

Mlazno injektiranje – Projektiranje u uvjetima nesigurnosti

Jet grouting – Designing in uncertainty conditions

Ivan Arapov, Građevinski fakultet Zagreb, arapovi@grad.hr

Mladen Cvetković, Građevinski fakultet Zagreb, mcvetkovic@grad.hr

Meho-Saša Kovačević, Građevinski fakultet Zagreb, msk@grad.hr

Sažetak

Mlazno injektiranje je tehnološki postupak poboljšanja tla kojim se određeni volumen tla pretvara se u zemljani mort pri čemu se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza tekućine. Istovremeno se čestice tla miješaju s cementnom suspenzijom i zapunjuju zahvaćeni prostor. Promjer razarajućeg djelovanja mlaza u tlu kreće se do 5,0 m u ovisnosti o vrsti tla, načinu izvođenja i primjenjenoj tekućini.

Mlazno injektiranje ima veoma široku primjenu u geotehnici. Koristi se, između ostalog, za poboljšanje mehaničkih karakteristika tla, ojačanje postojećih temelja, izvedbu vododrživih zavjesa i brtvljenje dna građevnih jama, izvedbu potpornih konstrukcija te osiguranje iskopa kod izvedbe i sanacije tunela. Složeno stanje naprezanja i interakcija mlazno-injektiranih elemenata i okolnog tla kod ovakvih konstrukcija značajno otežavaju modeliranje mehaničkog ponašanja tla poboljšanog mlaznim injektiranjem. Zbog toga se prilikom projektiranja često ne raspolaže sa dovoljno informacija da bi se mogao postaviti matematički model i prognozirati vjerojatni rezultat što znači da se projektiranje provodi u uvjetima neizvjesnosti odnosno rizika.

Jedan od glavnih izvora rizika kod primjene mlaznog injektiranja je procjena mehaničkih karakteristika novonastalog materijala koje će se koristiti prilikom projektiranja. U radu su na primjeru temeljenja poslovno-proizvodnih građevina "Radin Aktiva" u Sv. Nedelji identificirani i analizirani izvori rizika koji se pojavljuju kod projektiranja temeljenja na tlu poboljšanom mlaznim injektiranjem te date smjernice i preporuke za smanjenje odnosno kontrolu rizika u takvim geotehničkim zahvatima.

Ključne riječi: poboljšanje tla, mlazno injektiranje, rizik, temeljenje

Abstract

Jet grouting is a technological procedure of soil improvement in which a determined soil volume is turned into earthen mortar. The procedure involves crushing of soil structure by means of highly powered liquid jet. At the same time soil particles are being mixed with cement suspension and fill the space. A diameter of crushing jet action in the soil ranges up to 5,0 m depending on the soil type, type of procedure and applied liquid.

Jet grouting is widely applied in geotechnical engineering. In addition to other uses, it is implemented for to improve mechanical characteristics of the soil, to reinforce existing foundations, to erect watertight curtains and seal the construction pits, to build support structures and safeguard the excavation in tunnel construction and rebuilding. A complex condition of stressing and interaction of jet grouting elements and surrounding soil make the modelling of mechanical soil performance improved through jet grouting significantly more difficult. For this reason, there is no enough information during design to establish a mathematical model and forecast a probable outcome, which means that the modelling is carried out in the uncertainty, i.e. risk conditions.

One of the major risk sources in application of jet grouting is the estimation of mechanical characteristics of a newly created material, which will be used in the process of designing. The risk sources have been identified and analyzed on the example of foundation works for the business and production facilities "Radin Aktiva" in Sv. Nedelja. Such risk sources occur in design of foundation works on the soil improved through jet grouting. The guidelines and recommendations are given to decrease, i.e. control the risks in such geotechnical procedures.

