ogisako, E.: Field pullout test of polymer grid in embankment, Proceedings of the International Interaction between soil and grid reinforcements, pp. 349, 1998.
- [8] Johnston, R.S., Romstad, K.M.: Dilation and boundary effects in large scale pull-out tests, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janeiro, Brasil, pp. 1263-1266, 1989.
- [9] Palmeria, E.M., Milligan, G.W.E.: Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand, Geotechnique, 39 (1989) 3, pp. 511-542.
- [10] Muthu, R.D.: Large scale pullout testing of geosynthetics, Master Thesis, 1991.
- [11] Ochiai, H., Hayashi, S., Otani, J., Hirai, T.: Evaluation of pull-out resistance of geogrid reinforced soils, Proceedings of Earth Reinforcement Practice, pp. 146, 1992.
- [12] Ochiai, H., Otani, J., Hayashic, S., Hirai, T.: The Pull-Out Resistance of Geogrids in Reinforced Soil, Geotextiles and Geomembranes, 14 (1996), pp. 19-42.
- [13] Farrag, K., Acar, Y.B., Juran, I.: Pull-out resistance of geogrid reinforcements, Geotextiles and Geomembranes, 12 (1993) 2, pp. 133-159.
- [14] Bergado, D.T., Lo, K.H., Chai, J.C., Shivashankar, R., Alfaro, M.C., Anderson, L.R.: Pullout tests using steel grid reinforcements with low-quality backfill, Journal of Geotechnical Engineering ASCE USA, 118 (1992) 7, pp. 1047-1063.
- [15] Bergado, D.T., Chai, J.C.: Pullout force/displacement relationship of extensible grid reinforcements, Geotextiles and geomembranes, 13 (1994) 5, pp. 295-316.

- [16] Alfaro, M.C., Miura, N., Bergado, D.T.: Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests, 1995.
- [17] Lopes, L.M., Ladeira, M.: Influence of Confinement, Soil Density and displacement rate on Soil-Geogrid interaction, *Geotextiles and Geomembranes*, 14 (1996), pp. 543-554.
- [18] Farrag, K., Morvant, M.: Effect of clamping mechanism on pullout and confined extension tests, *Grips, Clamps, Clamping Techniques, and Strain Measurement for Testing of Geosynthetics*, ASTM International, 2000.
- [19] Chang, D.T., Chang, F.C., Yang, G.S., Yan, C.Y.: The influence factors study for geogrid pullout test, *Grips, Clamps, Clamping Techniques, and Strain Measurement for Testing of Geosynthetics*, ASTM International, 2000.
- [20] Bolt, A.F., Duszynska, A.: Pull-out testing of geogrid reinforcements, 2nd European Conference on Geosynthetics, Bologna, Italy, 2000.
- [21] Sugimoto, M., Alagiyawanna, A.M.N., Kadoguchi, K.: Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 19 (2000) 5, pp. 257-277.
- [22] Perkins, S.W., Edens, M.Q.: Finite element modeling of a geosynthetic pullout test, *Geotechnical and Geological Engineering* 21 (2003), pp. 357-375.
- [23] Nejad, F.M., Small, J.C.: Pullout behaviour of geogrids, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 29 (2003) 3, pp. 301-310.
- [24] Alfaro, M.C., Pathak, Y.P.: Dilatant stresses at the interface of granular fills and geogrid strip reinforcements, *Geosynthetics International*, 12 (2005), pp. 239-252.
- [25] Moraci, N., Recalcati, P.: Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006), pp. 220-242.
- [26] Teixeira, S.H., Bueno, B.S., Zornberg, J.G.: Pullout resistance of individual longitudinal and transverse geogrid ribs, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133 (2007), pp. 37-50.
- [27] Abdel-Rahman, A.H., Ibrahim, M.A.M., Ashmawy, A.K.: Utilization of a Large-Scale Testing Apparatus in Investigating and Formulating the Soil/Geogrid Interface Characteristics in Reinforced Soils, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1 (2007) 4, pp. 415-430.
