

Pregled ispitivanja interakcije tla i armature u armiranom tlu pokusom izvlačenja

Minažek, Krunoslav; Mulabdić, Mensur

Source / Izvornik: **Građevinar**, 2013, 65, 235 - 250

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:133:282686>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)




DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primljen / Received: 31.5.2012.

Ispravljen / Corrected: 30.3.2013.

Prihvaćen / Accepted: 1.4.2013.

Dostupno online / Available online: 10.4.2013.

Pregled ispitivanja interakcije tla i armature u armiranom tlu pokusom izvlačenja

Autori:



Dr.sc. **Krunoslav Minažek** dipl.ing.građ.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
krumin@gfos.hr



Prof.dr.sc. **Mensur Mulabdić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
mulabdic@gfos.hr

Pregledni rad

Krunoslav Minažek, Mensur Mulabdić

Pregled ispitivanja interakcije tla i armature u armiranom tlu pokusom izvlačenja

U radu su opisana dosadašnja dostignuća o modelskim istraživanjima armiranog tla pokusom izvlačenja armature iz tla. Ispitivanje izvlačenjem, vrlo značajno za karakterizaciju interakcije tla i armature, opisano je kroz pregled istraživanja koja su pridonijela spoznajama o interakciji i razvoju tehnike ispitivanja. Opisan je utjecaj rubnih uvjeta i drugih faktora na rezultate ispitivanja u pokusu izvlačenja. Prikazan je veliki uređaj za izvlačenje razvijen na Građevinskom fakultetu u Osijeku.

Ključne riječi:

interakcija, armirano tlo, geosintetici, geomreže, modelsko ispitivanje, pokus izvlačenja armature

Subject review

Krunoslav Minažek, Mensur Mulabdić

A review of soil and reinforcement interaction testing in reinforced soil by pullout test

A review of current knowledge on model studies of reinforced soil by pullout test is described in the paper. The pullout test, highly significant in soil-reinforcement characterisation, is described through a review of studies that have contributed to the characterisation of soil-grid interaction and development of testing techniques. The influence of test boundary conditions and other factors on pullout test results is described. The pullout testing apparatus developed at the Faculty of Civil Engineering in Osijek is presented.

Key words:

interaction, reinforced soil, geosynthetics, geogrids, model test, pullout test

Übersichtsarbeit

Krunoslav Minažek, Mensur Mulabdić

Übersicht der Tests zur Boden-Bewehrung-Interaktion in bewehrten Böden durch Pullout-Versuche

In dieser Arbeit werden vorhandene Kenntnisse bezüglich verschiedener Modellstudien an armierten Erdböden durch Ziehproben der Bewehrungen aus dem Boden beschrieben. Untersuchungen durch Pullout-Versuche, bedeutend für die Charakterisierung der Wechselwirkungen zwischen Boden und Bewehrung, sind durch eine Übersicht der Forschungen, die zu Einsichten in Bezug auf die Interaktion und die Entwicklung der Prüftechniken beigetragen haben, beschrieben. Der Einfluss von Randbedingungen und anderen Faktoren auf die Testresultate ist ebenfalls dargestellt. Ein Testgerät, das an der Fakultät für Bauwesen in Osijek entwickelt wurde, wird beschrieben.

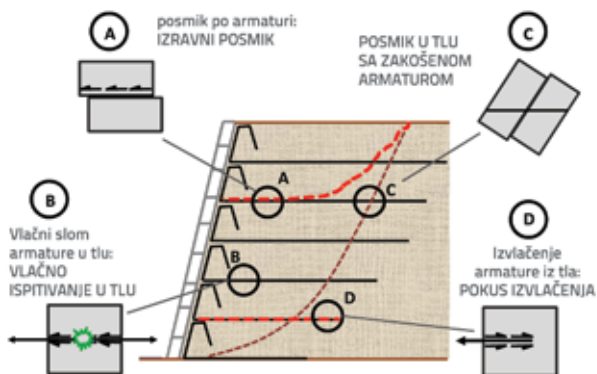
Schlüsselwörter:

Interaktion, bewehrter Boden, geosynthetische Stoffe, Geo-Netze, Modelluntersuchungen, Pullout-Versuche

1. Uvod

Armirano tlo može se definirati kao kompozit tla i geosintetičke armature, najčešće geotekstila ili geomreže, ponekad polimernih ili metalnih traka ili rjeđe metalnih mreža. Tehnikom armiranja tla mogu se izvesti potporni zidovi, strmi pokosi nasipa, stabilizirati nestabilne kosine, poboljšati temeljno tlo te ojačati nosivi slojevi prometnica. Povećanjem primjene geosintetika pojavila su se pitanja o mehanizmima djelovanja između tla i geosintetika kao armature te učinkovitosti i ekonomičnosti primjene različitih tipova geosintetika za različite uvjete u tlu. To je potaklo razvoj istraživanja mehanizama interakcije tla i armature kroz razvoj teorijskih i numeričkih modela, modelskih ispitivanja te ispitivanja na konstrukcijama.

Za svaki od mogućih mehanizama unutarnjeg sloma u nasipu od armiranog tla (slika 1) armatura s tlom ostvaruje interakciju na različite načine. Ovisno o mehanizmu sloma razvijeni su različiti modelski postupci ispitivanja interakcije tla i armature [1]. Smicanje u ravnini kontakta tla i armature u području A može se ispitivati pokusom koji je koncipiran kao pokus izravnog posmika. U području B, tlo i armatura pomiču se lateralno tako da bi prikladno ispitivanje za ovakav mehanizam bilo vlačno ispitivanje armature u tlu. Ispitivanja izravnim posmikom s nagnutom armaturom u odnosu na plohu smicanja predstavljaju simulaciju mehanizma interakcije koja se javlja u području C. Ispitivanja izvlačenjem reproduciraju mehanizam kakav se pojavljuje u području D gdje dolazi do izvlačenja armature iz tla.



Slika 1. Presjek nasipa/zida od armiranog tla s mehanizmima sloma te postupci ispitivanja koji odgovaraju određenom mehanizmu sloma, [1]

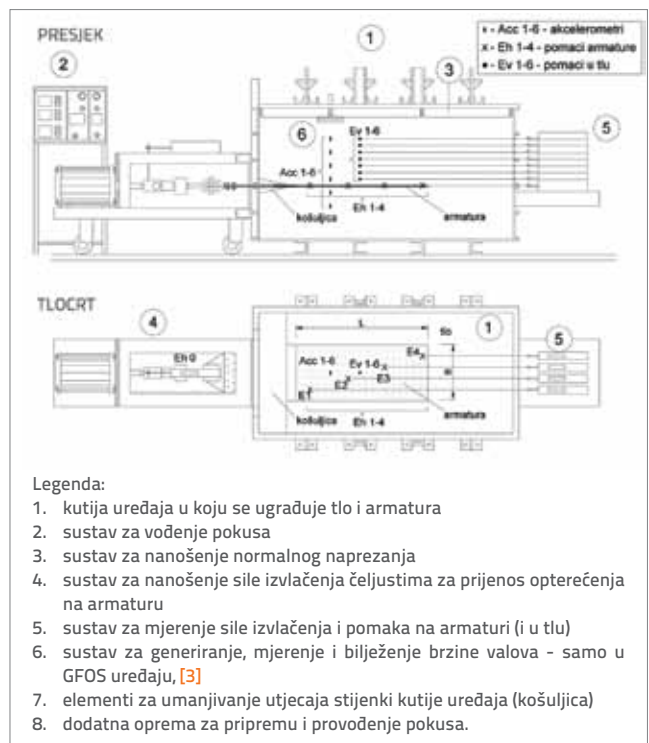
Ispitivanja interakcije tla i armature koja su se ustalila kao najčešća u istraživačkoj praksi je modelska ispitivanja izvlačenjem i izravnim posmikom. Ona se razlikuju u načinu nanošenja sile i rubnim uvjetima što dovodi do različite raspodjele naprezanja koja se razvijaju u armaturi i tlu i rezultira različitim mehanizmima sloma [2]. Ispitivanje izvlačenjem razvijano je proteklih tridesetak godina. Pomoću njega dobivaju se parametri koji su potrebni za određivanje

duljine sidrenja armature, a pokazalo se važnim u objašnjenju mehanizama interakcije između različitih tipova tla i armature. Modelski pokus izvlačenja armature iz tla u istraživanju interakcije tla i armature važan je zato jer se pomoću njega razjasni mehanizmi interakcije tla i armature, uspostaviti kriteriji za odabir materijala u konstrukcijama armiranog tla i omogućiti primjena rezultata ispitivanja u dobivanju konkretnih parametara koji se mogu koristiti pri projektiranju konstrukcija od armiranog tla.

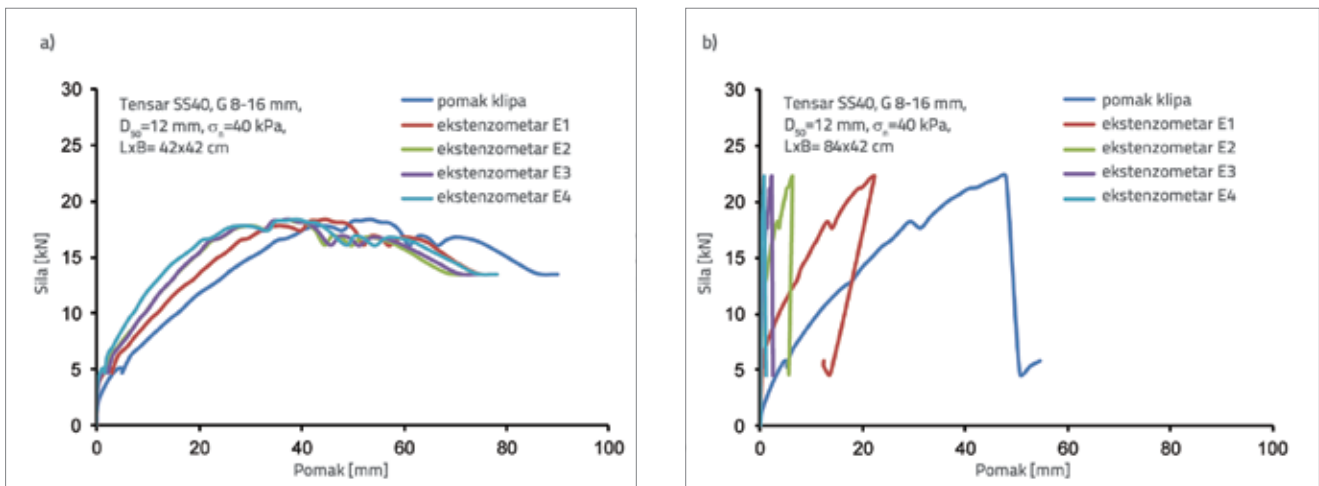
2. Opis modelskog pokusa izvlačenja armature iz tla

U modelskom pokusu izvlačenja armature iz tla u metalnu kutiju uređaja za izvlačenje, između dva sloja tla, ugrađuje se armatura (duljine L i širine B). Određuje se sila potrebna za izvlačenje te pomaci koji se javljaju po duljini armature pri izvlačenju. Na slici 3. prikazani su uobičajeni rezultati pokusa izvlačenja. Na četiri mjerne točke raspoređene po dužini uzorka armature (E1, E2, E3, E4, tlocrt sa slike 2.) prikazan je razvoj pomaka pri porastu sile izvlačenja. Kod velikih vrijednosti normalnih napreznja i/ili velike duljine armature, umjesto izvlačenja može nastupiti slom armature uslijed prekoračenja njene vlačne čvrstoće (slika 3.b).

Izvlačenje se provodi kontroliranim prirastom pomaka ili sile uz odgovarajuće normalno napreznje (do 200 kPa u ravnini armature, ostvareno najčešće pomoću zračnih jastuka ugrađenih ispod poklopca kutije uređaja za izvlačenje).



Slika 2. Presjek i tlocrt velikog uređaja za izvlačenje (GFOS uređaj za izvlačenje [3])



Slika 3. Razvoj sile izvlačenja i pomaka pri: a) izvlačenju, b) vlačnom slomu armature [3]

Ako je trenje dominantan mehanizam koji se događa pri izvlačenju armature, izraz (1) za otpor izvlačenju za nekoherentno tlo, prema [4] glasi:

$$P = 2 \cdot A \cdot \sigma_n \cdot C_i \cdot \tan \phi \quad (1)$$

gdje je:

P – sila izvlačenja

A – površina armature

σ_n – normalno naprezanje na ravnini uzorka armature

ϕ – kut trenja tla

C_i – koeficijent interakcije (vidi osvrt dalje u tekstu).

