

Određivanje nedrenirane čvrstoće pomoću pokusa padajućeg šiljka

Luka Pušić¹, izv.prof.dr.sc. Danijela Jurić Kačunić²

¹ Centar Građevinskog fakulteta d.o.o., lpusic@grad.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, djk@grad.hr

Sažetak

Nedrenirana čvrstoća (eng. *undrained shear strength*) od velike je važnosti u grani geotehnike. Možemo ju definirati kao najveće posmično naprezanje u trenutku sloma tla, u uvjetima relativno brze promjene opterećenja, kod kojeg nije došlo do promjene vlažnosti tla. Cilj rada je uspostava veze između nedrenirane čvrstoće dobivene laboratorijskim ispitivanjem pokusom padajućeg šiljka (HRS CEN ISO/TS 17892-6) sa vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobivenih iz izraza u korelaciji s indeksom tečenja i drugim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.

Ključne riječi: nedrenirana čvrstoća, pokus padajućeg šiljka, indeks tečenja

Determination of undrained shear strength using fall-cone device

Abstract

The undrained shear strength is of great importance in the field of geotechnics. It can be defined as the greatest torsional stress at the moment of soil breakdown, under relatively rapid load change conditions, when no change in soil moisture occurs. The aim of the paper is to establish the link between the undrained shear strength obtained by the laboratory fall cone test (HRS CEN ISO / TS 17892-6) and the values of undrained shear strength obtained from the expression, in correlation with the liquidity index and other laboratory and field tests.

Key words: undrained shear strength, fall cone test, liquidity index

1 Uvod

Nedrenirana čvrstoća tla (eng. undrained shear strength, c_u) definirana je kao najveće posmično naprezanje u trenutku sloma tla, u uvjetima relativno brze promjene opterećenja, kod kojeg nije došlo do promjene vlažnosti tla. Takvi uvjeti se često pojavljuju kod izvedbe standardnih geotehničkih zahvata u sitnozrnim tlima male propusnosti, kod kojih ne može doći do značajne promjene količine vode u porama tla. Nedrenirana čvrstoća se određuje raznim laboratorijskim (pokus padajućeg šiljka, pokus jednoosnog tlaka, nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus) i terenskim ispitivanjima (krilna sonda, CPT). Tablica 1. prikazuje klasifikaciju tla prema vrijednostima nedrenirane čvrstoće prema HRN EN ISO 14688-2. Iz tablice je vidljivo kako se vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala kreću od ekstremno niskih (< 10 kPa) do ekstremno visokih (> 300 kPa).

Tablica 1. Vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala prema HRN EN ISO 14688-2

Nedrenirana čvrstoća	c_u [kPa]
Ekstremno niska	< 10
Vrlo niska	10 - 20
Niska	20 - 40
Srednja	40 - 75
Visoka	75 - 100
Vrlo visoka	150 - 300
Ekstremno visoka	> 300

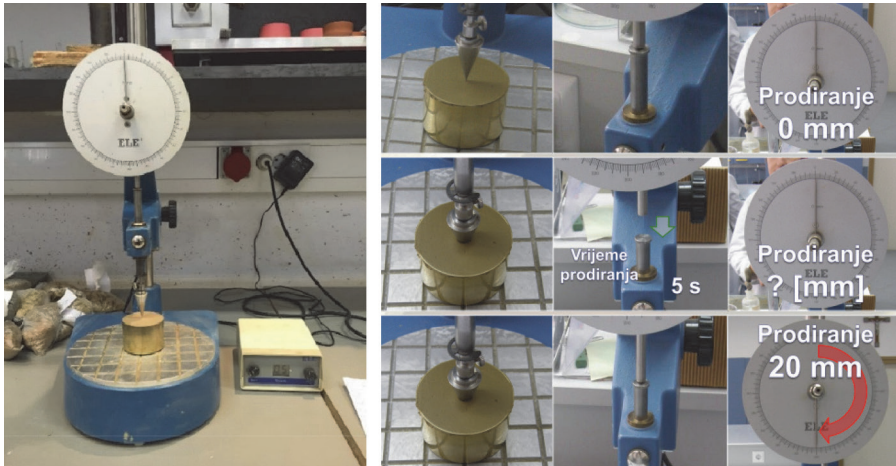
Materijali koji imaju posmičnu čvrstoću veću od 300 kPa ponašaju se kao slabije stijene i prema HRN EN ISO 14688-2 trebali bi se opisivati kao stijene.