Key words: ground improvement, jet grouting, risk, foundation

1. Uvod

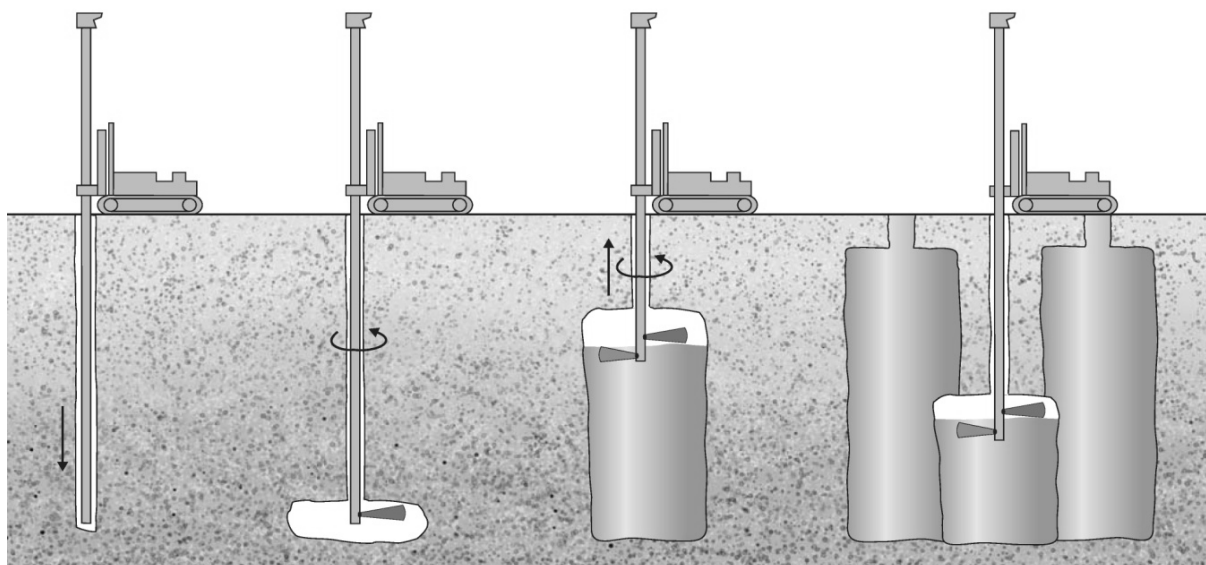
Mlazno injektiranje je tehnološki postupak poboljšanja tla kojim se određeni volumen tla pretvara se u zemljani mort pri čemu se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza tekućine. Kao takvo ima vrlo široku primjenu u geotecnici. Koristi se, između ostalog, za poboljšanje mehaničkih karakteristika tla, ojačanje postojećih temelja, izvedbu vododrživih zavjesa i brtvljenje dna građevnih jama, izvedbu potpornih konstrukcija te osiguranje iskopa kod izvedbe i sanacije tunela. Složeno stanje naprezanja i interakcija mlazno-injektiranih elemenata i okolnog tla kod ovakvih konstrukcija značajno otežavaju modeliranje mehaničkog ponašanja tla poboljšanog mlaznim injektiranjem. Zbog toga se prilikom projektiranja često ne raspolaže sa dovoljno informacija da bi se mogao postaviti matematički model i prognozirati vjerojatni rezultat što znači da se projektiranje provodi u uvjetima neizvjesnosti odnosno rizika. Jedan od glavnih izvora rizika kod primjene mlaznog injektiranja je procjena mehaničkih karakteristika novonastalog materijala koje će se koristiti prilikom projektiranja. U radu su na primjeru temeljenja poslovno-proizvodnih građevina "Radin Aktiva" u Sv. Nedelji, a na osnovu ispitivanja uzoraka mlazno injektiranih stupnjaka, identificirani i analizirani izvori rizika koji se pojavljuju kod projektiranja temeljenja na tlu poboljšanom mlaznim injektiranjem te date smjernice i preporuke za smanjenje odnosno kontrolu rizika u takvim geotehničkim zahvatima.

2. Poboljšanje tla mlaznim injektiranjem

Mlazno injektiranje, engl. jet grouting, je metoda poboljšanja tla kojom se određeni volumen tla pretvara se u zemljani mort pri čemu se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza tekućine. Istovremeno se čestice tla miješaju s cementnom suspenzijom i zapunjuju zahvaćeni prostor. Višak nastale mješavine izlazi uz stijenke bušotine na površinu. Promjer razarajućeg djelovanja mlaza u tlu kreće se do 5,0 m u ovisnosti o vrsti tla, načinu izvođenja i primjenjenoj tekućini.

Primjenu mlaznog injektiranja može se svrstati u tri glavne kategorije: podupiranje i zaštita iskopa, privremena ili trajna stabilizacija mekih tala, te kontrola podzemne vode i onečišćenja. Mlazno injektiranje se uspješno primjenjuje u svim vrstama tla, uključujući i glinu te organske slojeve. Također se može koristiti i u stjenovitom tlu, kao na primjer u mekanim pješčenjacima.