2.1. Utjecaj rubnih uvjeta i načina provedbe pokusa

Modelsko ispitivanje armiranog tla pokusom izvlačenja armature osjetljivo je na utjecaj rubnih uvjeta uređaja, način formiranja uzoraka kao i na sam način provedbe ispitivanja. Velik rasap rezultata iz objavljenih radova upravo je posljedica korištenja različite opreme s različitim rubnim uvjetima, načina ugradnje armature i zbijanja tla kao i načina provedbe pokusa, te ih je teško međusobno uspoređivati [5]. Ovi utjecaji bili su predmet brojnih istraživanja, a prema [1, 2, 6, 7] ocijenjeno je da su najznačajniji: rubni uvjeti na prednjoj stijenci kutije uređaja za izvlačenje i sustav čeljusti za prihvat uzorka armature, rubni uvjeti na gornjoj stijenci, trenje na bočnim stijenama (što ovisi i o dimenzijama kutije uređaja za izvlačenje i dimenzijama armature) te način nanošenja sile izvlačenja. Na rezultate ispitivanja značajno utječe način ugradnje i tehnika zbijanja tla, normalna naprezanja i dimenzije armature.

Pokazano je [1] da uvjeti prednje stijenske kutije uređaja za izvlačenje mogu imati značajan utjecaj na rezultate ispitivanja. Kruta gornja i donja stijenka utječu na prijenos opterećenja te mogu utjecati na povećanje sile koja je potrebna za izvlačenje armature iz tla. Da bi se to izbjeglo, debljina tla oko armature treba biti veća od 30 cm, a vertikalno

opterećenje najbolje je nanositi zračnim jastukom [6]. Čeljusti za prihvat armature trebaju smanjiti koncentraciju naprezanja te osigurati jednoliku raspodjelu naprezanja po širini armature, osigurati konstantnu kontaktnu površinu tla i armature kroz cijelo vrijeme ispitivanja, a mogu biti ili izvan kutije uređaja ili unutar nje [8]. Širina armature i udaljenost od bočnih stijenki važna je zbog mogućnosti pojave trenja uz bočne stijenke [7]. Preporučuje se minimalna udaljenost stijenske kutije i armature otprilike 15 cm [6]. Utjecaj trenja smanjuje se lijepljenjem materijala niskog trenja (teflon, glatki aluminij, staklo, podmazane gumene membrane) na bočne stijenke [8]. Prema ASTM normi [9], širina kutije treba biti najmanje 460 mm i veća od $20x D_{95}$ ili $6x D_{max}$ ispitivanog uzorka tla. Duljina kutije treba biti najmanje 610 mm i pet puta veća od maksimalne veličine otvora geomreže [7].

Dva su načina izvlačenja armature iz tla: kontroliranim prirastom pomaka ili sile (kontinuirani ili inkrementalni porast sile). Pri izvlačenju kontroliranim prirastom pomaka, brzine izvlačenja su od 0,1 mm/min [10] do 10 mm/min [11], a kod većine ispitivanja iznosi 1 mm/min. Farrag [6] pokazuje da brzine ispod 6 mm/min daju slične rezultate. Norme propisuju brzinu pomaka od 1 do 2 mm/min. U ispitivanju s kontroliranim prirastom sile, prema normi ASTM [9] porast sile ne smije biti veći od 2 kN/m/min. Kod inkrementalnog povećanja sile, inkrementi mogu biti jednaki ili se udvostručavati, a zadržavaju se određeno vrijeme prije dodavanja sljedećeg inkrementa.

Jednolika zbijenost tla u kutiji uređaja za izvlačenje je vrlo važna jer je bez jednolike zbijenosti teško postići ponovljivost pokusa, a o zbijenosti tla ovisi vrijednost sile izvlačenja. Kako bi se postiglo jednoliko razastiranje tla, predlaže se upotreba sita s lijevkom i fleksibilnom cijevi [2]. Zbijanje tla izvodi se električnim vibronabijačima, standardnim batom za Proctorov pokus, ručnim ili mehaničkim nabijačima. Povećanje zbijenosti i gustoće tla povećava mogućnost uklještenja čestica tla u otvore mreže čime se povećava otpor izvlačenju [6]. Veća zbijenost pri istim uvjetima ispitivanja može uzrokovati vlačni slom armature [12].

Tablica 1. Uređaji za ispitivanje izvlačenjem armature

Autor, godina, ref.	Dimenzije L/B/H (m)	Nanošenje sile izvlačenja, uz prirast D – deformacije (mm/min), N – naprezanja (opis)	Košuljica: postoji (da/ne, opis, širina (CM)) / čeljusti (opis)	Debljina tla ispod/iznad armature (cm)	Osjetila za pomak i silu	Zbijanje i kontrola gustoće
Chang et al., 1977., [19]	1.30, 0.91, 0.51	D	-	-	-	mehaničko zbijanje
Yuan and Chua, 1985., [2]	0.76, 0.71, 0.61	D (hidraulički)	-	30/30	osjetilo za silu, mikrourice	-
Palmeira and Milligan, 1989., [2]	0.25, 0.15, 0.15 1.1, 1.1, 1.1	D (0,5 mm/min, hidraulički)	na (samo otvor na kutiji) // čeljusti (pričvršćene vijcima i aluminijskom legurom za uzorak armature)	-	fotomjerenje izvlačenja žice iz kutije, 8 osjetila za tlak prednje stijenke, LVDT – klip, osjetilo za silu	pluvijacija, vibronabijač, cilindri u kutiji
Farrag et al., 1991., [6]	1.52, 0.90, 0.76	D, N (max 6 mm/min, hidraulički)	da (širina 30 cm) // čeljusti (ploče koje ulaze unutar košuljice i tla)	Min. 30/30	LVDT, osjetila za mjerenje brzine i čelije za silu, osjetilo za tlak na prednjoj stijenci	pluvijacija, mehaničko zbijanje, nuklearni denzimetar
Marolo, 1993., [21]	1.60, 0.70, 0.50	D (1 mm/min)	da (širina 20 cm) // čeljusti (ploče koje ulaze unutar košuljice)	25/15	LVDT, čelije za opterećenje	-
Fannin and Raju, 1993., [22]	1.30, 0.64, 0.60	D	ne // čeljusti (postoji gornja i donja čeljust)	-	osjetilo za silu i 2 za pomak, piezometri, 5 ekstenziometara	-
Kharchafi, Dysli, 1993., [23]	-	-	-	-	x-ray snimanje	-
Bergado et al. (1994), [14]	1.30, 0.80, 0.50	D (1 mm/min, hidraulički)	-	-	osjetilo za silu, LVDT	-
Koerner et al., 1994., [4]	1.90, 0.91, 1.1	D, N (1 mm/min, hidraulički)	da // čeljusti (ne)	Min. 30/30	osjetila za pomak i silu	-
Min et al., 1995., [24]	0.6, 0.6, 0.2	N (hidraulički, električki, cikličko opterećenje, prirast sile – inkrementi svakih 24 h)	na // čeljusti (na limove prilipljena mreža, ulaze 10 cm u kutiju)	-	čelije za silu, LVDT naprijed, 4 ekst. na mreži	pluvijacija
Alfaro et al., 1995., [25]	1.60, 0.50, 0.60	D	da // čeljusti (unutar kutije)	25/15	osjetilo za silu, LVDT	mehaničko zbranje, vaganje
Lopes and Ladeira, 1996., [26]	1.53, 0.80, 1.00	D (hidraulički)	ne ili da (širina 20 cm) // čeljusti (postoje)	30/30	osjetilo za silu, LVDT, osjetilo za vert. tlak, na mreži LVDT	nuklearni denzimetar
Ochiai et al., 1996., [13]	0.6, 0.4, 0.4	D (1 mm/min, reduktor, ciklički)	da // -	-	osjetilo za silu, mikrourice	pluvijacija
Bernal, 1997., [27]	1.22, 0.50, 1.22	D (1 mm/min, 2 hidraulička cilindra)	da (širina 15 cm) // čeljusti (uzorak armature u smoli, vijcima pričvršćen za dvije ploče)	20,5/20,5	osjetilo za silu, LVDT, 3 mj. pomaka na uzorku, osjetilo za tot tlak na dnu kutije	ručno zbijanje, vaganje
Cuelho, 1998., [28]	1.25, 1.10, 0.90	D, N (0-2 mm/min, električno-reduktor, 2 zračna cilindra)	da (širina 26 cm) // čeljusti (limovi na koje je prilipljen uzorak)	-	čelija za silu, ekstenzometri (5), lijepljeni deformetri	mehaničko zbijanje
Texeira, 1999., [28]	1.50, 0.48, 0.70	D (4,6 mm/min, električno, reduktor)	da (širina 20 cm) // čeljusti (pričvršćene vijcima za uzorak, prolaze kroz košuljicu)	-	osjetilo za silu, 3 osjetila za tot tlak, 6 ekst. po duljini uzorka, deformetri	vibronabijač, vaganje
Alagy awanna et al., 2001., [29]	0.68, 0.625, 0.3	D (1 mm/min)	ne, spužva da ne ispada tlo, // -	-	osjetilo za pomak, laserska osjetila za pomake mreže, osjetilo za silu vertikalno i horizontalno	-
Bergado, Teeraw attanasuk, 2001., [30]	1.27, 0.76, 0.51	D (1 mm/min, hidraulički)	-	-	-	-
Meyer et al., 2003., [31]	1.5, 0.7, 0.6	D (2 mm/min, hidraulički, cikličko opterećenje do 4 Hz)	da (širina 20 cm) // čeljusti (armatura se namata ili provlači s dvije šipke)	-	na dnu 3 čelije za silu, LVDT	pluvijacija, vaganje
Marques, 2005., [32]	1.53, 1.0, 0.80	(hidraulički)	da (širina 20 cm) // -	40/-	različiti mjerni instrumenti	-
Moraci et al., 2006., [33]	1.70, 0.60, 0.68	(električno)	da (širina 25 cm) // čeljusti (unutar tla)	-	RVDT (6 na uzorku mreže), osjetilo na silu	pluvijacija
Abdelrahman et al., 2007., [34]	1.20, 1.16, 0.7	(hidraulički, ručno)	ne // čeljusti (dvije čelične ploče debljine 6 mm)	-	2 osjetila: 1 vert., 1 hor., 2 LVDTa na uzorku	vaganje, bezrazorne metode
Aydogmus, 2007., [18]	0.6, 0.5, 0.2	D (0,00001-12 mm/min)	ne // čeljusti (izvan kutije)	Cca 10/10	mjerenje sile, tlaka na dnu kutije i u zračnim jastucima	mehanički, vaganje tla mjeracima na dnu kutije
Abdelouhab et al. 2008., [35]	2.0, 1.1, 1.1	-	-	-	osjetilo za silu i totalni tlak (donja i prednja stijenka)	-
Zahtjevi iz EN 13738, 2004., [17]	1.50, 0.60, 0.30	D, N (2 ± 0.2 mm/min, hidraulički)	da (širina 20 cm), čeljust (zglobno povezivanje)	$6 \times d_{max} / 6 \times d_{min}$	LVDT, čelije za opterećenje	mehaničko zbijanje
Zahtjevi iz GRI GT6, 1991., [16]	1.20, 0.75, 0.60 ili >20 x d _{as}	D (1 mm/min)	da (širina 15 cm) // čeljusti (2 ploče širine 20 cm)	Min. 30 cm	LVDT, mjerni prsten, čelije za opterećenje	kišenje, mehanički

2.2. Postojeći uređaji za ispitivanje izvlačenjem

Brojni su istraživači diljem svijeta u proteklih tridesetak godina razvijali uređaje za izvlačenje armature iz tla. U literaturi se pronalazi više od 30 takvih uređaja, a prikaz uređaja s obzirom na dimenzije i tehničke mogućnosti ispitivanja dan je u tablici 1. Radi se o uređajima za izvlačenje s malim (npr. $L \times B \times H = 0,25 \times 0,15 \times 0,15$ m, [2]), srednjim (npr. $L \times B \times H = 0,6 \times 0,4 \times 0,4$ m, [13]) i velikim kutijama (npr. $L \times B \times H = 1,3 \times 0,8 \times 0,5$ m, [14]) u koje se ugrađuje tlo i armatura (L, B i H=duljina, širina i visina kutije). Najviše je velikih uređaja za izvlačenje, kod kojih volumen kutije iznosi 1-2 m³. Dimenzije velikih uređaja za izvlačenje su: dužina od 1 do 2 m (prosječno 1,5 m), širina od 0,5 do 1,2 m (prosječno 0,8 m) i visina od 0,4 do 1,1 m (prosječno 0,7 m). Kod velikih uređaja za izvlačenje veliki su troškovi provedbe ispitivanja, a postupak ugradnje i razgradnje tla je dugotrajan i zahtjevan (ugradnja i zbijanje tla izvodi se u slojevima debljine 5-10 cm uz postizanje jednolike zbijenosti po cijelom volumenu što može trajati 1-2 dana). Velik je broj istraživanja proveden koristeći pijesak kao ispunu, iako su za inženjersku primjenu pogodnija tla većih zrna (npr. šljunak) jer se češće koriste konstrukcijama armiranog tla. Kod upotrebe tla većih zrna ispitivanje je potrebno provoditi u velikom uređaju za izvlačenje, što naglašava njegovo značenje [15]. Za ispitivanja izvlačenjem razvijene su norme: ASTM D6706-01 [9], GRI Test Method GG5 [16] te EN 13738 [17] - zahtjevi na ispitivanje iz normi prikazani su na dnu tablice 1. U posljednje vrijeme razvijaju se univerzalni uređaji za ispitivanje interakcije tla i armature koji omogućuju više tipova ispitivanja: izravn posmik, izvlačenje i vlačno ispitivanje armature [18].

