



**ДЕМОНСТРИРАНЕ НА СИСТЕМАТА ДЖЕТ-ГРАУТИНГ КАТО МУЛТИФУНКЦИОНАЛЕН ПОДХОД ЗА  
ПОДОБРЯВАНЕ НА РЕАГИРАНЕТО НА КОНСТРУКЦИИТЕ И ЗЕМНАТА ОСНОВА ЧРЕЗ ПРИМЕРИ  
ОТ БЪЛГАРСКАТА ГЕОТЕХНИЧЕСКА ПРАКТИКА И МЕСТНИТЕ ПОЧВЕНИ УСЛОВИЯ**

**Николай Милев**

Катедра „Геотехника“, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), бул. „Хр.  
Смирненски“ № 1, 1046 София, България; milev\_fte@uacg.bg

**DEMONSTRATING THE JET-GROUTING TECHNIQUE AS A MULTIFUNCTIONAL APPROACH FOR  
IMPROVING BEHAVIOUR OF STRUCTURES AND SOIL BY EXAMPLES FROM BULGARIAN  
GEOTECHNICAL PRACTICE AND LOCAL SOIL CONDITIONS**

**Nikolay Milev**

Department of Geotechnics, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1 Hristo  
Simirnenski Blvd., Sofia 1164, Bulgaria; milev\_fte@uacg.bg

**ABSTRACT**

The aim of the paper is to demonstrate the application of the jet-grouting technique as a multifunctional approach for improving structural and soil behaviour by presenting examples of its application in Bulgarian geotechnical engineering practice and local soil conditions. The jet-grouting process is recognized as a cement soil stabilization approach in which, with the aid of high-pressure cutting jets of water or cement suspension, eventually air-shrouded soil around the borehole is eroded. The eroded soil is rearranged and mixed with the cement suspension. Mechanical properties of the formed medium highly depend on local soil conditions as well as on technical parameters of the applied jet-grouting system (such as: number of nozzles, treatment duration, pressure and fluid among others). By the exception of EN 12716:2003, current Bulgarian design practice does not give specific requirements and recommendations regarding the execution and control of the method. Therefore, the aim of the paper is to introduce good practice of the adoption of the jet-grouting method in Bulgaria as well as to demonstrate what mechanical properties one may expect in various local soil conditions.

**Key words:** jet-grouting, soil improvement, foundation strengthening, gravity quay wall, soil-mix wall, tailing dam, quality control, monitoring, risk management

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Методите за подобряване на механичните свойства на земната основа за целите на решаването на конструктивни и геотехнически проблеми, както и за предоставяне на иновативни проектни решения набират широка популярност в инженерната практика у нас. През последните години бяха направени значими изследвания, за да бъдат усъвършенствани някои технологични похвати за завишаване на стойностите на якостните и деформационните почвени параметри, за които предишен опит показва, че имат своето светло бъдеще в строителната практика. Днес методите за подобряване на механичните свойства на земната основа са важен цвят от палитрата геотехнически решения и вече рядко има големи проекти, в които не се прилага нито една подобна технология. Наличието на иновативни технологични решения и непрестанното разширяване на областта им на приложение значително разшири спектъра от похвати, поставяйки предизвикателства от ново поколение пред геотехническите инженери, които до скоро не успяваха да получат достатъчно информация и



практически опит в тази насока. Честа практика е въпросите, касаещи модифицирането на якостните и деформационните почвени параметри, да се разглеждат на концептуално ниво в етапа на проектиране, а техните отговори, до голяма степен, да се търсят по време на изпълнението от ангажиран за целта специализиран изпълнител и консултант. Методите за подобряване на механичните свойства на земната основа за мнозина са непозната част от процеса на проектиране, което от своя страна често вреди на инвестиционното проектиране. Такава ситуация е типична за случаите, при които в технологията има бурен растеж, но същевременно изследванията и разпространението на знания не са в състояние да отвърнат адекватно на темповете. За щастие, през последното десетилетие се наблюдава нарастване на броя на научните статии и книгите, посветени на похватите за усилване на почвата, а освен това се организират и курсове, фокусирани именно върху това направление – те се разпространяват свободно в днешния дигитализиран свят и вече дори най-скептично настроените геотехнически инженери признават, че правилно приложените и контролирани технологии, са една възможност повече, а не досаден нов проблем. В крайна сметка всичко опира до познание и увереност, а ограничението е не технологията, а нейното правилно или неправилно използване – всеобщ въпрос, който не касае единствено геотехниката. Във времена, в които осигуряването на човешкия живот върви ръка за ръка с икономическата целесъобразност в инвестиционния проект, възприемането на „правилни“ проектни решения е многослоен и сложен процес.