Postupak izvođenja mlaznog injektiranja provodi se kroz 4 glavne faze: bušenje, rezanje, injektiranje i proširenje (Slika 3.). Bušenje tla vrši se bušačim šipkama s nosačem mlaznica i bušačom krunom. U pravilu mlaz injekcijske smjese podupire sam postupak i održava stijenke bušotine oko šipki radi lakšeg povrata suspenzije za bušenje. Za bušenje kroz zidove i beton koriste se specijalne bušaće krune. Razaranje strukture tla započinje na najdubljem dijelu predviđenog stupnjaka pod kutem od 90° u odnosu na bušaću os, pomoću visoko energetskog tekućeg mlaza. Višak smjese, tj. zemljanog morta (*voda-tlo-cement*) teče uz prstenasti otvor bušotine na površinu.



Slika 3. Redoslijed izvođenja mlaznog injektiranja

Unaprijed određeni parametri rada stalno se kontroliraju. Kod svih vrsta postupaka, istovremeno sa razaranjem tla, dodaje se cementna suspenzija pod pritiskom koja se u području rada (*in-situ*) optimalno miješa, uslijed turbulencija stvorenih samim postupkom. Tako izvedena tijela dostižu gustoću od 1400 do 1900 kg/m³ te svojom visokom gustoćom podupiru zapunjeni prostor do vlastitog učvršćenja. Nakon stvrdnjavanja injektirajućeg morta dolazi do ojačanja temeljnog tla koje ima statički povoljna svojstva.

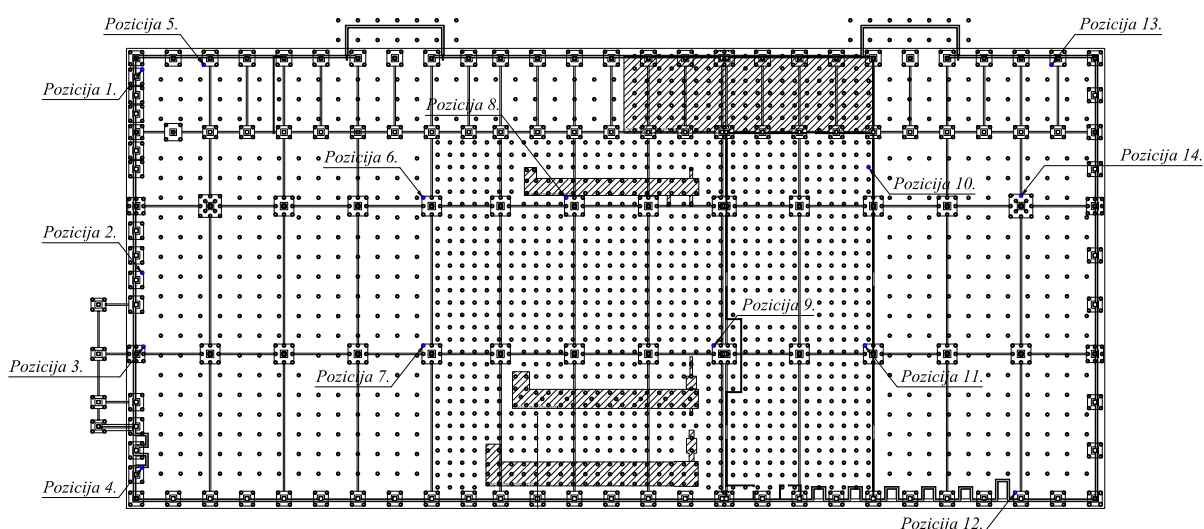
3. Ispitivanje uzoraka mlazno-injektiranih stupnjaka

Na lokaciji u Sv. Nedelji izgrađena je industrijska hala za potrebe tiskare „Radin“. Hala je podijeljena na više područja različitih namjena. Dio hale čine prostori za skladištenje rola papira i grafika, a ostali, veći dio, za smještaj velikih strojeva (*težine do 300t*). Glavna konstrukcija hale temeljena je na temeljnim stopama, a skladišta i strojevi na temeljnim pločama različitih debljina. Geotehničkim elaboratom utvrđeno je tlo slabe nosivosti i male krutosti (*Tablica 1.*). Zbog velikih opterećenja, zahtjeva od proizvođača strojeva na što manja ukupna i diferencijalna slijeganja, a na osnovu proračuna pokazalo se potrebnim poboljšati temeljno tlo.