- [28] Khedkar, M.S., Mandal, J.N.: Pullout behaviour of cellular reinforcements, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009), pp. 262-271.
- [29] Liao, X., Ye, G., Xu, C.: Friction and Passive Resistance of Geogrid in Pullout Tests, *ASCE Advances in Ground Improvement: GSP*, 188 (2009), pp. 252-259.
- [30] Minažek, K.: Modelsko Ispitivanje interakcije geomreže i tla, *Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet*, 2010.
- [31] Fan, C.C., Hsieh, C.C.: The mechanical behaviour and design concerns for a hybrid reinforced earth embankment built in limited width adjacent to a slope, *Computers and Geotechnics*, 38 (2011) 2, pp. 233-247.
- [32] Dechasakulsom, M., Sukolrat, J., Sawangsuriya, A.: Behavior of a Trial Embankment with Reinforced Steep Slope and Mechanically Stabilized Earth Wall: A Numerical Analysis, *Proceedings of Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011.
- [33] Zhou, J., Chen, J.F., Xue, J.F., Wang J.Q.: Micro-mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs, *Geosynthetics International*, 19 (2012) 6.
- [34] Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Chai, J.C.: Pullout resistance of bearing reinforcement embedded in coarse-grained soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 36 (2013), pp. 44-54.
- [35] Minažek, K., Mulabdić, M.: Pregled ispitivanja interakcije tla i armature u armiranom tlu pokusom izvlačenja, *Građevinar*, 65 (2013), pp. 235-250.
- [36] Lajevardi, S.H., Dias, D., Racinais, J.: Analysis of soil-welded steel mesh reinforcement interface interaction by pull-out tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 40 (2013), pp. 48-57.
- [37] Abdi, M.R., Zandieh, A.R.: Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material, *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (2014) 5, pp. 494-504.
- [38] Jayawickrama, P.W., Lawson, W.D., Wood, T.A., Surles, J.G.: Pullout Behavior of Welded Grid Reinforcements Embedded in Coarse Granular Backfill, *Geo-Congress Technical Papers@ sGeo-characterization and Modeling for Sustainability*, pp. 2558-2567, 2014.
- [39] Alam, M.J.I.: Pull-out behaviour of steel grid soil reinforcement in silty sand, *Masters by Research Thesis*, 2012.
- [40] Alam, M.J.I., Lo, S.R., Karim, M.R.: Pull-out behaviour of steel grid soil reinforcement embedded in silty sand, *Computers and Geotechnics*, 56 (2014), pp. 216-226.
- [41] Touahmia, M.: Interaction mechanisms of soil-geosynthetic reinforcement, *International Journal of GEOMATE*, 7 (2014) 13, pp. 969-973.
- [42] Mosallanezhad, M., Bazyar, M.H., Saboor, M.H.: Novel strip-anchor for pull-out resistance in cohesionless soils, *Measurement*, 62 (2015), pp. 187-196.
- [43] Ferreira, J.A., Zornberg, J.G.: A transparent pullout testing device for 3D evaluation of soil-geogrid interaction, 2015.
- [44] Ferreira, F.B., Vieira, C.S., Lopes, M.L., Carlos, D.M.: Experimental investigation on the pullout behaviour of geosynthetics embedded in a granite residual soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20 (2016) 9, pp. 1147-1180.
- [45] Sadat Taghavi, S.H., Mosallanezhad, M.: Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems, *Canadian Geotechnical Journal*, 999 (2016), pp. 1-10.
- [46] Moraci, N., Cardile, G., Giofrè, D., Mandaglio, M.C., Calvarano, L.S., Carbone, L.: Soil geosynthetic interaction: design parameters from experimental and theoretical analysis, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1 (2014) 2, pp. 165-227.