2.3. Veliki uređaji za izvlačenje, tip GFOS

Na Građevinskom fakultetu u Osijeku razvijen je veliki uređaj za izvlačenje (tlocrt i presjek uređaja prikazani su na slici 2, a izgled na slici 4.). Veličina kutije uređaja je $L \times B \times H = 1,9 \times 0,9 \times 1,2$ m, čime se svrstava u red većih uređaja za izvlačenje. Normalna naprezanja nanose se pomoću zračnih jastuka postavljenih unutar poklopca uređaja (slika 5.a). Utjecaj prednje stijenke umanjuje se košuljicom širine 30 cm na prednjoj strani (slika 5.b).

Izvlačenje armature koja je ugrađena u tlo u horizontalnoj ravnini u polovici visine kutije postiže se elektromotorom i reduktorom. Tlo se ugrađuje u kutiju u slojevima debljine 5 cm i zbija ručnim ili vibro- nabijačem. Ispitivanja se provode kontroliranom brzinom pomaka od 2 mm/min, a sila izvlačenja (max 80 kN) mjeri se osjetilom za silu. Pomaci armature mjere se ekstenzometrima: na cilindru za izvlačenje i četiri točke na armaturi (oznake E1-E4, slika 2.). Osim pomaka armature, moguće je mjeriti i pomake u tlu iznad armature kako bi se detektirala visina zone utjecaja armature na tlo (oznake Ev1-6, slika 2.). Novost u koncepciji

mjerenja je sustav mjerenja brzine tlačnih i posmičnih valova akcelerometrima po visini tla, ispod i iznad ravnine armature, čime se dobiva raspodjela brzina tih valova u tlu, a time se indirektno može odrediti i promjena krutosti tla po visini kao posljedica interakcije tla i armature. Ovaj uređaj omogućuje ispitivanje tla s velikim zrnima (do sada provedena ispitivanja na tlima s $D_{\max} = 32$ mm).



Slika 4. Veliki uređaj za izvlačenje, tip GFOS



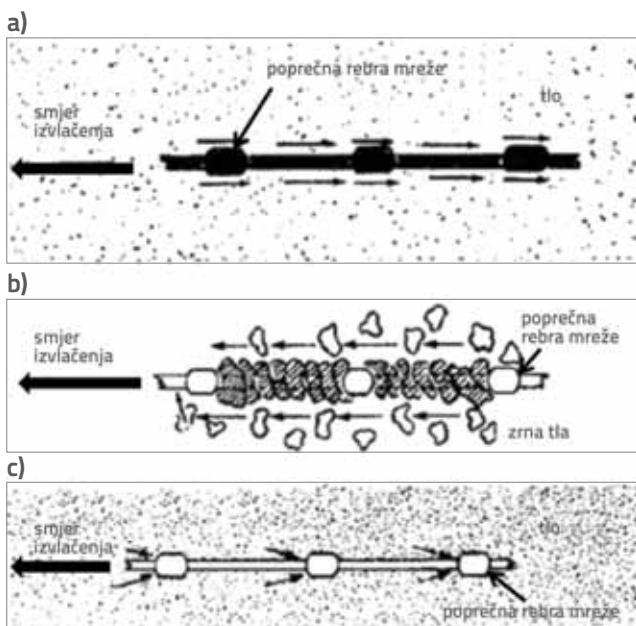
Slika 5. Uređaj za izvlačenje GFOS: a) Poklopac sa zračnim jastukom; b) košuljica za smanjenje utjecaja prednje stijenke

3. Analiza modelskog pokusa izvlačenja armature iz tla

3.1. Mehanizmi interakcije pri izvlačenju armature iz tla

Istraživanja mehanizama interakcije tla i armature pri izvlačenju započela su proučavanjem izvlačenja geotekstila iz pjeskovitog tla gdje je utvrđeno da je trenje dominantno u pružanju otpora izvlačenju. Kod geomreža, koje danas prevladavaju u konstrukcijama armiranog tla, osim trenja djeluju i drugi mehanizmi koji proizlaze iz postojanja uzdužnih i poprečnih rebara, čvorova te otvora na mreži. Mehanizmi interakcije pri izvlačenju geomreže iz tla mogu biti (slika 6.):

- trenje čestica tla po armaturi (sličan mehanizam kao kod geotekstila),
- trenje čestica tla po tlu uklještenom u otvore mreže,
- pasivni otpor tla na poprečna rebra mreže [36].



Slika 6. Mehanički interakcijski mehanizmi tla i geomreže: a) trenje na kontaktu s mrežom; b) trenje po česticama tla uklještenog u otvore mreže; c) djelovanje pasivnog otpora tla na poprečna rebra mreže [36]

Slika 7. pokazuje utjecaj različitih mehanizama interakcije tlo-armatura ovisno o tipu armature [6]. Kod mrežaste armature pri malim deformacijama javlja se posmik na kontaktu s tlom, a kako se pomak povećava razvija se pasivni otpor na poprečna rebra mreže [37].

Glavni fenomen	3-D trake	2-D Mreže, žičana, od šipki	2-D geomreže	1-D geotekstil tkani	1-D geotekstil netkani	1-D geomembrane
Uklještenje		? Veličina zrna/ veličina otvora	? Veličina zrna/ veličina otvora	▲ 40-20%	▲ 40-20%	
Pasivni otpor		■	■ 80%			
Trenje	■	▲ 20%	▲ 20%	■ 60-80%	■ 60-80%	■
Ograničena dilatacija	■	□	□	△	△	
Kombinirano: trenje + izduženje			△ Pomak	△ Pomak	△ Pomak	△

■ Vrlo važno □ Važno ▲ Neko djelovanje △ Malo djelovanje

Slika 7. Mehanički interakcijski mehanizmi tla i geosintetika [6]

Pomoću ispitivanja izvlačenjem utvrđeno je da ovisno o tipu armature i vrsti (i veličini) čestica tla dodatni otpor izvlačenju može nastati zbog spriječene mogućnosti dilatacije tla [6]. Kod povoljnog odnosa veličine zrna tla i geometrijskih karakteristika geomreže (veličine otvora, oblika i debljine rebara) pojavljuje se uklještenje zrna tla u otvorima mreže

(eng. "interlocking"), što povećava krutost tla [38, 39, 40, 41] i povećava otpor izvlačenju.

Stajalište je autora ovog rada, a što je u skladu sa zaključcima Girouda [42], da se interakcija geomreže i tla može promatrati na osnovi: a) povećanja krutosti tla u okolini geomreže koje nastaje kao posljedica uklještenja zrna tla u otvore geomreže i b) otpora izvlačenja kao posljedici djelovanja trenja i pasivnog otpora poprečnih rebara. Za postizanje bilo kakve interakcije potrebna je deformacija geomreže. Ona se može pojaviti kao posljedica naprezanja u rebrima koja formiraju otvor geomreže tijekom zbijanja tla i djelovanja vertikalnog opterećenja nadsloja (ili dodatnih naprezanja, npr. od prometa na prometnici), kada su čestice tla uklještenje u otvor geomreže i izazivaju istezanje rebara oko otvora. Deformacija u geomreži se može pojaviti i kao posljedica relativnog pomaka geomreže i tla pri izvlačenju geomreže (npr. kod djelovanja geomreže kao zatege u potpornim konstrukcijama ili pokosima nasipa i saniranih klizišta metodom armiranja tla). Otporu izvlačenju geomreže pri izvlačenju iz tla pridonosi i uklještenje zrna u otvore geomreže.

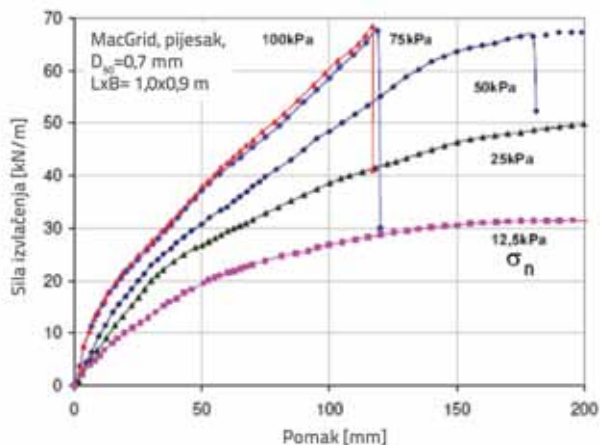
3.2. Prikaz različitih utjecaja na rezultate ispitivanja

Interakcija između tla i armature ovisi o fizikalnim i mehaničkim svojstvima tla (granulometrijski sastav, čvrstoća, oblik zrna, zbijenost i gustoća) i armature (tip: geotekstil, geomreža; način proizvodnje: lijepljena ili ekstrudirana geomreža, tkani ili netkani geotekstil; geometrijske karakteristike: debljina uzdužnih i poprečnih rebara, postojanje zadebljanih čvorova; veličina otvora geomreže; mehanička svojstva: vlačna čvrstoća, hrapavost površine, radialna sekantna krutost [43]). Na interakciju naročito utječe međusobni odnos svojstava tla i armature (omjer veličine otvora mreže u odnosu na veličinu čestica tla ili omjer debljine rebara mreže u odnosu na promjer čestica tla), kao i stanje naprezanja i deformacija. U nastavku će biti prikazan pregled različitih utjecaja na rezultate ispitivanja kao što je utjecaj normalnih naprezanja i dimenzija armature, vrste armature, vrste tla te utjecaj geometrijskih odnosa tla i armature.