Tablica 1. Geotehnički parametri tla

Materijal	z	M _s	γ'	c	φ
	[m]	[MPa]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]
Humus	0-0.3	-	-	-	-
CH	0.3-2	4	19	25	25
CH ₁	2-3	2.5	19	15	28
OH/Pt	3-5	0.5	19	10	15
CH ₁	5-6	2.5	10	15	28
GP/GW	6-10	25	10	0	34

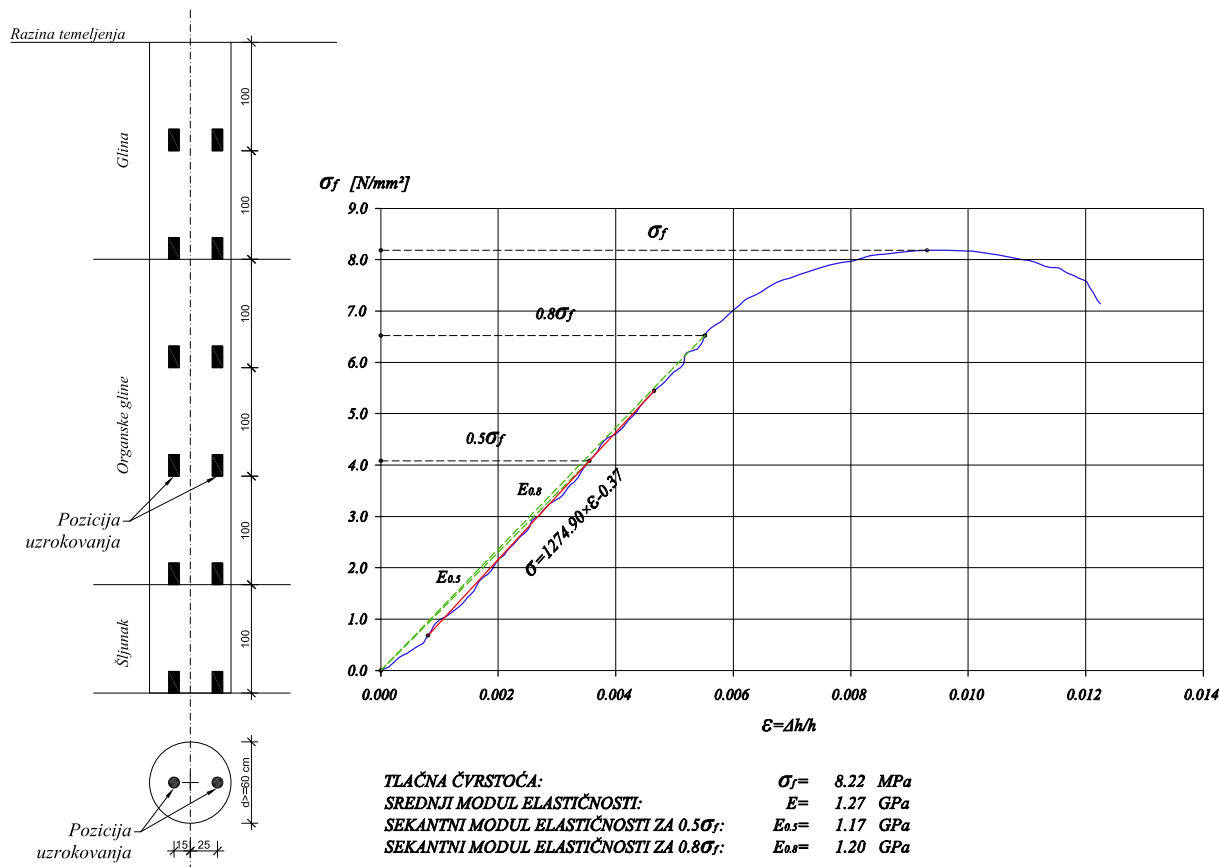
Kao metoda poboljšanja tla odabran je jednofluidni postupak mlaznog injektiranja. Na osnovu proračuna odabrani su stupnjaci duljne 5-7m, na rasteru 2.5 do 4m (*Slika 4.*). Projektom očekivani dijamentar stupnjaka iznosi $d=0.6\text{m}$, a količina ugrađenog cementa u metar dužni stupnjaka iznosi 200 kg/m' . Te dimenzije, raster, očekivani dijamentar stupnjaka, te količina cementa omogućili su dobivanje krutosti tla koje zadovoljavaju tražene uvjete postavljene od strane proizvođača strojeva [1].



