

ПРОРАЧУН НОСИВОСТИ ИНЈЕКЦИОНИХ МИКРО-ШИПОВА КРОЗ МОДЕЛОВАЊЕ ЕФЕКТА ИНСТАЛАЦИЈЕ ПРЕМА ТЕОРИЈИ ЕКСПАНЗИОНЕ ПРАЗНИНЕ

Доне Николовски*, Јован Бр. Папић**

* *Геоинг, бул. Митрополит Теодосиј Гологанов 147/III-5, Скопје,
Р. Сев. Македонија, done.nikolovski@gmail.com*

** *Грађевински факултет, бул. Партизански одреди бр.24, Скопје,
Р. Сев. Македонија, papic@gf.ukim.edu.mk*

РЕЗИМЕ

Дубоко темељење на шиповима као метод се користило још у далекој прошлости, с циљем да се у питање не доведе употребљивост објеката. Међу новијим варијантама је и један иновативан начин – на инјекционим микро-шиповима. Захваљујући својим карактеристикама, исти нуди бројне предности, али и буди интерес у истраживачкој фели из геотехнике због изазова са теоријским и нумеричким моделирањем. У раду биће приказан поступак дефинисања прорачуна ултимативне носивости путем симулације ефекта извођења помоћу метода експанзионе празнине.

КЉУЧНЕ РЕЧИ: инјекциони микро-шпорови, моделирање, експанзиона празнина

CALCULATION OF THE BEARING CAPACITY OF INJECTION MICRO-PILES BY MODELING OF THE EFFECT OF THE INSTALLATION THROUGH THE CAVITY EXPANSION THEORY

ABSTRACT

Deep foundation on piles, as a method has been used since ancient times, with main purpose to satisfy the serviceability of the structures. There are many types, among which is also one innovative method on injection micro-piles. Due to its characteristics, it offers many advantages, as well as it has arouse high interest in the research in the field of geotechnics due to challenges with theoretical and numerical modeling. Thereby, it will be defined a new methodology of calculation of the ultimate bearing capacity of these piles, by simulation the effect of installation through the theory of cavity expansion.

KEY WORDS: injection micro-piles, modeling, cavity expansion

УВОД

Препознатљивост инјекционих микро-шипова у односу на тзв. конвенционалне типове дубоког темељења, је са аспекта методологије извођења. Наиме, они се изводе путем тзв. комплетног померања челичне цеви до пројектоване дубине, без вађења материјала тла, након чега се врши инјектирање смеше под високим притиском. Тиме инјекциони притисак експандира у околну средину, чиме се формира геометријска форма микро-шипа. Овако оформљена мешавина тла и инјекционе смеше, заједно са челичном цеви, формира тзв. "*mixed-in-place*" тип микро-шипа. Побивањем челичне цеви у медијум тла, без вађења материјала, а касније и убризгавањем инјекционе смеше под високим притиском, врши се и померање и збијање околне запремине земљаног материјала, чиме се добија веома збијена средина и одлична радна околина шипова, што резултује изузетно великим радним носивостима.

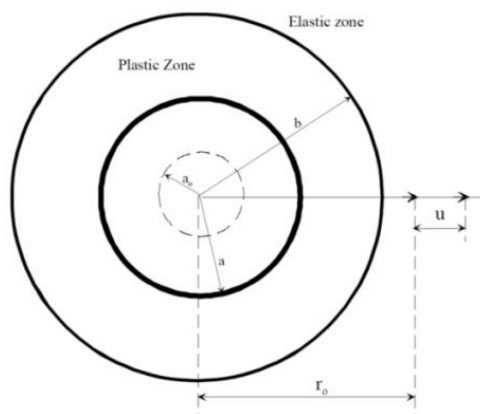


Слика 1. Приказ челичне цеви за бушење са сврдлом и инјекционог микро-шипа, тип *HekPile*
Figure 1. Preview of drilling steel tube with crown and injection micro-pile type *HekPile*

Отуда, може се закључити како моделовање и прорачун носивости ових инјекционих микро-шипова, као и анализа њиховог понашања, не може да се спроведе ако се у обзир не узме ефекат њихове инсталације. Стога, фокус рада је симулација ефекта извођења и повећања напрезања у зонама омотача и испод базе, које се појављују током инсталације. Биће представљен један основни модел прорачуна нових димензија након инјектирања, као и методологија прорачуна ултимативне носивости, да би се затим извршило поређење резултата из прорачунског нумеричког метода (МКЕ), како и теренска мерења пробног оптерећења.