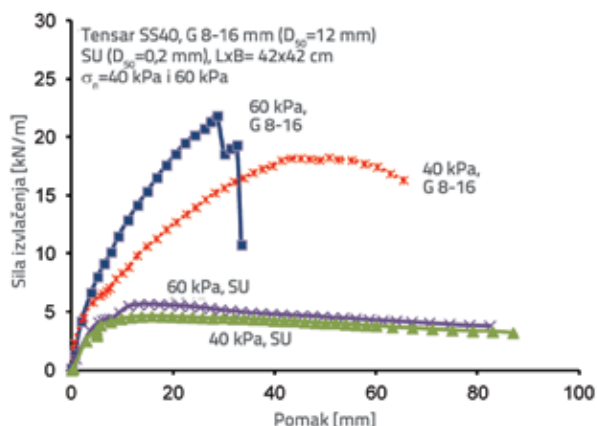
3.2.1. Utjecaj normalnih naprezanja i dimenzija uzorka armature

Uz zbijenost, normalna naprezanja od težine nadsloja (σ_n) imaju velik utjecaj na otpor izvlačenju i direktno utječu na razvoj posmičnih naprezanja na kontaktu tla i armature kao i na izraženost učinka uklještenja. O veličini normalnog naprezanja ovisi hoće li se armatura izvući iz tla ili doživjeti vlačni slom, a njegovim porastom mijenja se i raspodjela pomaka po duljini armature: najveći pomaci događaju se na dijelu koji je bliži mjestu izvlačenja iz tla, a naglo opadaju prema kraju uzorka. Povećanje σ_n sprečava dilataciju tla te povećava trenje i pasivni otpor poprečnih rebara mreže čime se povećava ukupni otpor izvlačenju [6]. Utjecaj σ_n u pijesku može se vidjeti na slici 8: armatura može doživjeti potpuno izvlačenje ($\sigma_n=12,5$ i 25 kPa), vlačni slom nakon djelomičnog izvlačenja ($\sigma_n=50$ kPa) ili vlačni

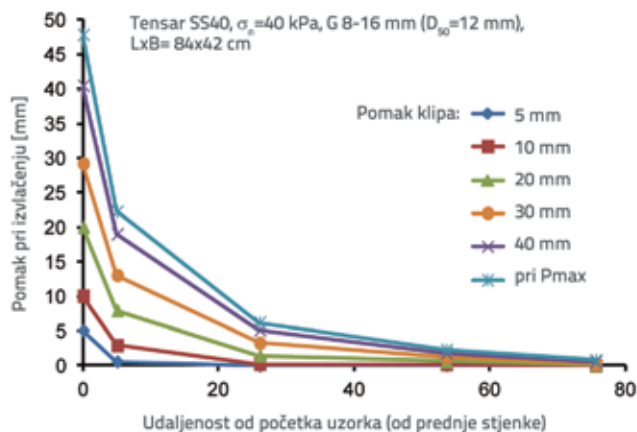
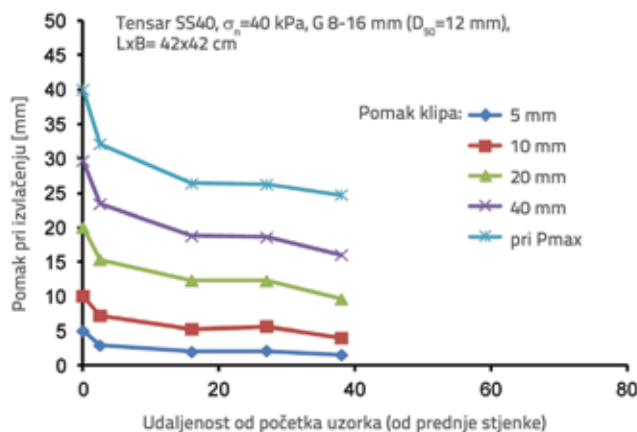
sлом bez izvlačenja ($\sigma_n=75$ i 100 kPa). Uočava se da porast otpora izvlačenju uslijed povećanja normalnih naprezanja nije linearan i ovisi o tipu i svojstvima tla i armature te ga je potrebno utvrditi za svaki konkretni slučaj upotrebe određene armature u određenom tlu.



Slika 8. Porast sile izvlačenja pri povećanju normalnih naprezanja, [12]



Slika 9. Razlike u sili izvlačenja za normalna naprezanja 40 i 60 kPa u šljunku i pijesku [3]



Slika 10. Razvoj pomaka po duljini uzorka geomreža gdje je: a) L/B=1; b) L/B=2 [3]

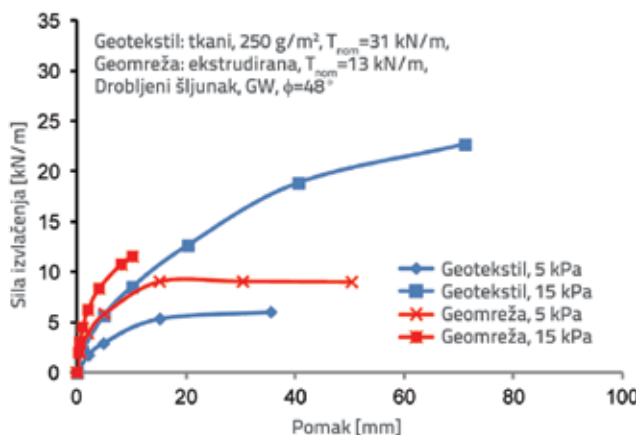
Na slici 9. može se uočiti da u šljunku pri porastu σ_n sa 40 na 60 kPa armatura umjesto izvlačenja doživljava vlačni sлом, dok u pijesku izvlačenje nastupa i pri $\sigma_n=40$ i 60 kPa, uz znatno manje sile izvlačenja [3]. Povećanjem normalnih naprezanja aktivira se samo nekoliko prvih redova poprečnih rebara geomreže, a sila izvlačenja kontrolirana je njenom vlačnom čvrstoćom [3, 12, 14].

Dimenzije i odnos duljine (L) i širine (B) armature imaju velik utjecaj na otpor izvlačenju i način sroma. Prevelika duljina u odnosu na širinu može značiti da će armatura doživjeti vlačni sлом, a ne izvlačenje. Prema odredbama iz normi za izvlačenje, omjer L/B trebao bi biti veći od 2 prema [9] ili 3, prema [17]. Rezultati pokusa izvlačenja [3] pri $\sigma_n=40$ kPa sa slike 3a i 3b pokazuju izvlačenje armature za omjer L/B=1, dok kod L/B=2 nastupa vlačni sлом. Za omjer L/B=1 pomaci po cijeloj dužini armature javljaju se već pri malim pomacima prednjeg dijela armature (slika 10.a). Kako napreduje izvlačenje, pomaci po cijeloj dužini rastu i dolazi do izvlačenja. Za omjer L/B=2 (slika 10.b) pomaci od početka prema kraju armature ubrzano opadaju i na kraju uzorka iščezavaju. U ovom slučaju nastupa vlačni sлом armature. Istraživanja koja su proveli Sobhi i Wu [44] govore o "aktiviranoj duljini" uzorka: pri određenoj sili izvlačenja pomaci se događaju samo na dijelu duljine armature, a povećanjem sile aktivirana duljina se povećava, no vlačni sлом može nastupiti i prije aktiviranja cijele duljine armature i njenog izvlačenja iz tla. Ako se želi postići izvlačenje, a ne vlačni sлом, što je važno pri određivanju koeficijenta interakcije, kod geomreža nosivih u dva smjera u šljuncima treba ispitivanja provoditi sa smanjenim omjerom vrijednosti L/B u odnosu na preporuke iz normi, a prijedlog je prema [3] i [45] da to bude L/B=1.

3.2.2. Utjecaj vrste armature

Istraživanja utjecaja vrste armature na interakciju s tlom pomoću pokusa izvlačenja započela su na geotekstilima, a u novije vrijeme najviše je istraživanja na geomrežama. Veći je broj istraživanja na geomrežama nosivim u jednom

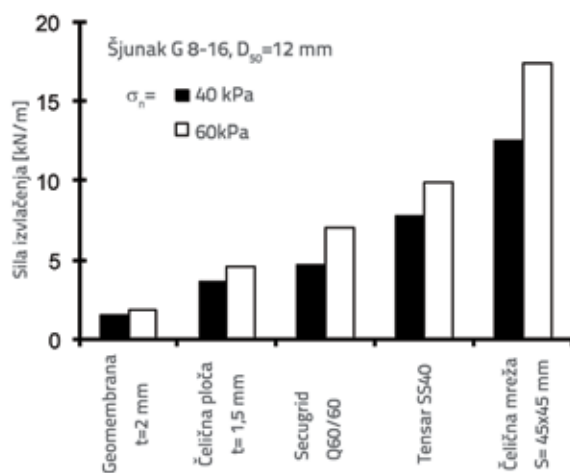
(uzdužnom) smjeru npr. [6, 7, 12, 13, 20, 25, 26, 28, 31, 33, 34, 37], a manji na geomrežama koje su nosive u dva (oba) smjera npr. [3, 8, 13, 24, 27, 29, 31, 34, 43, 45]. Istraživanja također obuhvaćaju ispitivanja metalnih mreža (pravokutnih [1, 3], ili heksagonalnih otvora [12, 30, 46]), geotekstila [8, 20, 23, 27, 44, 47] geomembrana [3] ili metalnih ploča [3, 15]. Usporedba ponašanja geotekstila i geomreže pri izvlačenju, sa slike 11 pokazuje da je otpor izvlačenju geomreže gotovo dvostruko veći nego kod geotekstila [47].



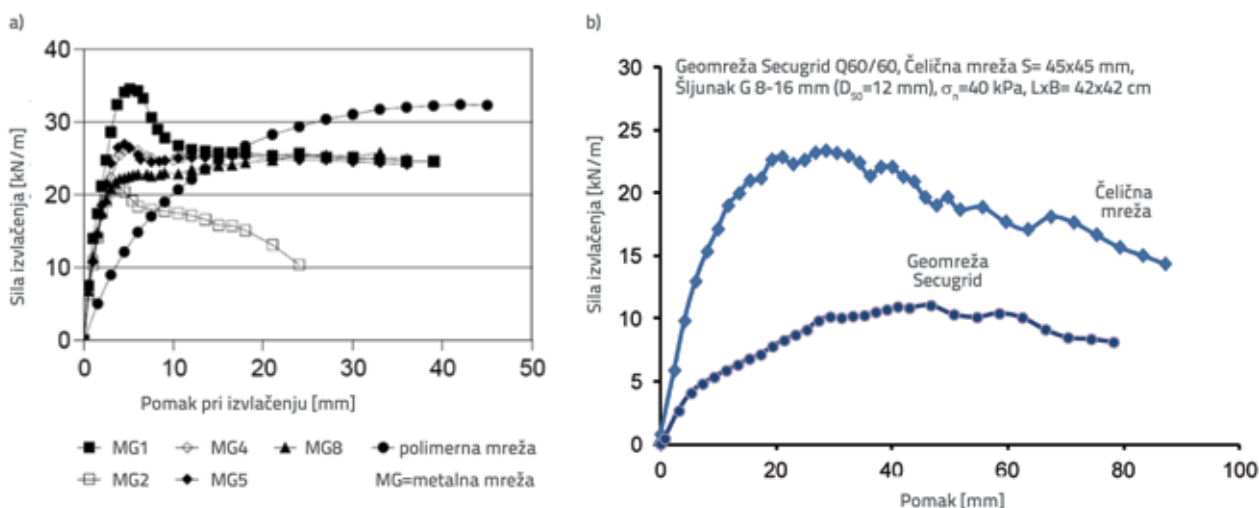
Slika 11. Usporedba izvlačenja geomreže i geotekstila [47]

Kod geomreža, uz vlačnu čvrstoću na ponašanje pri izvlačenju (vrijednost sile izvlačenja i deformacije armature) velik je utjecaj krutosti geomreže te se može govoriti o krutim i rastezljivim geomrežama. Na slici 12. prikazani su odnosi naprezanja i pomaka za metalne geomreže koje se mogu smatrati krutima u odnosu na rastezljive polimerne geomreže. Kod metalnih geomreža maksimalna sila izvlačenja postiže se pri manjim vrijednostima pomaka nego kod polimernih geomreža, a nakon postignute vršne vrijednosti sila izvlačenja

s porastom pomaka opada. Dolazi do istovremenog aktiviranja cjelokupne duljine mreže, a nakon početnog pomaka tlo iza poprečnih rebara mreže se razrahljuje čime je olakšan daljnji prodor geomreže kroz tlo. Kod rastezljivih polimernih geomreža vrijednost sile izvlačenja raste s porastom pomaka do vrijednosti maksimalne sile izvlačenja koja se postiže tek pri većim pomacima. Kontinuiran prirast otpora izvlačenju može se objasniti postupnim aktiviranjem redova poprečnih rebara geomreže, tako da se najprije aktiviraju redovi rebara bliže mjestu izvlačenja, a potom i ostali redovi. Usporedbom oblika krivulje izvlačenja sa slike 12.a i 12.b može se uočiti da polimerne geomreže imaju sličan odgovor na izvlačenje, dok kod metalne mreže u istraživanju [3] nije došlo do tako izrazitog gubitka sile nakon postizanja izvlačenja kao kod [1] što se može pripisati različitim uvjetima ispitivanja (tip tla i zbijenost, vrsta geomreže). Metalne mreže razvijaju veći otpor pri manjim deformacijama od polimernih mreža.