Pokus padajućeg šiljka (slika 1.) je osmišljen za određivanje čvrstoće potpuno kohezivnih tala Skandinaviji (Swedish State Railways, 1922.). Prvo značajnije istraživanje određivanja nedrenirane čvrstoće tla pokusom padajućeg šiljka proveo je Hensbo (1957.). Zaključio je da je nedrenirana čvrstoća tla proporcionalna težini šiljka i obrnuto proporcionalna kvadratu dubine prodiranja šiljka. Hensbo je razvio izraz za nedreniranu čvrstoću na temelju numeričkih i eksperimentalnih analiza:

$$c_u = c \frac{mg}{i^2} \quad (1)$$

gdje je:

- c – konstanta šiljka
- m – masa šiljka
- g – ubrzanje gravitacije
- i – dubina prodiranja šiljka.



Slika 1. Pokus padajućeg šiljka

Tijekom povijesti mnogi su znanstvenici pokušali definirati vrijednost konstante šiljka za šiljke od 30° i 60° . Hansbo je definirao da je konstanta šiljka za neporemećeno tlo za šiljak s kutom od 30° između 0.8 i 1.0, a za šiljak s kutom od 60° između 0.2 i 0.25. Karlson je dobio vrijednosti konstante za šiljak s kutom od 30° između 0.7 i 0.86, te za šiljak pod kutom od 60° između 0.25 i 0.35. Wood je nakon eksperimenata na neporemećenim uzorcima zaključio da su vrijednosti konstante šiljka s kutom od 30° 0.85 i za šiljak s kutom od 60° 0.29. Takve vrijednosti se i danas koriste. Mnogi znanstvenici su svojim ispitivanjima došli do izraza za nedreniranu čvrstoću u korelaciji s indeksom tečenja. Indeks tečenja predstavlja mjeru konzistencije tla i čvrstoće tla pri određenoj vlažnosti:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = 1 - I_c \quad (2)$$

gdje je:

- w - vlažnost tla [%]
- w_p - granica plastičnosti [%]
- w_L - granica tečenja [%]
- I_c - indeks konzistencije.

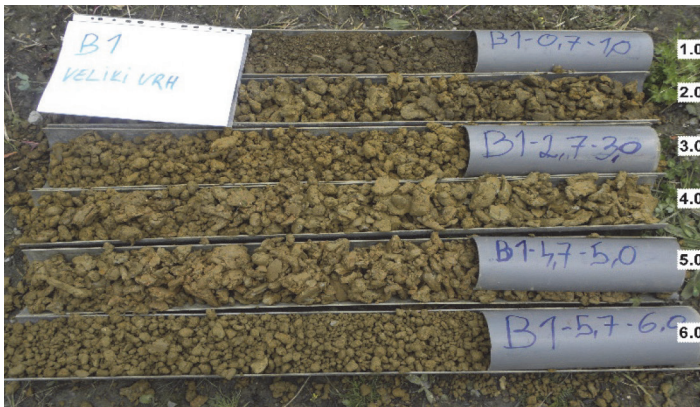
U tablici 2. prikazani su dobiveni izrazi navedenih autora za određivanje vrijednosti nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja.