ТЕОРИЈА ЕКСПАНЗИОНЕ ПРАЗНИНЕ

Теорија експанзионе празнине (Eng. Cavity expansion) налази широку примену у индустрији метала, али од 1961. год. често се користи и код апликације проблема повезаних са геотехником. Генерална дефиниција проблема је да постоји празнина са иницијалним радијусом a_0 на коју утиче иницијални *in-situ* ефективни притисак из тла p_0 . Притисак у празнини p постепено расте, при чему цилиндрична празнина добија нове димензије или нови радијус a . Теорија експанзионе празнине је подељена на два дела: експанзиони цилиндар и експанзиона сфера.



Слика 2. Модел цилиндричне експанзије са главним елементима (Yu&Houlsby)
Figure 2. Model of cylindrical expansion with its main elements (Yu&Houlsby)

Тло је дефинисано као хомоген, изотропан, дилатантан, еластичан и идеално пластичан материјал, а лом је представљен *Mohr-Coulomb*-овим критеријумом лома. Конвенција за нотацију је таква да су напрезања на затезање усвојена са позитивним предзнаком, па тако једначина поприма следећи облик:

$$\alpha \sigma_k - \sigma_i = Y \quad (1)$$

За постојеће стање, тотално напрезање мора да буде у равнотежи са потребним граничним условима, датим релацијама (3) и (4). Релација за радијално напрезање, у затвореном облику, биће изржена као:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \frac{r}{m} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \quad (2)$$

$$\sigma_r(a) = -p \quad (3)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r = -p_0 \quad (4)$$

Помоћу теорије експанзионе празнине, поред новонастаналог стања напрезања, могу да се одреде и нове димензије микро-шипа, а у функцији инјекционог притиска на различитим дубинама. Иницијални радијус неопходан за развијање цилиндричне бочне експанзије је, у ствари, радијус челичног сврдла које се надодаје цевима ($a_{0x}=0.075 \text{ cm}$), док је димензија у другом правцу, у бази шипа, висина шилка сврдла којим се врши бушење, неопходна за развијање сферичне експанзије ($a_{0y}=0.075 \text{ cm}$). За апликацију метода експанзионе празнине, при анализи микро-шипа треба навести граничне услове у којима ће он бити валидан. Наиме, пораст притиска p неће моћи да премаши гранични притисак средине p_∞ , која је ограничена анVELOпом лома материјала, што у ствари представља горњу границу. С друге стране, ако је инјекциони притисак испод вредности пасивног притиска на разгледаној дубини, до форсиране деформације уопште неће ни доћи ($p \leq p_p \rightarrow U=0,0 \text{ cm}$). У наставку ће бити приказани резултати за стање напрезања, на неколико разгледаних дубина.

Сферична експанзија на дубини од 10,0 m
 гранични услов:
 инјекциони притисак:
 дефинисани радијус микро-шипа у бази:
 радијус еласто-пластичне зоне:

$$p_{\infty}=2124,9 \text{ kPa} > p_p=747,1 \text{ kPa}$$

$$p=p_{\infty}=2124,9 \text{ kPa}$$

$$a=0,165 \text{ m}, U=a-a_0=0,090 \text{ m}$$

$$b=0,801 \text{ m}$$

Цилиндрична експанзија на дубини од 10,0 m
 гранични услов:
 инјекциони притисак:
 дефинисани радијус микро-шипа на 10,0 m:
 радијус еласто-пластичне зоне:
 коефицијент K:

$$p_{\infty}=747,4 \text{ kPa} > p_p=670,2 \text{ kPa}$$

$$p=0,95 * p_{\infty}=710 \text{ kPa}$$

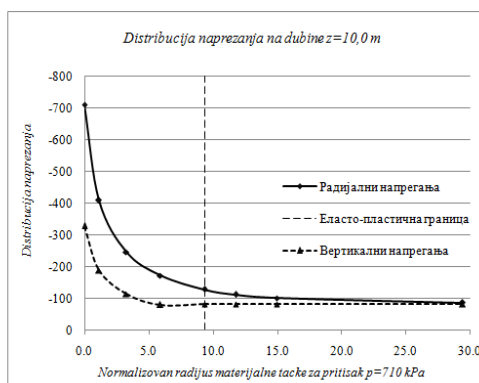
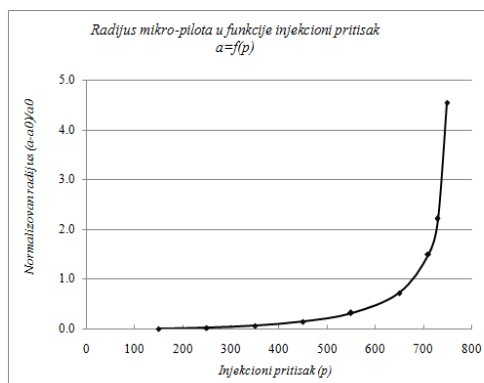
$$a=0,188 \text{ m}, U=a-a_0=0,113 \text{ m}$$

$$b=1,949 \text{ m}$$

$$K=\Sigma F\sigma_r/\Sigma F\sigma_z=453,1/216,8=2,09$$

Табела 1. Промена радијуса микро-шипа a до $p=710$ kPa и стање напрезања
 Table 1. Change of the radius of micro-pile a up to $p=710$ kPa and state of stresses