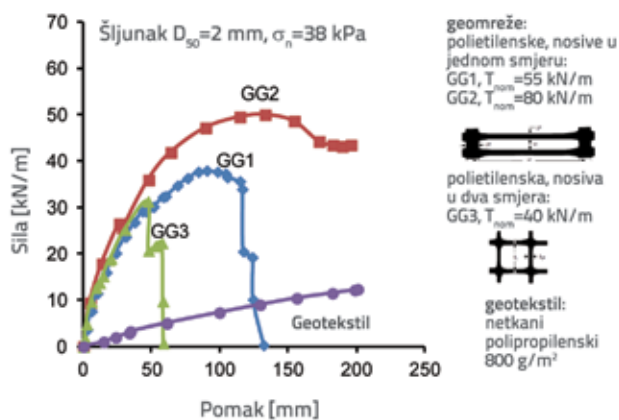
Slika 13. Usporedba maksimalnih sila izvlačenja za različite tipove armature [48]



Slika 12. Rezultati ispitivanja izvlačenjem na velikom uzorku metalnih i polimernih geomreža za metalne i polimerne geomreže: a) prema [1]; b) prema [3]

Ponašanje plošne armature pri izvlačenju (geotekstil, geomembrana, metalna ploča), kod koje otpor izvlačenju dolazi od trenja, bitno je različito od ponašanja geomreža. Iz vrijednosti sila izvlačenja sa slike 13. može se vidjeti da su sile izvlačenja za polimerne geomreže i čeličnu mrežu bitno veće od sila izvlačenja čelične ploče i geomembrane [3, 48]. Omjer sila izvlačenja geomreža/geomembrana je približno 4,5, dok omjer sila izvlačenja čelična mreža/ploča iznosi približno 3,5.

Razlika u ponašanju postoji kod geomreža nosivih u jednom smjeru i u dva smjera što je istražio Lopes [37] uspoređujući je s ponašanjem geotekstila (slika 14.). Geomreže dominantno nosive u jednom smjeru (GG2 i GG1) postižu veće sile pri izvlačenju od geomreže nosive u dva smjera (GG3), jer imaju veću vlačnu čvrstoću, a izvlačenje se postiže samo kod geomreže najveće vlačne čvrstoće (GG2), dok ostale geomreže doživljavaju vlačni slom. Treba primijetiti da sve geomreže imaju sličan način ponašanja do sloma, a to je zato što je u pokusu korišteno tlo sitnih zrna i što u njemu učinci uklještenja nisu izraženi.

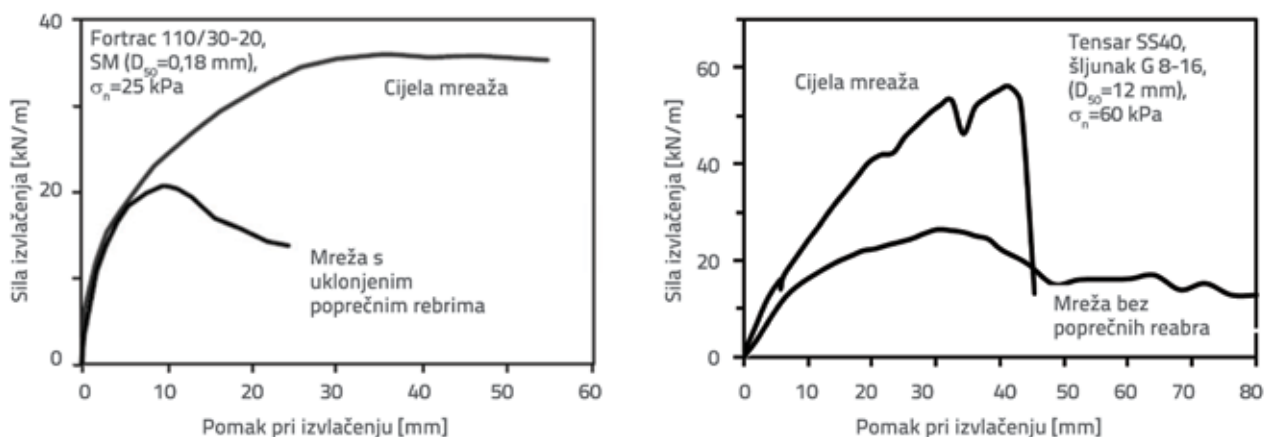


Slika 14. Usporedba razvoja sile izvlačenja i pomaka za geomreže nosive u jednom smjeru i u dva smjera s geotekstilom, [37]

Ponašanje pri izvlačenju osim o krutosti značajno ovisi i o geometrijskim karakteristikama geomreže s posebnim utjecajem djelovanja poprečnih rebara [1]. Slika 15.a prikazuje rezultate pokusa izvlačenja za slučaj geomreže s poprečnim i uzdužnim rebrima (cjelovit uzorak) i geomreže kojoj su poprečna rebra uklonjena. Pokazuje se da su poprečna rebra zaslužna za preuzimanje značajnog dijela sile izvlačenja, ali je i trenje po uzdužnim rebrima približno jednako važno [49].

Sličan omjer sile izvlačenja za slučaj mreže s poprečnim rebrima i bez njih za geomrežu u šljunku dobili su i autori ovog rada, kako je prikazano na slici 15, iako su postignute sile izvlačenja veće. Rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem izvlačenja geomreže iz pijeska upućuju na velik utjecaj poprečnih rebara [50]. Nasuprot tomu, rezultati pokusa izvlačenja armature u velikom uređaju za izvlačenje na geomrežama pokazuju da je doprinos poprečnih rebara u pijesku manji [3].

Ispitivanja izvlačenjem na izoliranim poprečnim rebrima geomreža u zbijenim pijescima s velikim omjerom debljine rebara i promjera zrna pijeska pokazuju da se slom tla događa ispred rebra na udaljenosti i do 6 puta debljina poprečnog rebara, a za mrežu s velikim otvorima (mala tlocrtna površina rebara u odnosu na ukupnu površinu uzorka) pokazuje se da što je veći razmak između poprečnih rebara to je manji njihov međusobni utjecaj [2]. Kod metalnih mreža okruglih poprečnih rebara pokazuje se da pri omjeru razmaka poprečnih rebara (S) i debljine rebara (B) $S/B > 40$ međudjelovanje postaje zanemarivo [1]. Kod mreža s heksagonalnim otvorima pasivni otpor poprečnih rebara je 4-6 puta veći od trenja po cjelokupnoj površini uzorka [46]. Elementi koji utječu na ponašanje mreže pri izvlačenju su oblik i krutost na savijanje poprečnih rebara [1]. Kod geomreža koje imaju poprečna rebra male krutosti na savijanje pri porastu sile izvlačenja i savijanju poprečnih rebara dolazi do progresivne mobilizacije pasivnog otpora u tlu koje se nalazi ispred njih [51].

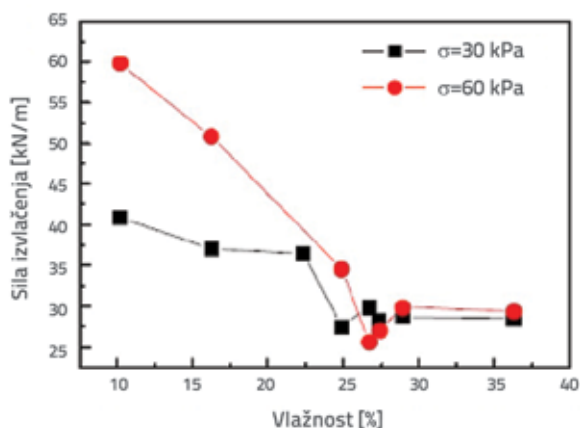


Slika 15. Utjecaj poprečnih rebara na izvlačenje geomreže: a) prema [49]; b) prema [3]

3.2.3. Utjecaj vrste tla i svojstava tla i armature

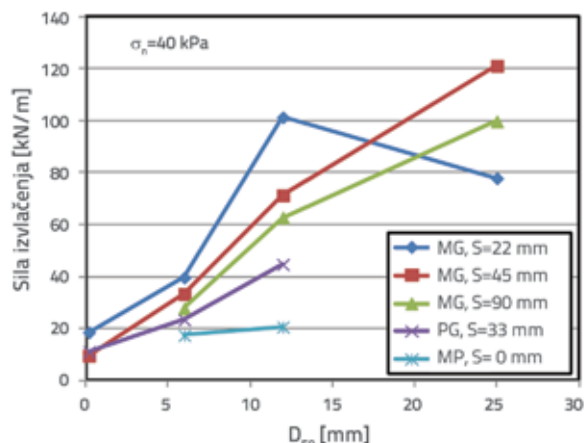
Svojstva tla koje se koristi u konstrukciji od armiranog tla izravno utječu na njeno ponašanje. Pri izgradnji nasipa primjerice za prometnice, zbog povoljnijih mehaničkih svojstava (velika čvrstoća i mala stišljivost, manji utjecaj promjene vlažnosti na mehanička svojstva), obično se preferiraju nekoherentna tla. Zornberg i Mitchel [52] spominju nedostatke korištenja koherentnog tla i tla s visokim udjelom sitnih čestica pri izgradnji nasipa za prometnice zbog male čvrstoće, varijabilnosti u vlažnosti i velike deformabilnosti. Međutim, u praktičnim slučajevima u blizini mjesta gradnje često nema dovoljno kvalitetnog materijala ispune, pa i lošija tla sve više postaju predmet interesa za korištenje kao ispuna u konstrukcijama od armiranog tla.

Istraživanja pokusom izvlačenja u koherentnim tlima su relativno malobrojna, a uglavnom se orijentiraju na proučavanje utjecaja vlažnosti tla na silu izvlačenja. Povećanjem vlažnosti tla sila izvlačenja opada (u CH glini, slika 16.), pad je značajniji za normalno naprezanje od 60 kPa nego za 30 kPa, s tim da je za vlažnost veću od 27% vrijednost sile izvlačenja ista za obje vrijednosti normalnih naprezanja (60 i 30 kPa) [53].

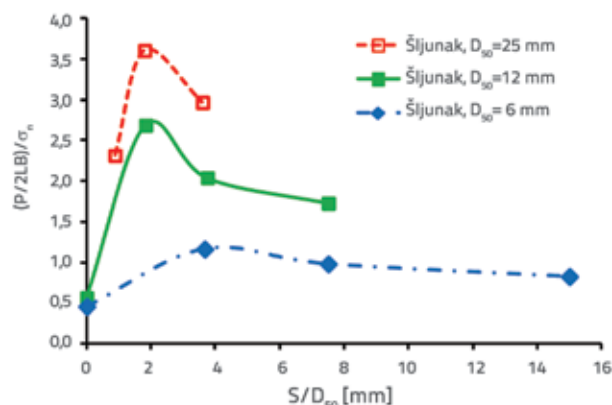


Slika 16. Ovisnost sile izvlačenja o promjeni vlažnosti u koherentnom tlu [53]

Najveći je broj istraživanja pokusom izvlačenja armature iz pijeska, iako se u geotehničkim zahvatima neusporedivo više koriste tla većih zrna (npr. šljunak, bilo kao prirodni ili drobljeni materijal). Utjecaj tla većih promjera zrna na interakciju s različitim tipovima armature u svom istraživanju proučavali su i autori ovog rada [3, 40]. Na slici 17. prikazan je utjecaj promjera zrna tla na silu izvlačenja za metalne mreže (MG) kvadratnih otvora veličine $S = 22, 45$ i 90 mm, ekstrudiranu polimernu geomrežu (PG) i metalnu ploču (MP) u pijesku ($D_{50}=0,2$ mm) i tri prirodna zaobljena šljunka ($D_{50} = 6, 12$ i 25 mm). Može se uočiti da porastom promjera zrna tla raste sila izvlačenja, osim kod metalne mreže sa $S=22$ mm u slučaju kada veličina zrna tla postane veća od veličine otvora mreže, te umjesto uklještenja u otvore mreže zrna tla kližu po njenoj površini.



Slika 17. Utjecaj promjera zrna tla na silu izvlačenja kod metalnih i polimerne mreže te metalne ploče [3]



Slika 18. Omjer otpora izvlačenju u ovisnosti o S/D_{50} [55]

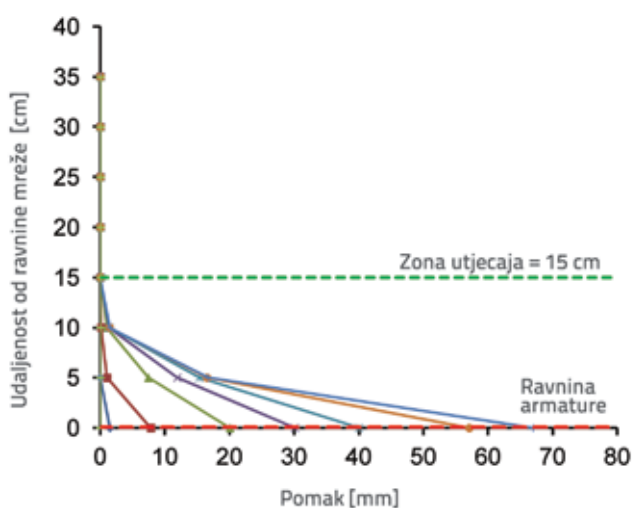
Iako je proveden velik broj istraživanja pokusima izvlačenja, relativno je malo objavljenih rezultata u kojima se analizira utjecaj omjera geometrijskih karakteristika armature i veličine zrna tla. Tako su Palmeira i Milligan [2] proučavali utjecaj omjera B/D_{50} (B =visina poprečnog rebra, D_{50} =karakteristični promjer zrna) i zaključili da kod metalnih i polimernih geomreža tek kod omjera B/D_{50} između 10 i 15 otpor izvlačenju nije ovisan o veličini čestica tla (korišten je jednoliki Leighton Buzzard pijesak s $D_{50}=0,4-1,6$ mm).