Tablica 2. Izrazi za određivanje vrijednosti nedrenirane čvrstoće u korelaciji sa indeksom tečenja [3]

Autori	Izrazi
Wroth i Wood (1978.)	$c_u = 170 \exp(-4,61 I_L)$ (3)
Hirata i ostali (1990.)	$c_u = 100 \exp(-3,361 I_L + 0,376)$ (4)
Yilmaz (2000.)	$c_u = 100 \exp(0,026 - 1,21 I_L)$ (5)
Koumoto i Houlsby (2001.)	$c_u = \exp[(1,070 - I_{LN})/0,217]$ (6)
NGI (2002.)	$c_u = 163,7 \exp(-3,915 I_L)$ (7)
NGI (2002.)	$c_u = 210,3 \exp(-4,413 I_L)$ (7)
Yang i ostali (2006.)	$c_u = 159,6 \exp(-3,971 I_L)$ (8)

2 Eksperimentalni rad

Promatrano istraživano područje nalazi se na južnim padinama planine Medvednice, u području Markuševca, na nadmorskim visinama oko 300 m. Napravljeno je 10 bušotina s ukupno 23 uzorka, i to 6 bušotina s 15 uzoraka s lokacije Veliki Vrh i 4 bušotine s 8 uzoraka s lokacije Kršišće (slika 2. i tablica 3.).



Slika 2. Prikaz uzoraka izvađenih iz istražne bušotine B1 na lokaciji Veliki Vrh

Tablica 3. Prikaz rezultata ispitivanja po bušotinama s lokacije Veliki vrh

Sonda	Dubina [m]	w ₀ [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _P [%]	I _C [%]	I _L [%]	I _{LW} [%]	Prodiranje šiljka [mm]	Nedrenirana čvrstoća c _u [kPa]	Simbol
B 1	0,7-1,0	19,74	51,42	17,58	33,84	0,94	0,06	0,11	1,50	279,04	CH
	2,7-3,0	21,26	55,94	16,07	39,87	0,87	0,13	0,22	2,50	100,45	CH
	4,7-5,0	25,42	77,67	18,20	59,46	0,87	0,12	0,23	2,45	104,60	CH
	5,7-6,0	20,07	62,92	18,19	44,73	0,96	0,04	0,08	0,40	3924,00	CH
B 2	1,7-2,0	28,93	42,67	18,18	24,49	0,56	0,44	0,54	5,10	24,14	CH
	3,7-4,0	27,32	82,68	25,27	57,42	0,96	0,04	0,07	2,50	100,45	CH
	5,7-6,0	30,10	90,20	21,64	30,10	0,88	0,12	0,23	2,20	129,72	CH
B3	1,7-2,0	24,46	63,61	19,16	44,45	0,88	0,12	0,20	0,90	775,11	CH
	3,7-4,0	25,17	60,32	18,32	42,01	0,84	0,16	0,27	2,30	118,68	CH
	5,7-6,0	42,53	85,81	28,52	57,29	0,76	0,24	0,36	3,20	61,31	CH
B4	2,0-2,4	30,08	68,48	27,34	41,14	0,93	0,07	0,10	1,20	436,00	CH
	5,5-6,0	26,55	52,24	24,80	27,45	0,94	0,06	0,09	1,30	371,50	CH
B5	2,0-2,6	32,67	66,83	26,15	40,68	0,84	0,16	0,24	2,90	74,65	CH
	5,5-6,0	30,02	60,72	25,41	35,31	0,87	0,13	0,19	0,70	1281,31	CH
B6	2,0-2,6	28,70	54,02	37,39	26,64	0,95	0,05	0,07	1,60	245,25	CH