Докладът разглежда един от най-прилаганите в последно време подходи за усилване на земната основа – оформянето на цилиндрични каменовидни тела и завишаване на стойностите на механичните почвени параметри посредством инжектиране на циментов разтвор под високо налягане („джет-граутинг“). Технологията „джет-граутинг“ (описана в [1], [6], [7] и [9]) е добре позната в световен мащаб, [5], и набира особена популярност през последните две десетилетия в България. Методът е с широк обхват на приложимост, което е демонстрирано чрез пет примера в настоящата разработка. Някои от по-съществените възможности, които предлага системата са: реконструкция на фундаменти, предпазване на тунели, оформяне шахти, аркови плочи и водопътни дъна на изкопи, изпълнение на секантни водопътни прегради, репарирание на язовирни стени, облекчаване на земния натиск и др.

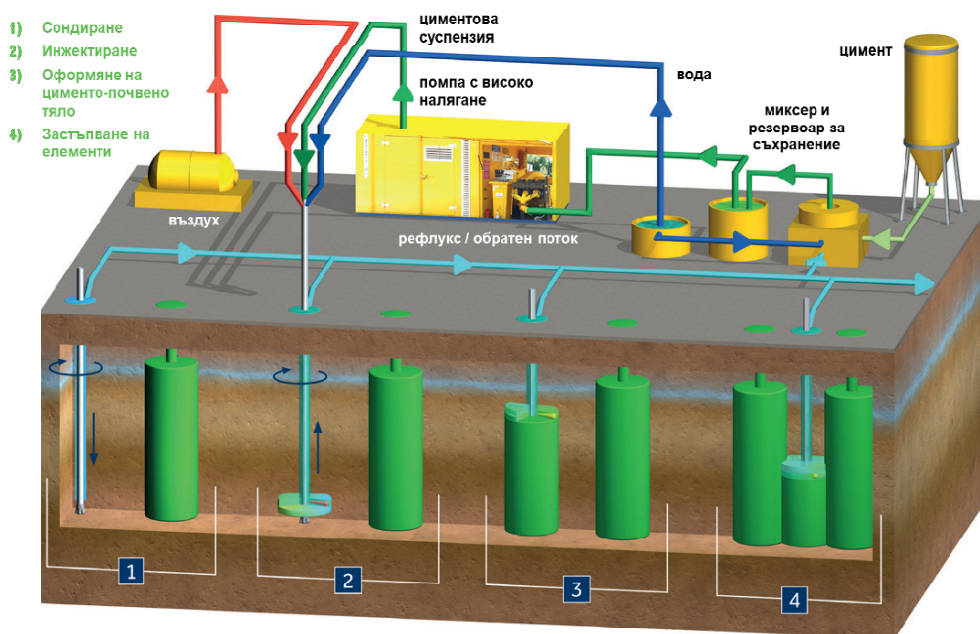
#### СИСТЕМАТА „ДЖЕТ-ГРАУТИНГ“

Процесът на инжектиране „джет-граутинг“ е известен още като „цимента-почвено укрепване“ – [4]. От технологична гледна точка системата се състои в следното: посредством вертикална струя вода под високо налягане структурата на почвата се нарушава до достигане на проектната кота, като впоследствие в хоризонтална посока се инжектира циментов разтвор под високо налягане (400 bar), който се смества с естествения материал и го ерозира частично – Фиг. 1. Този процес позволява образуването на каменовидно тяло, което има натискова якост, зависеща от геоложките условия, параметрите на разтвора и технологията на изпълнение, [3], а данни от проекти, изпълнение на територията на България са докладвани в настоящата разработка – [8]. По време на инжектиране част от цимента-почвената смес („рефлукс“) се отвежда до повърхността на терена през пръстеновидното пространство между инжекционния лост и стените на сондажа – Фиг. 2. „Джет-граутинг“ системата има монофлуиден, билуиден и трифлуиден вариант, като монофлуидната разновидност намира най-широко приложение в България – тя предвижда водоциментовия разтвор да се инжектира през една или повече дюзи, а в този случай оформянето на сондажа и последващото инжектиране се извършват чрез един и същ разтвор (един единствен флуид).