- [47] Karpurapu, R., Bathurst, R.J.: Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining walls using the finite element method, *Computers and Geotechnics*, 17 (1995) 3, pp. 279-299.
- [48] Ho, S.K., Rowe, R.K.: Effect of wall geometry on the behaviour of reinforced soil walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 14 (1996) 10, pp. 521-541.
- [49] Carrubba, P., Moraci, N., Montanelli, F.: Instrumented soil reinforced retaining wall: analysis of measurements, *Geosynthetics' 99 Conference Proceedings*, pp. 921-934, 1999.
- [50] Hashimoto, H.: Finite element study of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall with concrete-block facing, *Geosynthetics International*, 7 (2000) 2, pp. 137.
- [51] Leshchinsky, D., Vulova, C.: Numerical investigation of the effects of geosynthetic spacing on failure mechanisms in mechanically stabilized earth block walls, *Geosynthetics International*, 8 (2001) 4, pp. 343-365.

- [52] Hatami, K., Bathurst, R.J.: Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions, *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2005) 4, pp. 1066-1085.
- [53] Stanić, B., Kovačević, M.S., Szavits-Nossan, V.: Assessment of deformations of a reinforced soil structure, *Proc. XIIIth European Conference on Soil Mechanics And Geotechnical Engineering*, pp. 887-892, 2000.
- [54] Guler, E., Hamderi, M., Demirkan, M.M.: Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills, *Geosynthetics International*, 14 (2007) 6, pp. 330-345.
- [55] Abioghli, H.: Effect of Changes of Mesh Size on the Numerical Analysis of Reinforced Soil Walls, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5 (2011) 12, pp. 1693-1696.
- [56] Liu, H.: Long-term lateral displacement of geosynthetic-reinforced soil segmental retaining walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012), pp. 18-27.
- [57] Skejic, A., Balic, A., Jasarevic, H., Namas, T., Selman, S., Karamehmedovic, E., Bucu, J.: Observation and Numerical Modeling of Test MSEW with Inextensible Inclusions and Coarse Crushed Stone Backfill, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18 (2013), pp. 2878-2892.
- [58] Damians, I.P., Bathurst, R.J., Josa, A., Lloret, A.: Numerical Analysis of an Instrumented Steel-Reinforced Soil Wall, *International Journal of Geomechanics*, (2014).
- [59] Yu, Y., Bathurst, R.J., Allen, T.M.: Numerical modelling of two full-scale reinforced soil wrapped-face walls, *Geotextiles and Geomembranes*, (2017).
- [60] Skejic, A., Medic, S., Dolarevic, S.: Influence of wire mesh characteristics on reinforced soil model wall failure mechanisms-physical and numerical modelling, *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (2018), pp. 726-738.
- [61] Ling, H.I., Leshchinsky, D., Tatsuoka, F.: *Reinforced soil engineering: advances in research and practice*, CRC Press, 2003.
- [62] Rowe, R.K., Skinner, G.D.: Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation, *Geotextiles and geomembranes*, 19 (2001) 7, pp. 387-412.
- [63] Holtz, R.D., Lee, W.F.: Internal stability analyses of geosynthetic reinforced retaining walls, No. WA-RD 532.1., Olympia, Washington, Washington State Department of Transportation, 2002.
- [64] Bergado, D.T., Youwai, S., Teerawattanasuk, C., Visudmedanukul, P.: The interaction mechanism and behavior of hexagonal wire mesh reinforced embankment with silty sand backfill on soft clay, *Computers and Geotechnics*, 30 (2003), pp. 517-534.
- [65] Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Horpibulsuk, S., Rujikiatkamjorn, C., Tanhsutthinon, T.: Numerical analysis of bearing reinforcement earth (BRE) wall, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012), pp. 28-37.
- [66] Palmeira, E.M.: The study of soil-reinforcement interaction by means of largescale laboratory tests, *Doctoral dissertation*, University of Oxford, 1987.