Tablica 4. Prikaz rezultata ispitivanja po bušotinama s lokacije Kršišće

Sonda	Dubina [m]	w ₀ [%]	w _L [%]	w _P [%]	I _P [%]	I _C [%]	IL [%]	ILN [%]	Prodiranje šiljka [mm]	Nedrenirana čvrstoća [kPa]	Simbol
B 1	6,0-6,5	35,17	57,87	35,51	22,36	1,02	-0,02	-0,02	1,20	436,00	MH
	7,5-8,0	28,04	48,89	24,46	24,46	0,85	0,15	0,20	2,70	86,12	CL
B 2	2,5-3,0	27,34	51,50	20,38	31,12	0,78	0,22	0,32	1,80	193,78	CH
	5,5-6,0	37,76	55,99	27,09	28,90	0,63	0,37	0,46	3,80	43,48	CH
	7,5-8,0	30,04	50,20	30,42	19,78	1,02	-0,02	-0,03	1,90	173,92	MH
B3	5,5-6,0	27,26	49,83	27,18	22,65	0,99	0,00	0,01	1,60	245,25	CL
	7,5-8,0	29,71	56,88	27,56	29,32	0,93	0,07	0,10	1,60	245,25	CH
B4	4,5-5,0	28,43	58,93	25,22	33,71	0,90	0,10	0,14	1,90	173,92	CH

Vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivene pokusom padajućeg šiljka su uspoređene s vrijednostima nedrenirane čvrstoće dobivene izrazima u korelaciji s indeksom tečenja. Vidljivo je da postoje određena odstupanja od vrijednosti dobivenih izrazima u korelaciji s indeksom tečenja. Razlog odstupanja možemo tražiti u osjetljivosti uređaja te neiskustvu vršitelja pokusa.

Tablica 5. Prikaz vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka na uzorcima s lokacije Veliki Vrh i usporedba s izrazima za dobivanje nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja

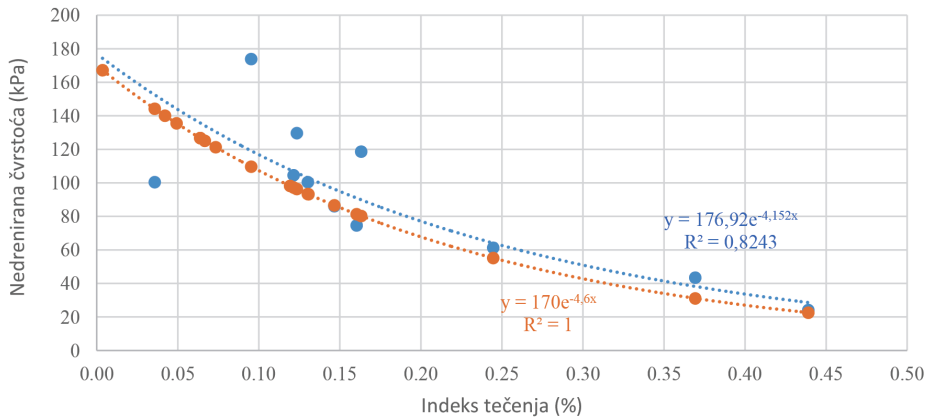
Sonda	Dubina [m]	c_u [kPa]	Wroth i Wood (1978.) [kPa]	Hirata i ostali (1990.) [kPa]	Yilmaz (2000.) [kPa]	Koumoto i Houslsby (2001.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	Yang i ostali (2006.) [kPa]
B 1	0,7-1,0	279,04	126,75	117,52	95,01	84,21	127,50	161,43	123,87
	2,7-3,0	100,45	93,41	94,03	87,68	49,25	98,34	122,64	95,19
	4,7-5,0	104,6	97,25	96,85	88,61	47,93	101,77	127,17	98,56
	5,7-6,0	3924,00	140,11	126,46	97,55	96,12	138,86	176,69	135,07
B 2	1,7-2,0	24,14	22,57	33,31	60,34	11,26	29,36	34,12	27,94
	3,7-4,0	100,45	144,25	129,17	98,29	102,27	142,34	181,38	138,51
	5,7-6,0	129,72	96,37	96,20	88,40	47,73	100,98	126,13	97,79
B 3	1,7-2,0	775,11	98,23	97,56	88,85	54,22	102,64	128,32	99,42
	3,7-4,0	118,68	80,28	84,18	84,25	40,55	86,45	107,00	83,53
	5,7-6,0	61,31	55,2	64,02	76,35	26,03	62,84	76,35	60,45
B 4	2,0-2,4	436	125,14	116,43	94,69	85,76	126,13	159,59	122,52
	5,5-6,0	371,5	126,78	117,54	95,01	90,84	127,53	161,47	123,9
B 5	2,0-2,6	75,65	81,33	84,99	84,54	46,41	87,41	108,26	84,47
	5,5-6,0	1281,31	93,25	93,91	87,64	57,34	98,19	122,44	95,05
B 6	2,0-2,4	245,25	133,57	123,45	96,7	100,87	135,02	171,53	131,29