$r-r_0/r_0$	σ_r	σ_{θ}	σ_z	$a-a_0/a_0$	p	R	a	U	b
(/)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(/)	(kPa)	(/)	(m)	(m)	(m)
0.00	-710.0	-192.4	-328.4	0.00	150	1.162	0.075	0.000	0.093
1.13	-409.3	-110.9	-189.3	0.02	250	1.937	0.077	0.002	0.190
3.26	-246.9	-66.9	-114.2	0.06	350	2.712	0.080	0.005	0.314
14.97	-101.8	-62.2	-82.0	1.49	710	5.502	0.188	0.113	1.949
29.44	-87.5	-76.5	-82.0	4.54	750	5.812	0.418	0.343	4.673



Цилиндрична експанзија на дубини од 9,0 m
 гранични услов:
 инјекциони притисак:
 дефинисани радијус микро-шипа на 9,0 m:
 радијус еласто-пластичне зоне:
 коефицијент K:

$$p_{\infty}=684,4 \text{ kPa} > p_p=594,6 \text{ kPa}$$

$$p=0,90 * p_{\infty}=616 \text{ kPa}$$

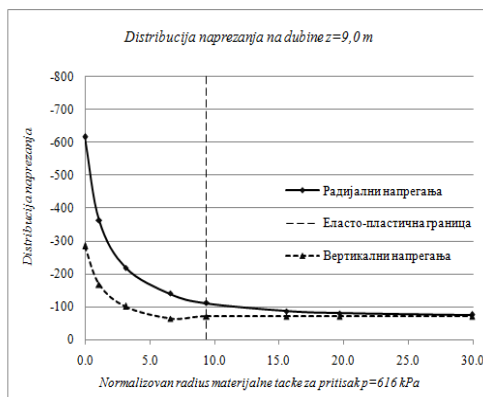
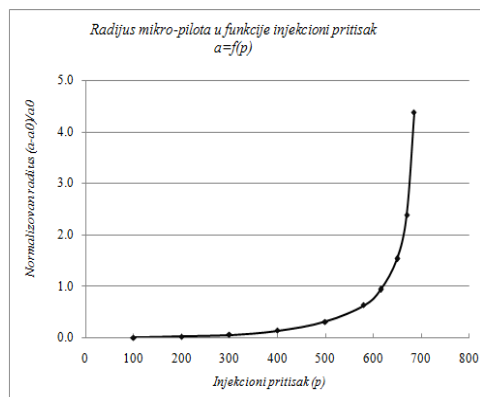
$$a=0,145 \text{ m}, U=a-a_0=0,07 \text{ m}$$

$$b=1,506 \text{ m}$$

$$K=\Sigma F\sigma_r/\Sigma F\sigma_z=304,2/144,6=2,10$$

Tabela 2. Промена радијуса микро-шила a до $p=616$ kPa и стање напрезања
Table 2. Change of the radius of micro-pile a up to $p=616$ kPa and state of stresses

$r-r_0/r_0$	σ_r	σ_θ	σ_z	$a-a_0/a_0$	p	R	a	U	b
(/)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(/)	(kPa)	(/)	(m)	(m)	(m)
0.00	-616.0	-166.9	-285.0	0.00	100	0.893	0.075	0.000	0.064
1.07	-362.8	-98.3	-167.8	0.01	200	1.787	0.076	0.001	0.169
3.13	-218.9	-59.3	-101.3	0.05	300	2.680	0.079	0.004	0.306
19.67	-81.4	-60.9	-71.1	0.93	616	5.504	0.145	0.070	1.506
29.94	-75.7	-66.5	-71.1	4.39	685	6.120	0.405	0.330	4.858