Otpor izvlačenju značajno ovisi o omjeru S/D_{50} (S =veličina otvora mreže iskazana kao udaljenost poprečnih rebara mreže). Rezultati istraživanja pokazuju da se za srednji do fini silikatni pijesak ($D_{50}=0,6$ mm) i mreže načinjene bušenjem otvora u geomembrani ($S=30-100$ mm), pri vrijednosti $S/D_{50}=50$ postiže maksimalni otpor izvlačenju [34]. Slična konstatacija prema [4] i [54] vrijedi za omjer $S/D_{50}>3$. Autori ovog rada ispitivanjima su na metalnim i polimernim geomrežama u šljuncima ($D_{50}=6-25$ mm) pokazali da se pri omjeru $S/D_{50}=2$ (slika 18.) postiže najveći otpor izvlačenju geomreže [3, 55].

3.2.4. Zona utjecaja armature i krutost armiranog tla

U armiranom tlu važno je znati kolika je debljina zone tla pod utjecajem geomreže. To je pri izvlačenju u fotoelastičnim studijama istraživao Dyer [56], a kasnije pomoću numeričkih modela i drugi istraživači (npr. [14, 32, 39, 57]). Spomenuta istraživanja pokazala su postojanje promjena u naprezanjima i pomacima u tlu koje su uzrokovane izvlačenjem armature. Eksperimentalno određivanje područja utjecaja armature na okolno tlo provodili su autori [3] i [38]. Mjerenjem pomaka u tlu u okolini geomreže pri izvlačenju ustanovio je Minažek [3] da se utjecaj armature proteže približno do udaljenosti $30 \times D_{50}$ mjereno vertikalno od ravnine geomreže. Na primjeru jednog ispitivanja čiji su rezultati prikazani na slici 19.a uočava se da je visina utjecaja armature 15 cm.

Zona utjecaja armature može se definirati udaljenošću od ravnine armature u kojoj tlo ima veću krutost nego što bi je imalo da nije armirano. Vertikalni razmak geomreža u konstrukciji trebalo bi prilagoditi zoni utjecaja. Teorijski bi svaka geomreža trebala imati svoj "otisak" interakcije u određenom tlu, koji se očituje stupnjem poboljšanja tla i veličinom zone utjecaja. Ovakva karakteristika geomreže može se ustanoviti mjerenjem brzine tlačnih i posmičnih valova u armiranom tlu. Ova hipoteza je predmet višegodišnjeg istraživanja na GF Osijek. Ilustracija pokušaja utvrđivanja krutosti kompozita armiranog tla geofizičkom metodom mjereći brzinu tlačnih i posmičnih valova u laboratorijskim uvjetima u pokusu izvlačenja prikazana je na slici 19.b gdje se primjećuje povećanje brzine valova u tlu za slučaj postojanja geomreže [41]. Ovakav pristup prvi se put koristi za ispitivanje armiranog tla i iziskuje dodatna usavršavanja tehnike mjerenja kako bi se dobili pouzdani i primjenjivi rezultati.



Slika 19. a) Pomaci u tlu iznad ravnine armature koji se javljaju pri izvlačenju armature i naznačuju debljinu zone tla na koju utječe izvlačenje armature [4]; b) Usporedba brzine tlačnih valova (v_p) za slučaj nearmiranog i armiranog tla [41]

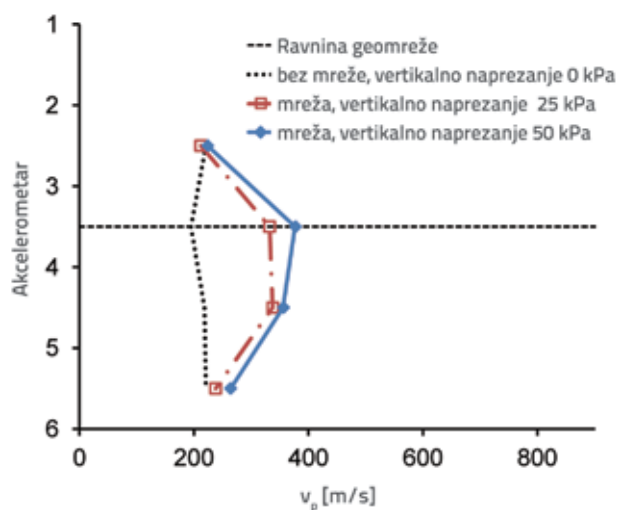
3.3. Usporedba modelskog pokusa izvlačenja armature iz tla s pokusima na terenu i numeričkim rješenjima

Mali je broj istraživanja u kojima su provedene direktne usporedbe terenskog i modelskog pokusa izvlačenja (npr. [13, 58 i 59]) iako bi one bile vrlo korisne pri ocjeni primjenjivosti rezultata modelskih pokusa za projektiranje konstrukcija od armiranog tla. Terenski pokusi izvlačenja provode se na posebno pripremljenim pokusnim dionicama konstrukcija od armiranog tla, kao što je to prikazano na slici 20.

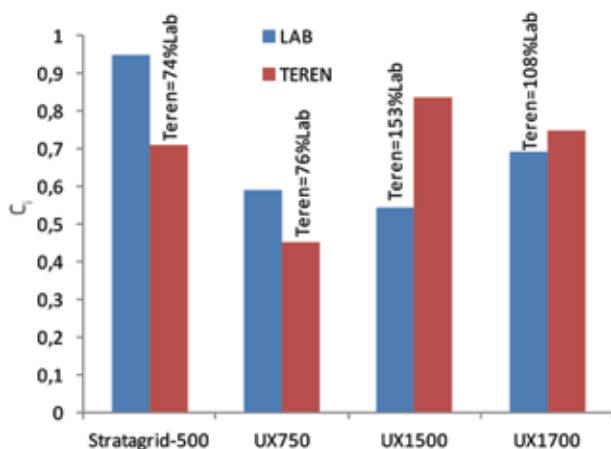


Slika 20. Potporni zid od armiranog tla pripremljen za terenski pokus izvlačenja armature [58]

U usporedbi s modelskim pokusom izvlačenja imaju određena ograničenja koja se odnose na kvalitetu ugradnje tla (homogeno zbijanje u cijelom volumenu tla) ili mogućnost preciznog utvrđivanja utjecaja prednje stijenke



i vrijednosti normalnih naprezanja da bi se to moglo reproducirati u modelskom pokusu. Uspoređujući rezultate terenskog i laboratorijskog pokusa izvlačenja uočava se sličan način mobilizacije otpora izvlačenju, tako da se laboratorijski pokus izvlačenja može primjeniti ne samo za objašnjavanje mehanizama interakcije već i za određivanje parametara za projektiranje [13]. Modelski pokus izvlačenja daje konzervativne vrijednosti otpora izvlačenju u odnosu na terensko izvlačenje u koherentnim tlima [58]. Rezultati modelskog i terenskog pokusa izvlačenja sa slike 21 pokazuju sličnosti iako kod geomreža manjih vlačnih čvrstoća (Strata 500 i UX 750) ispitivanja na terenu pokazuju manje vrijednosti otpora (iskazane koeficijentom interakcije C_i) od pokusa provedenih u laboratoriju, a kod jačih geomreža (UX 1500 i UX 1700) rezultati izvlačenja pokusom na terenu daju veće vrijednosti otpora [58].



Slika 21. Usporedba koeficijenta interakcije kod modelskog i terenskog pokusa izvlačenja [58]

Modelska ispitivanja izvlačenjem su skupa i vremenski zahtjevnija te imaju ograničenja vezana uz utjecaj rubnih uvjeta i načina ispitivanja na rezultate ispitivanja. Razvojem analitičkih i numeričkih metoda kojima se simulira pokus izvlačenja i prognozira ponašanje armature (i tla) pri izvlačenju izbjegla bi se ograničenja iz modelskog ispitivanja i smanjila potreba za provođenjem brojnih pokusa izvlačenja. U analitičkim metodama ponašanje armature pri izvlačenju opisuje se kroz razvoj sile i deformacija u armaturi, no pomoću njih se ne mogu odrediti naprezanja i deformacije koje se pri izvlačenju armature događaju u tlu. Jedna od najznačajnijih metoda procjene sile izvlačenja je metoda Jewella [54] u kojoj se sila izvlačenja proračunava kao:

$$P = P_{tr} + P_{pas} \quad (2)$$

Dio sile izvlačenja koji proizlazi iz trenja je

$$P_{tr} = 2 \cdot A_s \cdot \sigma_n \cdot \tan \delta \quad (3)$$

gdje su:

- A_s - površine armature u trenju
- σ_n - normalno naprezanje
- δ - kut trenja na kontaktu tla i armature,

a sila pasivnog otpora tla na poprečna rebra mreže:

$$P_{pas} = (L \cdot B \cdot t \cdot \alpha_p \cdot \sigma_p) / S \quad (4)$$

gdje su:

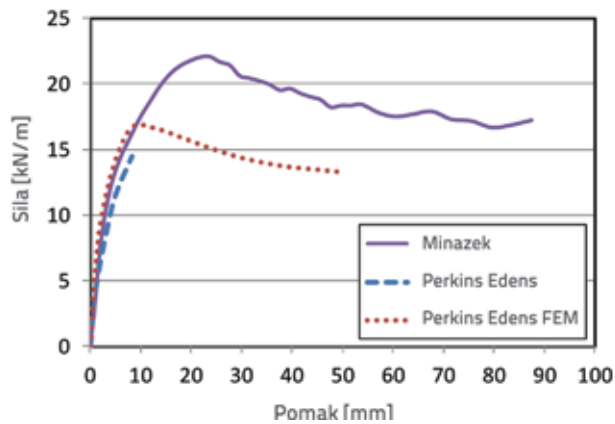
- L, B - dimenzije uzorka armature
- t - debljina poprečnih rebara
- α_p - dio širine uzorka odgovoran za mobilizaciju pasivnog otpora
- σ_p - pasivni otpor koji se mobilizira na poprečnim rebrima
- S - veličina otvora mreže.

Pasivni otpor $\sigma_p = \sigma_n \cdot N_q$ razvija se uz opći posmični slom, slom probijanjem ili modificirani slom probijanjem što utječe na proračun koeficijenta nosivosti N_q . Jedan od pokušaja dopune jednadžbe (4) kako bi se proračunan otpor izvlačenju prilagodio izmjerenim vrijednostima objavio je Moraci i dr. [33]. Rješenje Jewella daje dobre rezultate u tlima manjih promjera zrna (npr. pijesak s promjerima zrna koji su manji od debljine rebra armature) kao što to pokazuju [12, 33, 54], no prema istraživanjima [3] nije primjenjivo za tla većih promjera zrna (npr. krupnozrni šljunak).

Pomoću numeričkih modela, uz podatke o aktiviranoj duljini armature pri izvlačenju može se odrediti i visina (debljina) zone tla oko armature koja sudjeluje u prijenosu naprezanja, tj. "zona utjecaja armature". Numerički modeli razvijali su se kao 2D FEM modeli [35, 44, 46, 47, 60] i 3D FEM modeli [32], a njihovo najveće ograničenje je nemogućnost modeliranja stvarnog ponašanja tla i mrežaste armature pri izvlačenju (na primjer takvi modeli ne mogu uključiti utjecaj poprečnih rebara geomreža i pasivnog otpora, a prijenos opterećenja s armature na tlo tada se modelira kao trenje). Problem je utvrđivanja svojstava kontakta armatura-tlo koji bi na primjeren način opisao njihovu interakciju. Primjer usporedbe rezultata pokusa izvlačenja koji su izveli Perkins i Edens [47] i numeričkog 2D FEM modela prikazan je na slici 22. Može se uočiti da u pokusu izvlačenja armatura puca uslijed vlaka, dok rezultat FEM analize pokazuje izvlačenje geomreže nakon postizanja vršne sile, a to nije moguće jer je sila izvlačenja veća nego što bi bila sila potrebna za vlačni slom geomreže. Usporedbom s rezultatima pokusa izvlačenja koji je obavio Minažek [3] za slično tlo i sličnu geomrežu po geometrijskim karakteristikama ali veće vlačne čvrstoće, može se vidjeti dobro poklapanje u početnom dijelu krivulje izvlačenja i s pokusom izvlačenja i numeričkim modelom Perkinsa i Edensa [47].