Tablica 6. Prikaz vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka na uzorcima s lokacije Kršiče i usporedba s izrazima za dobivanje nedrenirane čvrstoće u korelaciji s indeksom tečenja

Sonda	Dubina [m]	c_u [kPa]	Wroth i Wood (1978.) [kPa]	Hirata i ostali (1990.) [kPa]	Yilmaz (2000.) [kPa]	Koumoto i Houslsby (2001.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	NGI (2002.) [kPa]	Yang i ostali (2006.) [kPa]
B 1	6,0-6,5	436	186,38	155,77	105,15	151,66	177,03	228,47	172,79
	7,5-8,0	86,12	86,64	89,00	85,96	55,81	92,23	114,60	89,20
B 2	2,5-3,0	193,78	60,76	68,68	78,30	32,15	68,20	83,26	65,68
	5,5-6,0	43,48	31,11	42,11	65,66	16,83	38,57	45,56	36,85
	7,5-8,0	173,92	186,38	155,77	105,15	155,48	177,03	228,47	172,79
B 3	5,5-6,0	245,25	167,26	143,93	102,20	135,44	161,45	207,25	157,38
	7,5-8,0	245,25	121,33	113,83	93,92	85,90	122,85	155,20	119,29
B 4	4,5-5,0	173,92	109,70	105,75	91,46	72,27	112,76	141,74	109,36

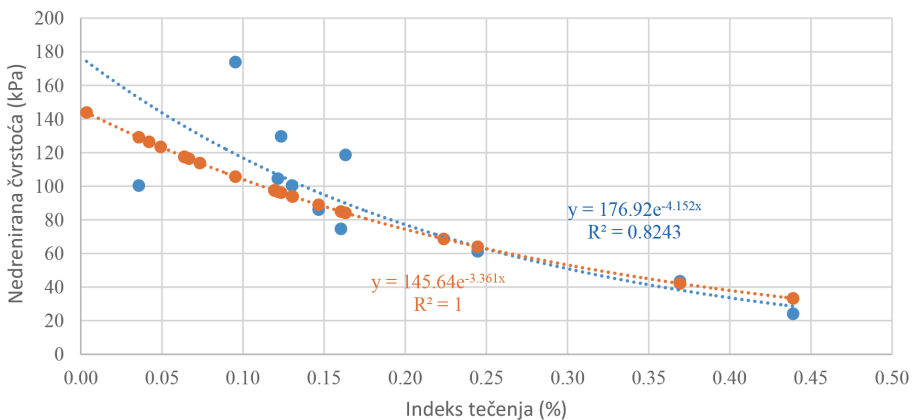
Uzimajući u obzir mogućnost pogreške, ako se iz tablica 5. i 6. odbace vrijednosti koje pokazuju velika odstupanja u vrijednostima nedrenirane čvrstoće u odnosu na vrijednosti nedrenirane čvrstoće sitnozrnih tala prema HRN EN ISO 14688-2 (tablica 1.), dobivaju se zadovoljavajući rezultati.