Slika 4. Tlocrtna dispozicija mlazno-injektiranih stupnjaka sa pozicijama uzrokovanja

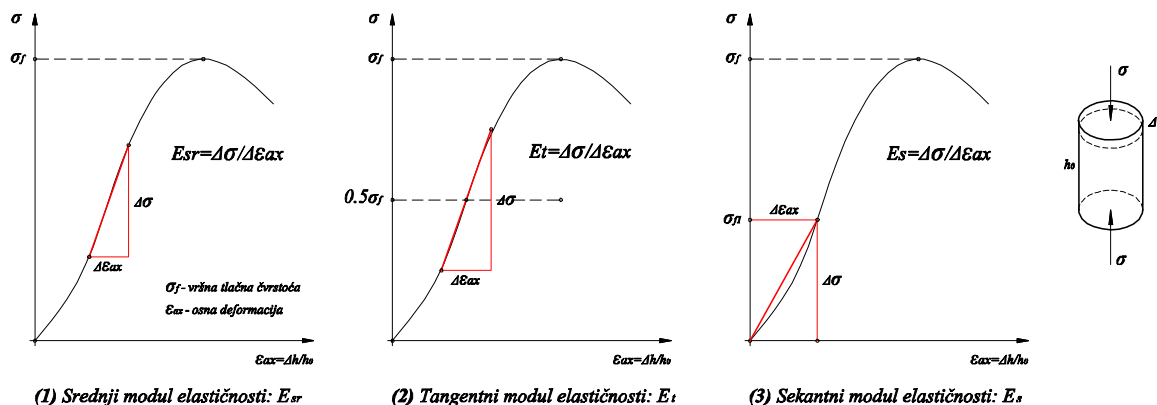
Kao što je prije navedeno kvaliteta izvedenog stupnjaka ovisi o vrsti tla, količini cementnog dijela u masi ojačanog tla, te o tipu mlaznog injektiranja. Prema dostupnim literaturama vršna tlačna čvrstoća injektiranog tijela je u opsegu 0.5-30 MPa [2], dok modul elastičnosti iznosi od 1.5-15 GPa [3].

Radi provjere ulaznih parametara proračuna izvađeno je 14 uzoraka iz mlazno-injektiranih stupnjaka sa različitim dubinama. Na svaki metar dužni stupnjaka uzeta su po dva uzorka (Slika 4. i 5.). Na istima su provedena ispitivanja u preši radi dobivanja vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće i modula elastičnosti (Slika 5.) [4].