- [67] Montanelli, F., Recalcati, P.: Geogrid reinforced railways embankments: design concepts and experimental test results, *International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE Symposium Report*, 87 (2003) 6, pp.1-9.
- [68] Palmeira, E.M., Milligan, G.W.: Large scale direct shear tests on reinforced soil, *Soils and foundations*, 29 (1989) 1, pp. 18-30.
- [69] Lawson, W.D., Jayawickrama, P.W., Wood, T.A., Surles, J.G.: Pullout resistance factors for steel reinforcements used in TxDOT MSE walls, *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, pp. 44-53, 2013.
- [70] ASTM D6706 – 01: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil, *ASTM International*, 2007.
- [71] Technical Committee CEN/TC 189: EN 13738 Geotextiles and geotextile-related products - Determination of pullout resistance in soil, *European committee for standardization, Technical Committee CEN/TC 189, Brussels, Belgium*, 2004.
- [72] Merellec, P.: Reinforced Earth-earch/reinforcement bond, *Thesis*, 1977.
- [73] Chang, J.C., Hannon, J.B., Forsyth, R.A.: Pull resistance and interaction of earthwork reinforcement and soil, *Transportation Research Record*, pp. 640, 1977.
- [74] Alimi, I., Bacot, J., Lareal, P., Sschlosser, F., Long, N.: In-situ and laboratory study of the adhesion between soil and reinforcement, *Bull Liaison lab ponts chauss, Spec. VI-E*, 1978.
- [75] Dyer, M.R.: Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement, *Doctoral dissertation*, University of Oxford, 1985.
- [76] Bauer, G.E., Mowafy, Y.M.: The interaction mechanism of granular soils with geogrids, *International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, 6. Innsbruck Proceedings, Innsbruck, Swoboda, Balkema, Rotterdam, 2 (1988), pp. 1263-1272.
- [77] Sugimoto, M., Alagiyawanna, A.M.N.: Pullout Behavior of Geogrid by Test and Numerical Analysis, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE*, 4 (2003), pp. 361-371.
- [78] Jewell R.A., Miligan G.W.E., Sarsby R.W., Dubois D.: Interaction between soil and geogrids, *Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering*, London, Thomas Telford, pp. 19-29, 1984.
- [79] Yogarajah, I., Yeo, K.C.: Finite element modelling of pull-out tests with load and strain measurements. *Geotextiles and Geomembranes*, 13 (1994) 1, pp. 43-54., [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90056-6)
- [80] Wilson-Fahmy, Koerner R.: Finite Element Modelling of Soil-Geogrid Interaction with Application to the Behavior of Geogrids in a Pullout Loading Condition, *Geotextiles and Geomembranes*, 12 (1993), pp. 479-501.
- [81] Alobaidi, I. A., Hoare, D.J., Ghataora, G.S.: Load transfer mechanism in pull-out tests, *Geosynthetics International*, 4 (1997) 5, pp. 509-521.
- [82] Marques, J.M.M.C.: Finite element modelling of the pull-out test of geosynthetics, *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005.
- [83] Palmeira, E.M.: Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids, *Geotextiles and geomembranes*, 22 (2004), pp. 481-509.
- [84] Palmeira, E.M.: Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis, *Geotextiles and geomembranes*, 27 (2009), pp. 368-390.
- [85] Yu, Y., Bathurst, R.J.: Influence of Selection of Soil and Interface Properties on Numerical Results of Two Soil-Geosynthetic Interaction Problems, *International Journal of Geomechanics*, (2006), 04016136.
- [86] Shuwang, Y., Shouzhong, F., Barr, B.: Finite-element modelling of soil-geogrid interaction dealing with the pullout behaviour of geogrids, *Acta Mechanica Sinica*, 14 (1998) 4, pp. 371-382.