Slika 3. pokazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Wroth i Wood, 1978.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



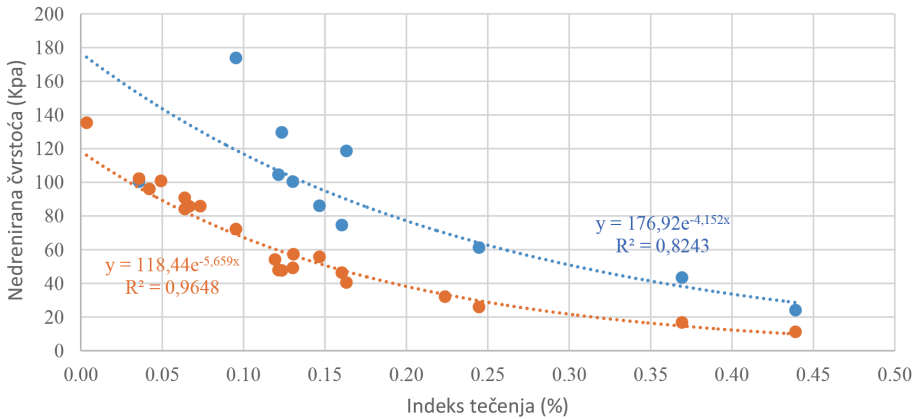
Slika 3. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [5]

Slika 4. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja Hirata i ostali (1990.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



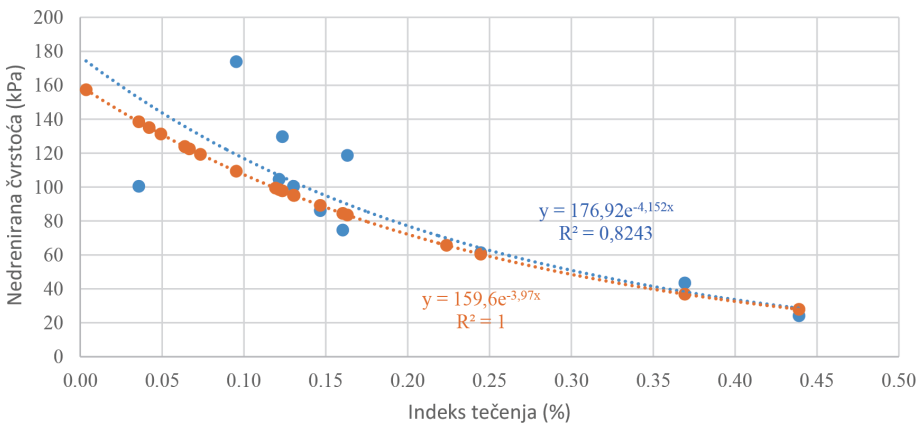
Slika 4. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [2]

Slika 5. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Koumoto i Houlsby, 1990.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



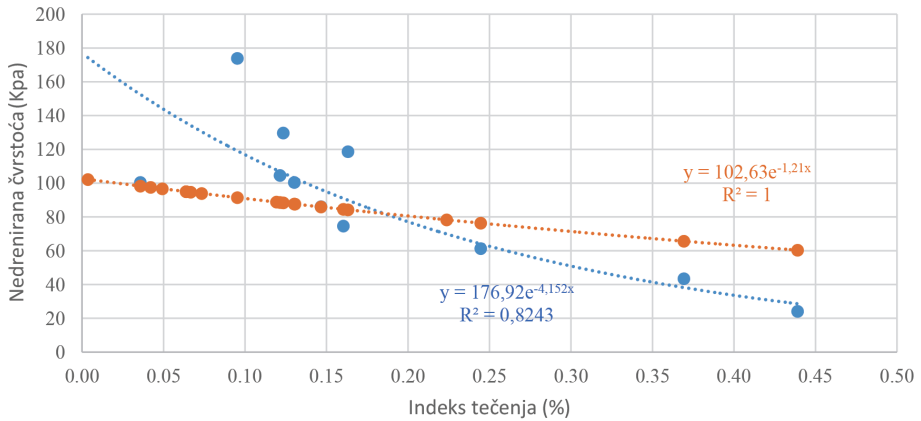
Slika 5. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [3]

Slika 6. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Yang i ostali, 2006.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