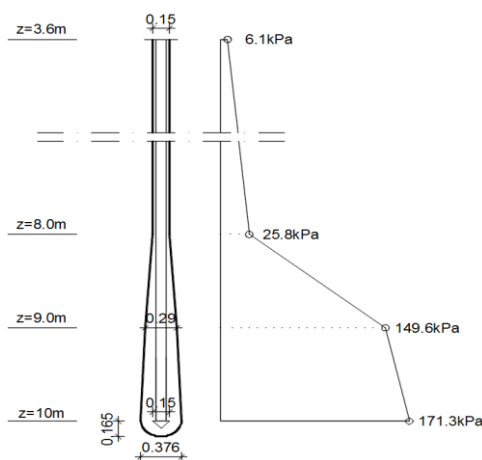
На дубини $z \leq 8,0$ m неће се јавити експанзија, будући да је инјекциони притисак испод доње прописане границе. Дефинисани радијус микро-шила у овом интервалу износиће $a=a_{init}=0,075$ m.

ПРОРАЧУН НОСИВОСТИ ИНЈЕКЦИОНОГ МИКРО-ШИПА

Прорачун носивости шипова, који у великој мери мењају иницијално стање напрезања у околној средини, још увек представља специфичан проблем из области геотехнике. Стога су инжењери, услед одсуства метода анализе носивости код овог типа микро-шипова, принуђени да у пракси користе тзв. полу-аналитичке методе. Циљ овог рада је дефинисање методологије за прорачун носивости ових елемената, третирајући притом и ефекат инсталације, као и презентација начина њихове нумеричке МКЕ анализе. Поједине теорије теже да проблем носивости на врху појединачног шипа (Q_b) симулирају пенетрациом шипа у средину у виду сферичне експанзије. Vesic (1970) први разрађује аналогију између сферичне експанзије и носивости на врху шипа, при чему је посматран механизам продора крутог конуса у тло. Зависност између ултимативне носивости у бази шипа која се континуирано помера (q_b), лимитујућег притиска (p_{lim}) и нових димензија дефинисаних преко сферне експанзије, дефинише носивост (Q_b) као:

$$Q_b = q_b * A = p_{lim}(1 + tg\delta * tg\alpha) * A = 4983,0 * 0,085 = 425,9 \text{ kN} \quad (5)$$

Прорачун силе трења (Q_s) на контакту између инјекционе смеше и околне средине, а узимајући у обзир и ефекат инсталације, врши се тзв. K - методом. Коефицијент K је раније израчунат и представља однос између радијалних и вертикалних напрезања из новог стања напрезања. На тај начин, израчунаће се нова бочна напрезања на контакту између микро-шила и тла, повећавањем иницијалног вертикалног напрезања p_0 (слика 3). Уколико инјекциони притисак не изврши деформацију у околној средини или промену геометрије елемента, сматра се да бочни притисак може да се запише као и у иницијалном стању.



Слика 3. Приказ конструктивних елемената микро-шила и дистрибуције бочних напрезања
Figure 3. Preview of constructive elements of micro-pile and distribution of radial stresses

Након утврђивања новог стања напрезања и димензија микро-шила, може да се израчуна и ултимативна носивост трења. С обзиром на промену дијаметра по дубини, чија је последица и промена напрезања, сила трења треба да се израчуна посебно за сваки појединечни сегмент:

$$\Sigma Q_s = \pi * D_i * tg \delta * \int_0^L \sigma_r * dz = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} = 183,7 kN \quad (6)$$

НУМЕРИЧКА АНАЛИЗА ИНЈЕКЦИОНОГ МИКРО-ШИПА

Нумеричка анализа спроведена је у програмском пакету *PLAXIS 2D*. С обзиром на геометрију инјекционог микро-шила, који је симетричан у односу на вертикалну осу, анализа се спроведи као класични аксисиметрични задатак. Полупростор тла и геометрија шипа моделоваће се са троугаоним коначним елементима са 15 чворишних тачака, тиме што је мрежа згуснута са фактором 0,10 у омотачу и бази шипа. Зоне контакта између две литолошке средине одвојене су спојним елементима са виртуелном дебљином ($R_{inter}=1$). Они су отклоњени након спровођења цилиндричне бочне и сферичне експанзије у базу. Понашање тла представљено је нелинеарним хиперболичним деформационо-учвршћујућим законом *Duncan&Chang-a*, док је механизам лома представљен *Mohr-Coulomb*-овом правом лома.