Do sada razvijeni numerički modeli kalibrirani su odabranim modelskim pokusima, dok je za druge materijale i uvjete ispitivanja točnost prognoze ponašanja vrlo ograničena.

U ovom trenutku ne postoji jedinstveno rješenje kojim je opisana interakcija tla i armature na odgovarajući način, koje daje parametre za projektiranje konstrukcija od armiranog tla. Kako bi se uklonila ograničenja proizišla iz FEM modela za ponašanje armiranog tla, počeli su se primjenjivati DEM modeli (DEM - metoda diskretnih elemenata) npr. [61] gdje se čestice tla modeliraju kao diskretni elementi, a armatura uz površinska svojstva hrapavosti može imati otvore kao i zadebljane čvorove. U ovom trenutku malo je objavljenih rezultata analiza primjenjujući modele DEM te se očekuje veća afirmacija ove metode.



Slika 22. Usporedba modelskog pokusa izvlačenja [3, 47] i FEM modela [47]

3.4. Inženjerski parametri za projektiranje konstrukcija od armiranog tla koji se dobivaju pokusom izvlačenja

S obzirom na vrlo velik broj tipova geosintetičke armature koja se pojavljuje na tržištu važno je ustanoviti kriterije za odabir optimalnog tipa armature i načina armiranja (duljina i razmak slojeva armature po visini) u odnosu na vrstu ispune koja je na raspolaganju. Pokus izvlačenja može pomoći u donošenju odluka o odabiru tipa armature i pri određivanju duljine armature u konstrukciji od armiranog tla. Do sada nisu pripremljene općenite preporuke za izbor tipa armature, tako da je ispitivanje potrebno provesti u svakom konkretnom projektu. Praktičan rezultat pokusa izvlačenja armature iz tla za inženjersku primjenu u konstrukcijama od armiranog tla iskazan je koeficijentom interakcije tla i armature C_i koji se koristi pri određivanju duljine sidrenja armature izvan klizne plohe. Koeficijent interakcije C_i iz izraza (1) definiran je kao omjer posmične čvrstoće na kontaktu tla i armature i posmične čvrstoće tla. Uz poznavanje kuta trenja tla (za nekoherentna tla, jer se ona uobičajeno koriste kao ispuna ili izostavljanjem kohezije ako se radi o koherentnom tlu, čime se ide na stranu sigurnosti [4]) u proračunima konstrukcija od armiranog tla C_i se koristi za određivanje potrebne duljine sidrenja armature iza pretpostavljene klizne plohe. Ovaj parametar opisuje interakciju tla i armature trenjem,

ne uzimajući u obzir druge aspekte interakcije. Njegova vrijednost je obično manja od jedan (0,6-0,9), ali u određenim slučajevima primjerice kod geomreža može biti i veći od jedan što sugerira da je ukupni otpor izvlačenju veći od čistog trenja, odnosno da i drugi mehanizmi (npr. pasivni otpor na poprečna rebra ili učinak uklještenja) djeluju na povećanje ukupnog otpora izvlačenju. Za preliminarne proračune konstrukcija od armiranog tla proizvođači geosintetika, na osnovi vlastitih istraživanja, daju preporučene vrijednosti koeficijenata interakcije ovisno o odabranoj vrsti materijala ispune. Na primjer, Rimoldi i dr. [62] te Montanelli i Recalcatti [63] daju minimalne i maksimalne vrijednosti koeficijenata interakcije pri izvlačenju za Tenax geomreže nosive u jednom smjeru kako je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Koeficijenti interakcije C_i za geomrežu Tenax, prema [62, 63]

Vrsta materijala \ Istraživanja	Rimoldi i dr. (1994.)	Montanelli i Recalcatti (2003.)
ŠLJUNAK	0.9-1.05	0.90-1.50
PIJESAK	0.75-0.95	0.85-1.20
PRAH	0.70-0.90	0.75-1.00
GLINA	0.60-0.85	0.70-0.90

Za Fortrac R mreže (pletene geomreža) u preliminarnim proračunima kao konzervativna vrijednost u nekoherentnom zbijenom tlu predlaže se vrijednost koeficijenta interakcije 0,6 [64]. Za Tensar RE i RE500 (ekstrudirane polipropilenske jednoosne geomreže) ispitivanjem pomoću pokusa izvlačenja utvrđene su vrijednosti i $C_i > 1.0$ s tim da se preporučuje usvojiti $C_i = 0,6$. [65]. Za Miragrid XT (nosiva u jednom smjeru) u preliminarnim proračunima predlažu se vrijednosti C_i 0,9-1,0 za pijeske, 0,8-0,9 za prahove i 0,7-0,8 za gline [66].

Ne postoji jasan kriterij koji bi definirao način odabira vertikalnog razmaka armature osim da se ukupna vlačna sila koju je armaturom potrebno preuzeti podijeli s brojem slojeva armature, vodeći računa o vlačnoj čvrstoći armature. Obično se procjenjuje "pravilom palca" i iznosi 0,3-0,6 m [67] neovisno o tipu armature i značajkama tla. Pri definiranju vertikalnog razmaka slojeva armature trebalo bi voditi računa o utjecajnoj visini armature u kojoj dolazi do prijenosa opterećenja s armature na tlo pri izvlačenju. To je u modelskom pokusu izvlačenja proučavao Minažek [3] te utvrdio da metalne i polimerne mreže nosive u dva smjera u prirodnom šljunku imaju najveći otpor izvlačenju i najvišu zonu utjecaja kada omjer veličine otvora mreže i promjera prosječnog zrna S/D_{50} iznosi približno 2, a visina zone utjecaja armature iznosi približno $30D_{50}$. Utjecajnu visinu armature bilo bi uputno utvrditi i za druge slučajeve primjene različitih tipova armature u više tipova tla.

4. Zaključak

U radu se opisuju sadašnje spoznaje o ispitivanju interakcije tla i armature pokusom izvlačenja, te se komentiraju dosadašnja dostignuća koja su važna za buduća istraživanja i projektantsku praksu. Uređaji za izvlačenje armature iz tla i načini provođenja ispitivanja nisu u potpunosti standardizirani, a nisu niti usklađeni s postojećim normama za ispitivanje. Pri odabiru i planiranju pokusa izvlačenja za istraživačke ili praktične inženjerske svrhe autori preporučuju velike uređaje za izvlačenje. U praksi je važno da se ispitivanja obavljaju na materijalima ispune i za armaturu koji se planiraju ugrađivati u stvarne konstrukcije. Sva relevantna istraživanja pokazuju da su geomreže, čija je primjena u konstrukcijama od armiranog tla dominantna u odnosu na druge geosintetičke materijale, pri ojačanju tla višestruko djelotvornije od geotekstila, da su ukupni učinci u armiranom tlu ovisni o tipu geomreže i značajkama tla te da se u krupnozrnatom tlu najviše pokazuju razlike u učinkovitosti pojedinih geomreža. Pa ipak, radi jednostavnije provedbe pokusa, brojna su se dosadašnja istraživanja pokusom izvlačenja izvodila u pijesku. Kako je pokazano da pri izvlačenju iz pijeska, zbog malih promjera zrna, geomreže različitih karakteristika pokazuju sličan otpor izvlačenju [48, 55], a pijesak se ne koristi često kao ispuna, nameće se zaključak da istraživanja treba provoditi na krupnozrnatim materijalima koji su dominantni u primjeni. Nažalost, takvih je istraživanja relativno malo.

U novije vrijeme važnost vlačne čvrstoće geomreže razmatra se uglavnom u slučajevima kad se geomreže koriste kao zatege primjerice u nasipima ili zidovima od armiranog tla, dok je uloga otvora (okna) geomreže naglašena pri ojačanju tla ispod temelja ili kod nosivih slojeva prometnica.

Postoji nekoliko pokušaja određivanja krutosti armiranog kompozita geofizičkim metodama [3, 38, 39, 68], no još uvijek s nedovoljnim brojem pouzdanih rezultata da bi se ovakav tip ispitivanja mogao preporučiti kao valjan i pouzdan način utvrđivanja poboljšanja svojstava (krutosti) armiranog tla.

Ne postoje potvrđene metode kojima bi se objektivno "in situ" utvrdio doprinos geomreže u armiranom tlu na povećanju njegove čvrstoće i nosivosti te smanjenju deformabilnosti. Ipak ohrabruje spoznaja da se armiranim tлом uz upotrebu geomreža vrlo uspješno rješavaju zahtjevni slučajevi (nasipi visine i do 60 m, poboljšanje nosivih slojeva u prometnicama, nosive platforme ispod nasipa na mekom tlu i slično) na temelju iskustava, preporuka i specifičnih (često proizvođačevih) modelskih ispitivanja u velikom mjerilu.

Interakcija tla i armature u armiranom tlu važna je za racionalnu izvedbu konstrukcija od armiranog tla. Razvojem brojnih geosintetičkih proizvoda i primjenom sve šireg spektra

materijala tla za ispunu u konstrukcijama od armiranog tla rastu zahtjevi da se protumače mehanizmi koji objašnjavaju interakciju tla i armature. Modelska ispitivanja armiranog tla, a naročito ispitivanje izvlačenjem armature opisana u ovom radu, pokazala su se vrlo korisnima u razjašnjavanju mehanizama interakcije tla i armature te omogućuju određivanje inženjerskih parametara za projektiranje konstrukcija od armiranog tla. Modelska ispitivanja su korisna jer se različite varijante odnosa armatura-tlo u armiranom tlu mogu istraživati jednostavnije nego na pokusnim poligonima, čime se štedi vrijeme i izbjegavaju skupa i dugotrajna terenska ispitivanja "in situ". Zbog neujednačene istraživačke prakse (nестandardizirani pokusi i procedure ispitivanja), teško je uspoređivati postojeće rezultate ispitivanja. Utvrđeno je da ispitivanje u velikim uređajima za izvlačenje, uz osiguranje minimiziranja utjecaja rubnih uvjeta, može dati pouzdane rezultate i podatke koji su potrebni u projektiranju konstrukcija od armiranog tla kada je u pitanju djelovanje geosintetičke armature kao zatege u tlu. Pokus izvlačenja nije dovoljan za objašnjenje interakcije geomreže i tla u povećanju stabilnosti tla (prometnice, temeljenje). Praksa očekuje odgovore na sljedeća pitanja: (a) kako odabrati optimalnu geomrežu za određeni materijal ispune u konstrukciji od armiranog tla, (b) na kojem vertikalnom razmaku postaviti geomreže, (c) kako izvoditi armirano tlo (npr. treba li polagati geomrežu na zbijenu podlogu ili ju položiti u polovini nezbijenog sloja pa tek onda zbijati tlo), (d) kako odrediti mehanička svojstva armiranog tla potrebna u proračunu deformacija građevine od armiranog tla. Istraživanja su pokazala da sidrene zone geomreža mogu biti kraće nego što su uobičajene u praksi, kao i da se u slučajevima povećanja stabilnosti nosivih slojeva (prometnice, temeljenja) koristi samo mali dio raspoložive vlačne čvrstoće geomreže. Treba očekivati da će rezultati novijih znanstvenih istraživanja potaknuti izradu novih preporuka za projektiranje i izvedbu konstrukcija od armiranog tla, uzimajući u obzir učinkovitost upotrijebljene geomreže u odabranom tlu.

U Hrvatskoj se istraživanja armiranog tla pokusom izvlačenja na Građevinskom fakultetu u Osijeku provode već desetak godina. Razvijen je veliki uređaj za izvlačenje (nazvan tip GFOS), koji po svojstvima (vrlo velike dimenzije) pripada skupini malobrojnih uređaja pomoću kojih se mogu ispitivati realni materijali ispune s promjerima zrna većih dimenzija. Ističu ga inovativne mogućnosti mjerenja (mjerenje brzina tlačnih i posmičnih valova čime se utvrđuje visina zone utjecaja geomreže), a uz dodatna poboljšanja tehnike mjerenja očekuje se utvrđivanje mogućnosti doprinosa ovakvog pristupa u istraživanju interakcije tla i armature u armiranom tlu u kombinaciji s klasičnim pokusima izvlačenja.