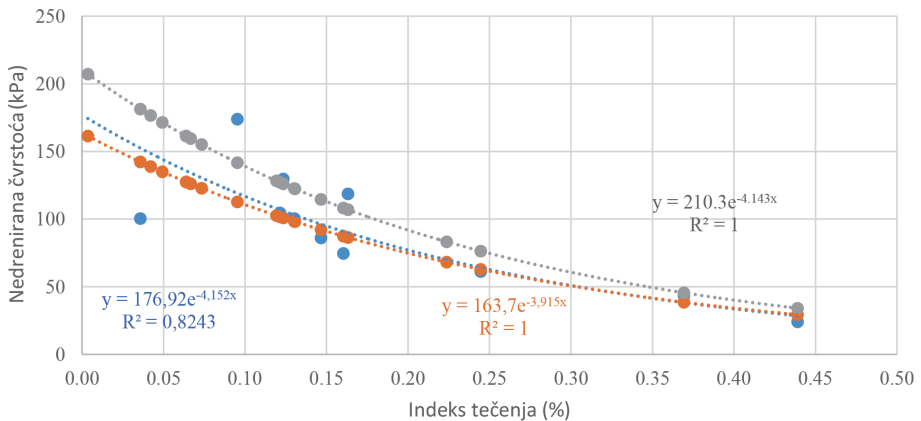
Slika 6. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [6]

Slika 7. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (Yilmaz, 2000.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



Slika 7. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [7]

Slika 8. prikazuje usporedbu vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja (NGI, 2002.) nakon odbacivanja rezultata s velikim odstupanjem.



Slika 8. Usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivenih pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima u korelaciji s indeksom tečenja [4]

Na osnovi rezultata može se zaključiti da najpreciznije rezultate za izračun nedrenirane čvrstoće na lokacijama Veliki Vrh i Kršišće daje izraz prema NGI s odstupanjem od 64,13 kPa.

3 Zaključak

Cilj rada je usporedba vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivene pokusom padajućeg šiljka s vrijednostima dobivenim preko korelacija s indeksom tečenja. U radu se pokazalo da postoji određeni broj uzoraka koji su se zbog velikog odstupanja rezultata dobivenih nedreniranih čvrstoća morali odbaciti (odbačeno je 9 od 25 uzoraka). Razlog velikog odstupanja kod nekih uzoraka možemo tražiti u neiskustvu ispitivača ili osjetljivosti uređaja. Za bolje i preciznije rezultate bilo bi preporučljivo koristiti ostale metode za određivanje nedrenirane čvrstoće kao što su krilna sonda, pokus jednoosnog tlaka, nekonsolidirani nedrenirani troosni pokus, CPT. To ujedno može biti daljnji smjer istraživanja. Najbolje rezultate za područje ispitivanja pokazale su vrijednosti dobivene prema izrazu NGI, a najlošije rezultate pokazale su vrijednosti dobivene prema izrazu Koumotoa i Houlsbya.

Literatura

- [1] Jurić Kačunić, D.: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Geotehnički laboratorij, 10. predavanje – Nedrenirana čvrstoća
- [2] Hirata, S., Yao, S., Nishida, K.: Multiple regression analysis between the mechanical and physical properties of cohesive soils. *Soils and Foundations*, 10 (1990) 3, pp. 91-108.
- [3] Koumoto, T., Houlsby, G.T.: Theory and practice of the fall cone test., *Geotechnique*, 51 (2001) 8, pp. 701-712.
- [4] NGI: Early soil investigations for Fast track projects. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Report 521553, 2002.
- [5] Wroth, C.P., Wood, D.M.: The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (1978) 2, pp. 137-145.
- [6] Yang, S.L., Kvalstad, T., Forsberg, C.F.: Parameter studies of sediment in the Storegga Slide region, *Geo-Marine Letters*, 26 (2006) 4, pp. 213-224.
- [7] Yilmaz, I.: Evaluation of shear strength of clayed soils by using their liquidity index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59 (2000) 3, pp. 227-229.
- [8] Hrvatski zavod za norme, Geotehničko istraživanje i ispitivanje -- Identifikacija i klasifikacija tla -- 2. dio: Načela klasifikacije (ISO 14688-2:2004; EN ISO 14688-2:2004), 2004.