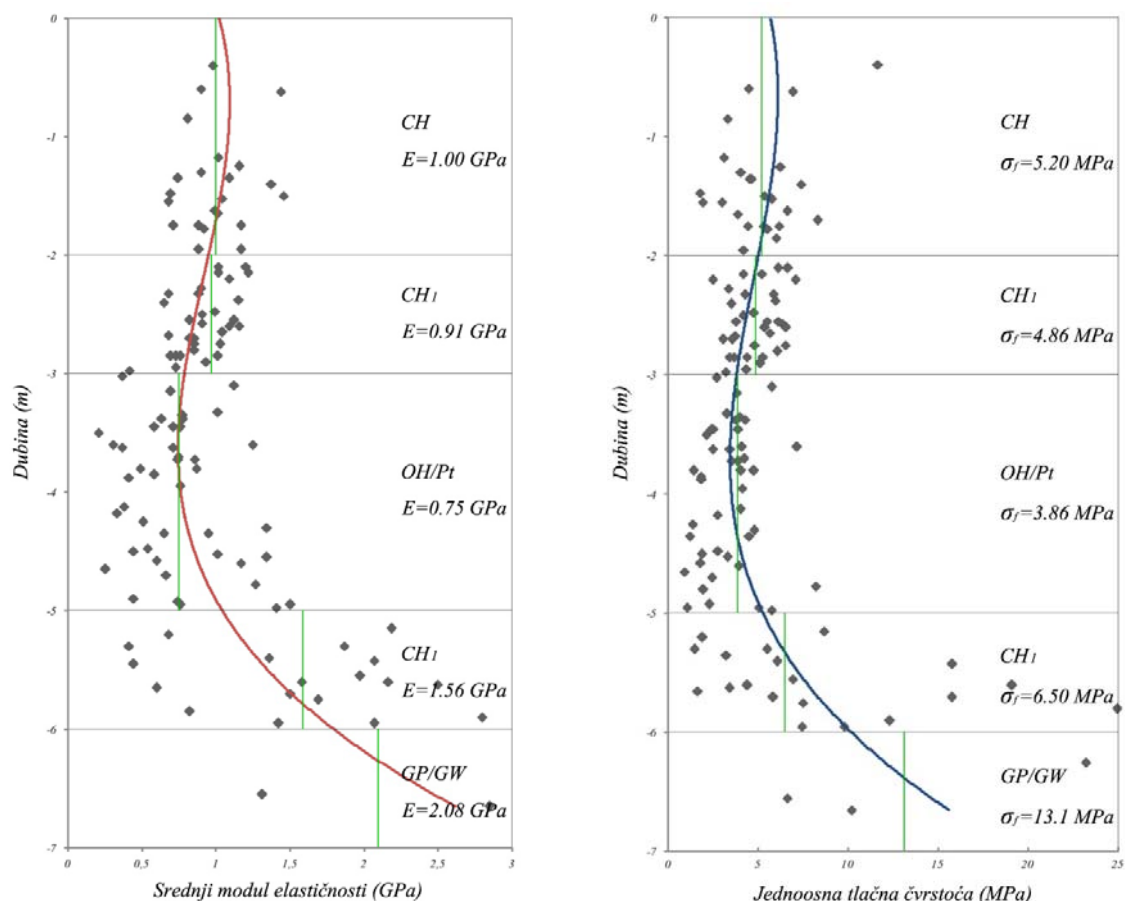
Slika 5. Način vađenja uzoraka iz mlazno-injektiranih stupnjaka i rezultati ispitivanja uzorka sa pozicije 13. iz dubine 4.78m od kote postojećeg terena [4].

Ukupno je izvađeno 156 uzoraka, a od toga su u preši ispitana njih 130. Rezultat ispitivanja je naponsko-deformacijska krivulja. Za svaki od uzoraka, iz naponsko-deformacijske krivulje, isčitani su rezultati vršne tlačne čvrstoće, srednjeg modula elastičnosti te dva sekantna modula elastičnosti za različite vrijednosti vršne čvrstoće (50% i 80%). Načini određivanja ovih parametara prikazani su na slici 6.



Slika 6. Određivanje modula elastičnosti iz naponsko-deformacijske krivulje

Na slici 7. Prikazani su podaci o vrijednostima srednjeg modula elastičnosti i jednoosne tlačne čvrstoće po dubini. Vrijednosti generalno prate krutost tla i općenito se slažu sa podacima ranijih ispitivanja [2] jednoosne tlačne čvrstoće, dok se ista konstatacija ne može prihvatiti za modul elastičnosti koji je, za razliku od prijašnjih ispitivanja [3], oko pet puta manji.



Slika 7. Vrijednost srednjeg modula elastičnosti i jednoosne tlačne čvrstoće po dubini.

Kad se promatraju podaci za pojedini sloj može se primjetiti da se, za prva tri sloja (CH, CH₁ i OH/Pt), podaci ispitivanja generalno nalaze u uskom području, dok kod ostala dva sloja (CH₁ i GP/GW) imamo rasap rezultata u širokom području. To se može objasniti gledajući slike uzoraka za te slojeve, gdje se uočilo da je oko 30% uzoraka sloja gline šljunak i obrnuto. Ta činjenica je u većoj mjeri utjecala na rezultate sloja glina, a u manjoj mjeri na rezultate sloja šljunka (Tablica 2.). Ispitivanja su u velikoj mjeri potvrdila granice (osim za zadnja dva sloja) i materijal slojeva.