LITERATURA

- [1] Palmeira, E.M.: Soil-geosynthetic interaction: modeling and analysis (Mercer lecture 2007-2008), *Proceedings of The 4th European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, (2008), pp. 1-30,
- [2] Palmeira, E.M., Milligan, G.W.E.: Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grid buried in sand, *Geotechnique* 11 (1989) 3, pp. 511-524.
- [3] Minažek, K.: *Modelsko ispitivanje interakcije geomreže i tla, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu*, 2010.
- [4] Koerner, R. M.: *Designing with geosynthetics, Fifth edition*, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [5] Juran, I., Knochenmus, G., Acar, Y.B., Arman, A. Pullout Response of Geotextiles and Geogrids (Synthetics of Available Experimental Data), *Proceedings: Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, (1988), pp. 92-111,
- [6] Farrag, K.: *Pull-out testing facility for geosynthetics. LTRC PROJECT NO. 87-1GT, Louisiana Transportation Research Center, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration*, 1991.
- [7] Moraci, N., Recalcati, P.: Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (2006), pp. 220-242.
- [8] Cuelho, E.V.: *Determination of Geosynthetic Constitutive parameters and Soil/Geosynthetic Interaction by In-Air and In-Soil Experiments, A thesis for the degree of Master of Science, Montana State University*, 1998.
- [9] ASTM D6706 – 01: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. ASTM International, 2007.
- [10] Brand, S.R., Duffy, D.M.: Strength and Pullout Testing of Geogrids, *Proceedings: Geosynthetic Conference, New Orleans Vol. 1*, (1987), pp.226-236.
- [11] Bauer, G.E., Halim, A., Shang, Q.: Large-Scale Pullout Tests: Assessment of Procedure and Results, *Proceedings: Geosynthetics '91 Conference*, Atlanta, (1991), pp. 615-627.
- [12] Sieira, A.C.C.F: Experimental study on soil-geogrid interaction mechanisms, PhD. Thesis, Pontifical University of Rio de Janeiro, Brazil, 377 p, 2003.
- [13] 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.
- [14] Bergado, D.T., Chai, J.C.: Pullout Force/Displacement Relationship of Extensible Grid Reinforcements, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 13. (1994), pp. 295-316.
- [15] Palmeira, E.M.: The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests. PhD. Thesis, University of Oxford, UK, 1987.
- [16] GRI Test Methods: GRI GG5 Geogrid Pullout, GRI, 1991.
- [17] 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.
- [18] Aydogmus, T., Klapperich, H.: Design and Evaluation of an Enhanced Shear and Pull-Out Testing Device, *Proceedings of The 4th European Geosynthetics Conference*, paper 170, 2008.
- [19] Chang, J.C., Hannon, J.B., Forsyth, R.A.: Pullout resistance and interaction of earthwork reinforcement and soil. *Transportation Research Record* 640. National Research Council, Washigton, DC, (1977), pp. 1-7.
- [20] Yuan, Z., Chua, K.M.: Numerical Evaluation of the Pullout Box Method for Studying Soil-Reinforcement Interaction. *Transportation research record* 1278, Transportation Research Board, Washington, D.C., (1991), pp. 116-124 .
- [21] Marolo, C.A., Nirihiko, M., Bergado, D.T.: Soil Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, June (1995), pp. 157-167.
- [22] Fannin, R.J., Raju, D.M.: On the pullout resistance of geosynthetics. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 3, (1993), pp. 409-417.
- [23] Kharchafi, M., Dysli, M.: Study of Soil-Geotextile Interaction by an X-Ray Method. *Geotextiles and Geomembranes*, (1993), pp. 307-325.
- [24] Min, Y., Leschinsky, D., Ling, H.J., Kaliakin, V.N.: Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, (1995), pp. 204-225.
- [25] Alfaro, M.C., Hayashi, S., Miura, N., Watanabe, K.: Pullout Interaction Mechanism of Geogrid Strip Reinforcement. *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 4, (1995), pp. 679-698.
- [26] Lopes, M.L., Ladeira, M.: Role of specimen geometry, soil height and sleeve length on the pull-out behaviour of geogrids. *Geosynthetics International* 3 (6), (1996), pp. 701-719.
- [27] Bernal, A., Salgado, R., Swan, R.H., Lovell, C.W.: Interaction Between Tire Shreds Ruber-Sand and Geosynthetics, *Gesynthetics international*, Vol. 4, No. 6, (1997), pp. 623-643
- [28] Teixeira, S.H.C.: Estudo da interacao solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicacao na analise e dimensionamento de macicos reforcados. Tese apresentada a Escola de Engenharia de Sao Carlos, da Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, 2003.
- [29] Alagyawanna, A.M.N., Sugimoto, M., Sato, S., Toyota, H.: Influence of longitudinal and transverse members on geogrid pullout behaviour during deformation, *Geotextiles and Geomembranes* 19, (2001), pp. 483-507
- [30] Bergado, D.T., Teerawattanasuk, C.: Analytical Models for Predicting the Pullout Capacity and Interaction Between Hexagonal Wire Mesh and Silty Sand Backfill, *Tamakang Journal of Science and Engineering*, Vol. 4. No. 4, (2001), pp. 227-238
- [31] Meyer, N., Nernheim, A., Emersleben, A.: Influence of confining pressure, soil density and types of geogrids on Soil-Geogrid interaction coefficient. *International, e-Conference "Modern Trends in Foundation Engineering: Geotechnical Challenges and Solutions"*, IITM, India, 2003.
- [32] Marques, J.M.M.C.: Finite element modelling of the pull-out test of geosynthetics. *VIII International Conference on Computational Plasticity*, Barcelona, 2005.
- [33] Moraci, N., Giofrè, D.: A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 24(2), (2006), pp.116-128.
- [34] Abdel-Rahman, A.H., Abdel-Moniem, I. 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.
- [35] Abdelouhab, A., Dias, D., Freitag, N.: Physical and analytical modelling of geosynthetic strip pull-out behaviour, *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010), pp. 44-53.

- [36] Bauer, G. E., Mowafy, Y. M.: The interaction mechanism of granular soils with geogrids, International Conference on Numerical Methods in Geomechanics 6, Innsbruck, (1988), pp.1263-1272.
- [37] Lopes M.L., Lopes M.L. Soil-Geosynthetic Interaction - Influence of Soil Particle Size and Geosynthetic Structure, *Geosynthetics international*, Vol. 6, No. 4, (1999), pp. 261-282.
- [38] Schuettelpelz, C., Fratta, D., Edil, T. B.: Evaluation of the Zone of Influence and Stiffness Improvement from Geogrid Reinforcement in Granular Materials, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Report Numbers:09-2594, (2009), pp. 76-84.
- [39] Tutumluer, E., Huang, H., and Bian, X. (2012). "Geogrid-Aggregate Interlock Mechanism Investigated through Aggregate Imaging-Based Discrete Element Modeling Approach." *Int. J. Geomech.*, 12(4), 391-398.
- [40] Minažek, K., Kojić, Z., Mulabdić, M. Simple procedure of geogrid soil-interaction efficiency assesment, *Tehnički vjesnik-Tehnickal gazette*. 19 (2012), 2; 399-405
- [41] Mulabdić, M., Minažek, K.: Characterization of the Soil-grid Interaction by the Shear Wave Velocity. *GIGSA GeoAfrica 2009 Conference*, Cape Town, 2009.
- [42] Giroud, J. P.: An assessment of the use of geogrids in unpaved roads and unpaved areas *Proceedings of 2009 Geogrid Jubilee Symposium*, 2009 Geogrid Jubilee Symposium, Institution of Civil Engineers, London, 2009.
- [43] <http://www.geofabrics.com.au/documents/Info-Bulletin-Understanding-Radial-stiffness.pdf>, 15.1.2013.
- [44] Sobhi, S. Wu, J.T.H.: An Interface Pullout Formula For Extensible Sheet Reinforcement, *Geosynthetics International*, Vol. 3, (1996) 3, pp. 565-582.
- [45] Mulabdić, M., Minažek, K., Cindrić, M.; Analiza pokusa izvlačenja geomreže iz nekoherentog tla, 4. savjetovanje HGD-a Ojačanje temeljnog tla i stijena, Opatija, (2006). pp. 233-240.
- [46] Bergado, D.T., Teerawattanasuk, C.: Analytical Models for Predicting the Pullout Capacity and Interaction between Hexagonal Wire Mesh and Silty Sand Backfill, *Tamakang Journal of Science and Engineering*, Vol. 4. (2001) 4, pp. 227-238.
- [47] Perkins, S.W., Edens M.Q.: Finite-element modelling of geosynthetic pullout test, *Geotechnical and Geological Engineering* 21, (2003), pp. 357-375.
- [48] Mulabdić, M., Minažek, K.: Testing rib efficiency in geogrids, 9th International Conference on Geosynthetics, Garuja, (2010), pp. 743-746.
- [49] Texeira, S.H.C.: Estudo da interacao solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicacao na analise e dimensionamento de macicos reforçados, Tese apresentada a Escola de Engenharia de Sao Carlos, da Universidade de Sao Paulo, 2003.
- [50] Yan, S., Bar, B.: FEM of soil-geogrid interaction with application to interpret the pull-out behavior of geogrid. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 19 (1997) 6, pp. 56-61.
- [51] Santos, E.C.G.: The use of construction residues and recycled rubble in reinforced soil structures. MSc. Thesis, University of Sao Paulo, 2007.
- [52] Zornberg, J.G., Mitchell, J.K.: Reinforced Soil Structures with Poorly Draining Backfills. Part I: Reinforcement Interactions and Functions, *Geosynthetics International*, Vol. 1(1994) 2, pp. 103-148.
- [53] Hossain, M.Z. and Sakai, T. A study on pullout behavior of reinforcement due to variation of water content of soil, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript LW 07 011. Vol. IX. December, 2007.
- [54] Jewell, R.A., Milligan, G.W.E., Sarsby, R.W., Dubois, D.D.: Interactions between soil and geogrids, *Proceedings from the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering*, London, (1985), pp. 18-30.
- [55] Mulabdić, M., Minažek, K.: Nature of friction between geogrids and soil, *Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress*. Proceedings Vol 4. Topic 5: Soil improvement and reinforcement, Valencia (2012), pp. 435-440.
- [56] Dyer, M.R.: Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement, PhD. Thesis, University of Oxford, UK., 1985.
- [57] Becker, L.B.: Geogrid behaviour in reinforced soil walls and in pull-out tests, PhD. Thesis, Pontifical University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 322 p. (in Portuguese), 2006.
- [58] Mohiuddin A.: Analysis of Laboratory and Field Pull-out Tests of Geosynthetics in Clayey soils, A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, B.E., Osmania University, 2001.
- [59] 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 Vol. 118, No. 7, (1992), pp. 1047-1063..
- [60] Alfaro M.C., Hayashi S., Miura N., Watanabe K.: Pullout Interaction Mechanism of Geogrid Strip Reinforcement. *Geosynthetics International*, Vol. 2, No. 4 (1995), pp. 679-698.
- [61] Aydogmus, T., Klapperich, H. Three-Dimensional Numerical Parametric Analysis of Soil-Geosynthetic-Interaction, *EuroGeo4*, Edinburgh, paper number 171.2008.
- [62] Rimoldi, P., Ricciuti, A., Recalcati, P.: Tenax geosynthetics technical literature, Design manual: Steep reinforced slopes, Viganò, 1994.
- [63] Montanelli, F., Recalcati, P.: Design Manual: The design of reinforced soil retaining walls using Tenax geogrids, Viganò, 2003.
- [64] BBA technical approvals for construction, inspection, testing, certification: Agrément Certificate 05/4266, Fortrac R geogrids, Watford Herts, UK, 2008.
- [65] BBA technical approvals for construction, inspection, testing, certification: Agrément Certificate 99/R109, Tensar RE and RE500 geogrids for reinforced soil retaining wall and Bridge abutment systems, Watford Herts, UK, 2010.
- [66] http://www.tencate.com/amer/Images/tn_slopes_tcm29-9119.pdf, (1.10.2012.)
- [67] German Geotechnical Society Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo, Erns & Sohn A Wiley Company, Berlin, 2011.
- [68] Cox, B.R., McCartney, J.S., Curry, B., Wood, C.M, Young, C.: In-situ Strain Measurement during Dynamic Shear Loading of An Unbound Geogrid Reinforced Pavement Section, *Proceedings Eighth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields*, Champaign, Illinois, USA, 2009.