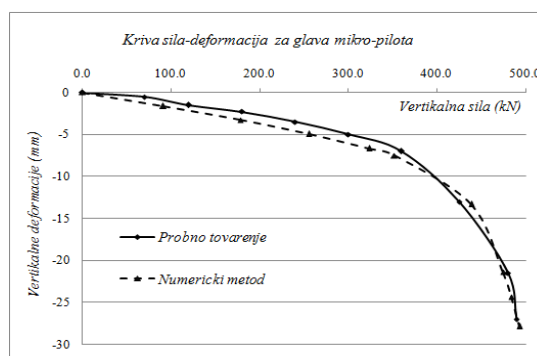
Табела 3. Репрезентативне карактеристике тла према нелинеарном материјалном закону
Table 3. Representative soil characteristics according to nonlinear material law

Запреминска тежина	Угао трења	Угао дилатације	Кохезија	Модул еластичности	Модул растовара	Експонент хиперболе
γ (kN/m ³)	φ (°)	Ψ (°)	c (kPa)	E_{50} (kPa)	E_{UR} (kPa)	m (----)
20.5	35.0	10.0	20.0	18500	55500	0.55

Сложену интеракцију која се јавља у процесу инсталације смеше под високим притиском у околну средину треба што је могуће веродостојније симулирати у моделу. Зато се у првој фази користе већ добијени подаци о измереним димензијама дијаметра по дужини и у глави микро-шипа (слика 1), где се, опцијом „*Prediscribed displacements*“, симулира експанзија са контролисаним деформацијама. У циљу да се запамти, промена напрезања у свим фазама, која се јавља као резултат форсиране деформације, представиће се кроз опцију „*Updated Mesh*“. У другој фази, предодређена померања се одстрањују и инјекциона смеша се аплицира у празнину, што представља микро-шип. Аплицира се појединачни континуирани терет „*A*“ на глави шипа, кроз опцију „*Staged construction*“, да би се у последњој фази извршило оптерећење до лома, кроз опцију „*Incremental multipliers*“. Понашање микро-шипа, како и оцена подобности примењене методологије, процениће се поређењем кривуља сила-деформација из нумеричког модела и пробних оптерећења. Добијене величине носивости упоређиће се и са оним из аналитичких прорачуна.

Табела 4. Мерене и нумеричке вредности за кривуљу сила-деформација у глави микро-шипа
Table 4. Measured and numerical gained values for curve force-deformation in micro-pile head

(*) Пробно оптерећење		Нумерички метод	
Вертикална сила	Слегање	Вертикална сила	Слегање
(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
70	-0.5	91	-1.6
240	-3.5	324	-6.7
360	-7.0	439	-13.3
490	-27.0	494	-27.8



Слика 4. (*) Приказ кривуље сила-деформација у глави микро-шипа
Figure 4. (*) Preview of curve force-deformation in micro-pile head

ЗАКЉУЧАК

Носивост и понашање инјекционих микро-шипова не може да се процени до задовољавајућег степена тачности уколико се у обзир не узме ефекат инсталације – под високим инјекционим притиском – у околну средину. Наиме, сложена интеракција која се јавља у процесу убризгавања инјекционе смеше под притиском у околну средину је, ван сваке сумње, њихова највећа предност. У овом раду направљен је напор, са успешним резултатом, да се то уради аналитичким путем, кроз симулацију инсталације према теорији експанзионе празнине. Имајући у виду прихватљива одступања између израчунатих и добијених фактичких носивости, може се закључити да је примена ове методологије, која је у затвореном облику, оправдана за анализу код неких практичних проблема. Разлике у погледу димензија микро-шипова које су добијене аналитичким путем и оних из теренских мерења су незнатне. За верификацију методологије биће потребна анализа и поређење још неких теренских мерења, што је циљ неких наредних истраживања. Ова методологија може да се користи само у дисперзним (земљаним) срединама или комплетно деградираним стенским масама, код којих је степен испуцалости $RQD \leq 25\%$, а за инјекционе притиске $p_p < p < R_f \cdot p_{lim}$. За инјекционе притиске испод вредности пасивног притиска треба применити теорију скупљајуће празнине.

Захвалница

Аутори изражавају захвалност компанији *HekTec B.V.* која је дозволила коришћење података из пробног оптерећења инјекционог микро-шипа, тзв. *HekPile*, који је регистровани патент и власништво ове компаније.

ЛИТЕРАТУРА:

- Николовски Д.: Дефинисање методологије за прорачун носивости код инјекционих микро-шипова и анкера кроз моделовање ефекта инсталације према теорији експанзионе празнине (на македонском језику: Дефинирање на методологија за пресметка на носивост кај инекциони микро-колови и анкери преку моделирање на ефектот на инсталација по теорија на експандирачка празнина). Магистарски рад. Градежен факултет, Скопје. 2019.
- Yu H. S., Houlsby G.T.: The finite cavity expansion in dilatant soils. University of Oxford, Department of Engineering Science. 1991.