Tablica 2. Sumarni rezultati ispitivanja

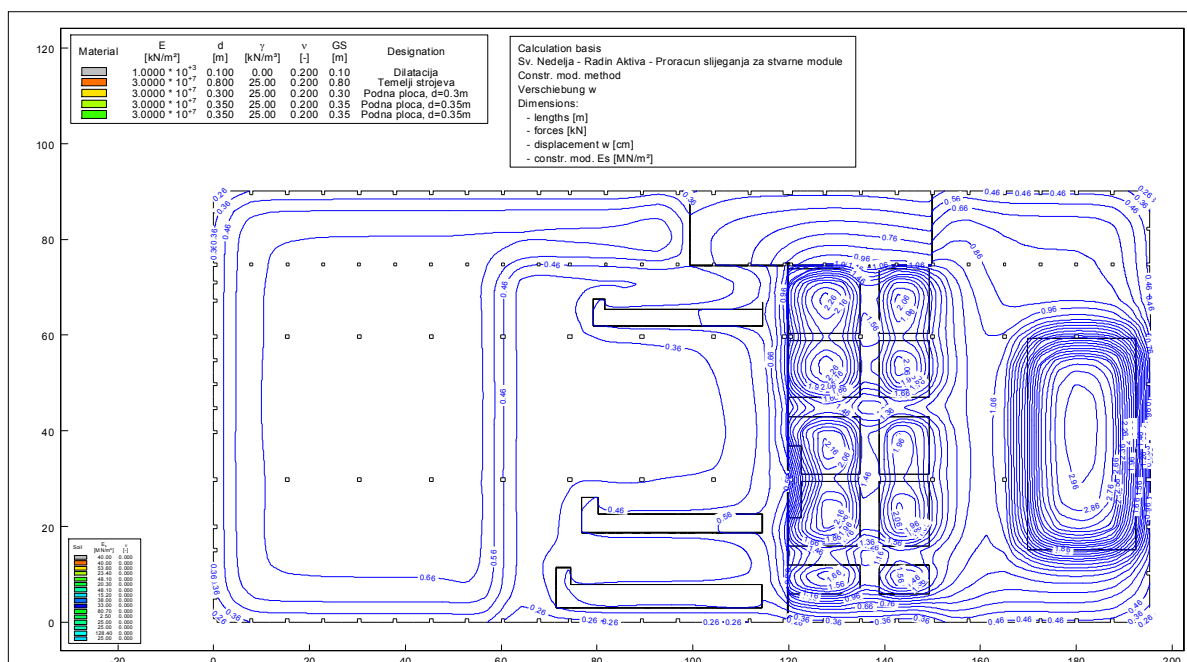
Materijal	z	E	σ_f	M_s	v
	[m]	[GPa]	[MPa]	[GPa]	[-]
Humus	0-0.3	-	-	-	-
CH	0.3-2	1.00	5.20	1.11	0.2
CH ₁	2-3	0.91	4.86	1.01	0.2
OH/Pt	3-5	0.75	3.86	0.83	0.2
CH ₁	5-6	1.56	6.50	1.73	0.2
GP/GW	6-10	2.08	13.1	2.31	0.2

4. Određivanje stvarnih mehaničkih karakteristika poboljšanog tla

Jedan od glavnih izvora rizika kod poboljšanja tla mlaznim injektiranjem je procjena mehaničkih karakteristika novonastalog materijala koje će se koristiti prilikom projektiranja, odnosno određivanje stupnja poboljšanja tla. Naime, vrijednost stupnja poboljšanja novonastalog materijala ovisi o krutosnim karakteristikama materijala stupnjaka i okolnog tla, te o rasteru stupnjaka.

Projektom su definirani stupnjaci duljine 5-7m, rastera 2.5-4.0m, a očekivani dijametar stupnjaka iznosi $d=0.6m$. Projektne mehaničke karakteristike poboljšanog tla uzete su znatno niže od onih preporučenih iz literature [2]. Razlog tome su konzervativni pristup projektiranju i dotadašnja projektantova iskustva na poboljšanju tla mlaznim injektiranjem [5, 6]. Na osnovu rezultata ispitivanja (*Tablica 2.*) definirani su za svaki sloj parametri tla nakon poboljšanja. Modul stišljivosti injektiranog tijela se izračunao usvajajući Poissonov koeficijent za takvu vrstu materijala od $\nu=0.2$.

U cilju određivanja stvarnih mehaničkih karakteristika poboljšanog tla provedena je povratna numerička analiza interakcije poboljšanog tla i konstrukcije. Analizom interakcije tla i konstrukcije (*Slika 9.*) analizirani su rezultati ukupnih slijezanja, diferencijalnih slijezanja i momenata u temeljnoj ploči.