- [87] Teerawattanasuk, C., Bergado, D.T., Kongkitkul, W.: Analytical and numerical modeling of pullout capacity and interaction between hexagonal wire mesh and silty sand backfill under an in-soil pullout test, *Canadian Geotechnical Journal*, 40 (2003), pp. 886 – 899.
- [88] Palmeira, E., Dias, A.C.: Numerical Analysis of Soil-Reinforcement Interaction, The First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancun, Mexico, 2008.
- [89] Rouse, P., Fannin, R.J., Taiebat, M.: Sand strength for back-analysis of pull-out tests at large displacement, *Géotechnique*, 64 (2014), pp. 320.
- [90] Mosallanezhad, M., Taghavi, S.H., Hataf, N., Alfaro, M.C.: Experimental and numerical studies if the performance of the new reinforcement system under pull-out conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (2016), pp. 70–80.
- [91] Dafalias, Y.F., Hermann, L.R.: Bounding surface plasticity. II: Application to isotropic cohesive soils, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 112 (1986) 12, pp. 1263–1291.
- [92] Bjerrum, L., Kringstad, S., Kummeneje, O.: The shear strength of a fine sand, 1961.
- [93] Skejić, A.: Numeričko modeliranje utjecaja interakcije armature i nekoherentnog zasipa u proračunu stabilnosti zidova od armiranog tla, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2017., pp. 374.
- [94] Brinkgreve, R.B.J.: PLAXIS - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses: Users Manual – Version 8, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2002.
- [95] Itasca, F.L.A.C.: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0 User's Guide, Itasca Consulting Group. Inc., Thrasher Square East, pp. 708, 2002.
- [96] Hussein, M.G., Meguid, M.A.: Three-dimensional finite element analysis of soil-geogrid interaction under pull-out loading condition, *GeoMontreal*, 66th Canadian Geotechnical Conference, Canadian Geotechnical Society, Montreal, Quebec, Canada, pp. 452–458, 2013.
- [97] ABAQUS: ABAQUS User's Manuals, Version 6.13., Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2013.
- [98] Wang, Z., Jacobs, F., Ziegler, M.: Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC 2D., *Geotextiles and Geomembranes*, 42 (2014) 2, pp. 83–90.
- [99] Tran, V.D.H., Meguid, M.A., Chouinard, L.E.: A finite–discrete element framework for the 3D modeling of geogrid–soil interaction under pullout loading conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 37 (2013), pp. 1–9.
- [100] Chen, C., McDowell, G.R., Thom, N.H.: Investigating geogrid-reinforced ballast: Experimental pull-out tests and discrete element modelling, *Soils and Foundations*, 54 (2014) 1, pp. 1–11.
- [101] Bathurst, R.J., Ezzein, F.M.: Geogrid pull out load–strain behaviour and modelling using a transparent granular soil, *Geosynthetics International*, (2016), pp. 1–16.
- [102] McDowell, G.R., Harireche, O., Konietzky, H., Brown, S.F., Thom, N.H.: Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 159 (2006) 1, pp. 35–48.
- [103] Wang, Z., Jacobs, F., Ziegler, M.: Experimental and DEM investigation of geogrid–soil interaction under pullout loads, *Geotextiles and Geomembranes*, 44 (2016) 3, pp. 230–246.
- [104] Miao, C.X., Zheng, J.J., Zhang, R.J., Cui, L.: DEM modelling of pull out behaviour of geogrid reinforced ballast: The effect of particle shape, *Computers and Geotechnics*, 81 (2017), pp. 249–261.
- [105] Chen, W.B., Zhou, W.H., Jing, X.Y.: Modelling Geogrid Pull out Behaviour in Sand Using Discrete-Element Method and Effect of Tensile Stiffness, *International Journal of Geomechanics*, 19 (2019) 5, 04019039 (1–13).
- [106] Jaky, J.: The coefficient of earth pressure at rest, *Journal of the Hungarian Society of Architects and Engineers*, 25 (1944), pp. 355–358.