Докладът цели да предостави данни във връзка с вече изпълнени проекти в България и да демонстрира влиянието на естествените геоложки условия върху натисковата якост на „цимента-почвените“ елементи, оформени чрез система „джет-граутинг“



Фиг. 1 Принципна постановка за изпълнение на цилиндрични каменовидни тела и подобряване на механичните почвени параметри посредством инжектиране на цементов разтвор под високо налягане („джет-граутинг“) – [9]



Фиг. 2 Технологична постановка и последователност на операциите при прилагане на системата „джет-граутинг“ – [9]

#### ПРИМЕР 1: УСИЛВАНЕ НА СЪЩЕСТВУВАЩА КЕЙОВА СТЕНА

Първият пример представя кейова стена, която се намира на пристанището в град Бургас – корабно място 5 и 6. Тя е изградена в първата половина на 20<sup>ти</sup> век и е от гравитачен тип – състои се от четири бетонни блока с варираща широчина и горен блок от зидария с тунел за инсталации. Зад гърба на стената са изпълнени обратни насипи от ломен камък, глина и чакъл. С течение на времето са се развили забележителни суфозионни процеси, които са довели до съществено слягане на обратния насип зад кейовата стена. Това е довело и до невъзможност за експлоатация на пространството зад кейовата стена.

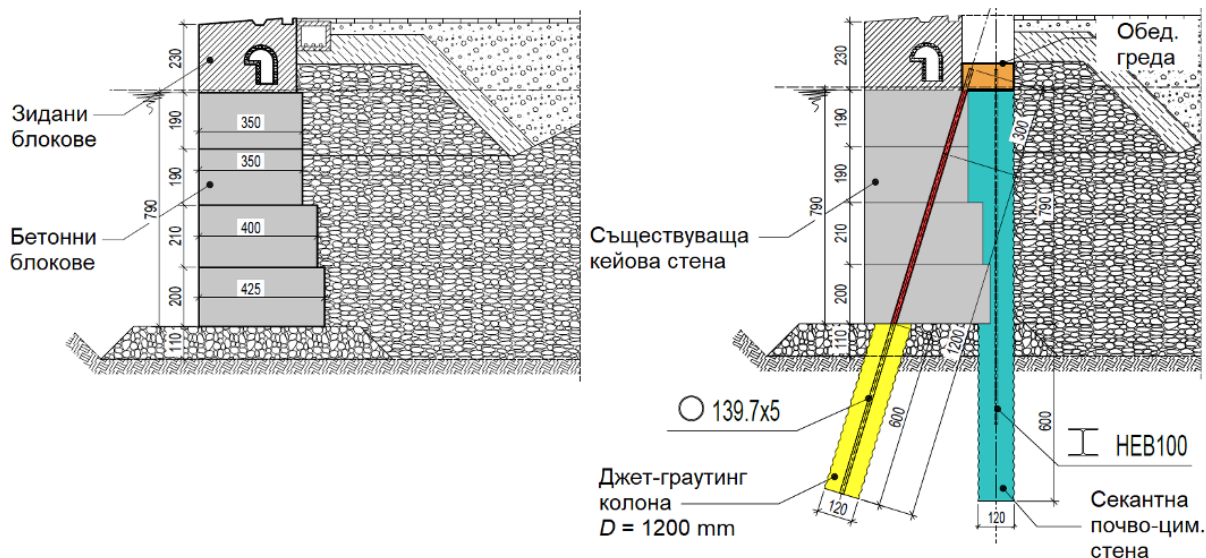
Разработеният и изпълнен през 2019 г. подход за усиление на кейовата стена се състои от: изграждане на водоплътна 2170 m<sup>2</sup> преграда, оформена чрез секантни (осово разстояние от 900 mm)



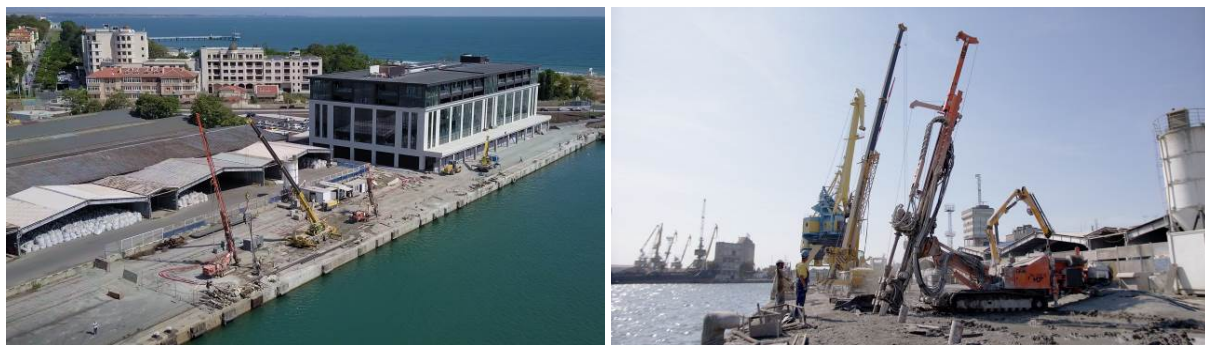
армирани (чрез стоманени профили НВВ100) инжекционни колони („джет-граутинг“) с диаметър 1200 mm; сеизмично подобрене на реагирането на стената чрез пробиване под наклон на гравитачните блокове и изграждане на 117 броя тангентни (осово разстояние от 1200 mm) армирани (чрез стоманена тръба 139.7x5) инжекционни колони („джет-граутинг“) с диаметър 1200 mm под основната плоскост на кейовата стена – в предната ѝ част, точката на преобръщане; изграждане на стоманобетонна греда, която обединява както двата основни компонента на усилването, секантната преграда и новоизградения дълбок фундамент под основната плоскост, така и съществуващата кейова стена. Съществуващото положение и концепцията за усилване са показани на Фигура 3.