Slika 9. Interakcija tla i konstrukcije – konture slijezanja

Analize su pokazale da je slijezanje, korištenjem stvarnog modula stišljivosti, a na osnovu laboratorijskih ispitivanja u preši, manje za 28% od onog u projektu, diferencijalno je manje za 38%, moment u x-smjeru je manji za 43%, a moment u y-smjeru je manji za 22%. Obzirom da je količina armature proporcionalna momentima savijanja, očigledno je da projektni pristup određivanja modula stišljivosti bio izrazito konzervativan i neracionalan.

U tablici 3. prikazani su projektni moduli stišljivosti, stvarni moduli dobiveni povratnom numeričkom analizom i preporučeni moduli stišljivosti iz literature [3]. Vidljivo je da je su projektni moduli stišljivosti injektiranog tijela od 1.66 do 4.62 puta manji od stvarnih modula, a stvarni moduli su od 1.80 do 4.33 puta manji od

preporučenih modula. Projektni moduli stišljivosti kompozita su od 1.66 do 4.62 puta manji od stvarnih modula, a stvarni moduli kompozita su od 1.80 do 4.33 puta manji od preporučenih modula.

Tablica 3. Geotehnički parametri tla prije i poslije poboljšanja

Materijal	Prije poboljšanja		Poslije poboljšanja								
	z [m]	M _{ST} [MPa]	Projektni moduli				Stvarni moduli			Preporučeni moduli [1]	
			M _{SS} [MPa]	M _{SK,4m} [MPa]	M _{SK,2.5m} [MPa]	M _{SS} [MPa]	M _{SK,4m} [MPa]	M _{SK,2.5m} [MPa]	M _{SS} [MPa]	M _{SK,4m} [MPa]	M _{SK,2.5m} [MPa]
Humus	0-0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CH	0.3-2	4	500	12.8	26.4	1100	23.4	53.6	4000	74.6	184.8
CH ₁	2-3	2.5	500	11.3	25.0	1010	20.3	48.1	4000	73.2	183.3
OH/Pt	3-5	0.5	500	9.3	23.1	830	15.2	38.0	1500	27.0	68.3
CH ₁	5-6	2.5	500	11.3	25.0	1730	33.0	80.7	4000	73.2	183.3
GP/GW	6-10	25	500	33.4	46.5	2310	65.4	128.4	10000	201.3	476.3

5. Zaključak

Procjena mehaničkih karakteristika poboljšanog tla predstavlja jedan od glavnih izvora nesigurnosti odnosno rizika kod temeljenja teških građevina na poboljšanom tlu. Posebno je to izraženo kod poboljšanja tla mlaznim injektiranjem. Rizik pogrešne procjene parametara poboljšanog tla može se u potpunosti eliminirati konzervativnim pristupom projektiranju kakav je primjenjen u prikazanom projektu. S druge strane takvo projektiranje vodi ka značajnom povećanju količine armature u temeljnoj ploči odnosno cijene temeljenja objekta. Da bi se upravljalo rizikom kod projektiranja temeljenja na poboljšanom tlu preporuča se izvedba probnih polja reprezentativnog volumena, ispitivanje parametara poboljšanog tla na način kako je prikazano u ovom radu, te projektiranje na temelju tako dobivenih mehaničkih karakteristika poboljšanog tla.

6. Literatura

- [1] Geotehnički projekt temeljenja, 2007. Poslovno-proizvodne građevine, Sv. Nedelja. Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.
- [2] Bell, A.L. 1993. Jet Grouting, Ground Improvement edited by M.P. Moseley, Blackie Academic & Professional, Boca Raton, FL, p. 149 - 174.
- [3] Čorko, D. i dr., 1998. Mlazno injektiranje: prikaz tehnologije i primjene mlaznog injektiranja, Conex, Zagreb.
- [4] Rezultati ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava uzoraka, 2008. Geoexpert d.o.o., Zagreb, Hrvatska.
- [5] Čorko, D. Lovrenčić, D., Kovačević, M.S., 2006. Prikaz primjene mlaznog injektiranja kod sanacije urušenja tunelske kalote, 4. Savjetovanje HGD-a Ojačanje tla i stijena, Opatija, Hrvatska, p. 131-136.
- [6] Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D., Arbanas, Ž., Petrović, N. 2008., Ground Improvement by Jet Grouting Method in St.Kuzam Tunnel – Monitoring of Performance, 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium SHIRMS 2008, Perth, Australia.