Целта на изграждането на водоплътната преграда е както да инжектира (запълни) порите на обратния насип и да го уплътни (чрез преструктуриране на почвените частици вследствие на влиянието на инжекционната струя под високо налягане), така и да предпази бъдещо навлизане на вода зад стената. Функцията на дълбокия фундамент под основната плоскост е да подобри сеизмичното реагиране чрез увеличаване на носимоспособността на хлъзгане и преобръщане.

Фигура 4 демонстрира полевото изпълнение, а Таблица 1 обобщава резултати от изследване на механичните параметри на опитни инжекционни колони – пробити са чрез триплексна сонда, а взетите образци са изпитани в лабораторни условия.



Фиг. 3 Съществуващо положение на кейова стена в град Бургас и концепция за усилване



Фиг. 4 Усилване на кейова стена в град Бургас чрез система „джет-граутинг“



Таблица 1 Механични параметри на пробни инжекционни „джет-граутинг“ колони – кейова стена в град Бургас

Схематично представяне на опитна JG-колона	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб най-горен блок)	Якост при едноосов натиск, $q_u$	Осова деформация при разрушение, $\epsilon_{u,z}$	Деформационен модул, $E_d$	Тип почва
[-]	[-]	[m]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]
	S20	1.50 ÷ 1.85	5.88	0.370	1589	пясък и чакъл
	S21	2.40 ÷ 2.80	12.00	0.460	2609	
	S22	10.00 ÷ 10.15	25.30	0.285	8860	
	S23	10.60 ÷ 10.95	61.40	0.225	27320	чакъл (насип)
	S24	12.00 ÷ 12.40	5.22	0.400	1305	песъчлива глина
	S25	0.60 ÷ 0.80	13.96	0.790	1767	пясък и чакъл
	S26	1.60 ÷ 1.80	16.13	0.460	3507	
	S27	2.20 ÷ 2.47	5.24	0.420	1248	чакъл (насип)
	S28	2.70 ÷ 3.00	9.99	0.590	1693	
	S29	7.60 ÷ 7.90	52.10	0.220	23640	
	S30	9.10 ÷ 9.35	50.10	0.224	22390	
	S31	10.56 ÷ 10.80	37.30	0.270	13820	
	S19	2.90 ÷ 3.12	6.90	0.190	3632	пясък и чакъл
	S1	1.86 ÷ 2.00	32.00	0.253	12640	чакъл (насип)
	S2	4.95 ÷ 5.30	5.38	0.750	717	
	S3	5.40 ÷ 5.70	19.00	0.240	7930	
	S4	7.45 ÷ 7.70	25.50	0.247	10320	
	S5	7.93 ÷ 8.10	4.60	0.310	1484	
S6	8.95 ÷ 9.11	10.53	0.680	1549		
S7	10.10 ÷ 10.30	9.46	0.580	1631		
S8	11.33 ÷ 11.75	7.13	0.440	1620		
S9	5.48 ÷ 5.80	1.67	0.330	506	чакъл (насип)	
S10	6.05 ÷ 6.35	52.70	0.287	18360		
S11	7.85 ÷ 8.10	7.68	0.540	1422		
S12	8.60 ÷ 8.80	8.53	0.230	3709		
S13	9.60 ÷ 9.80	79.20	0.200	39540		
S14	10.40 ÷ 10.65	28.50	0.352	8100	песъчлива глина	
S15	11.80 ÷ 12.00	6.95	0.290	2397		
S16	13.30 ÷ 13.60	1.54	0.120	1283	твърда глина	
S17	13.95 ÷ 14.20	5.66	0.420	1348		
S18	14.50 ÷ 14.80	6.84	0.310	2206		

## ПРИМЕР 2: УКРЕПВАНЕ НА ДЪЛБОК ИЗКОП

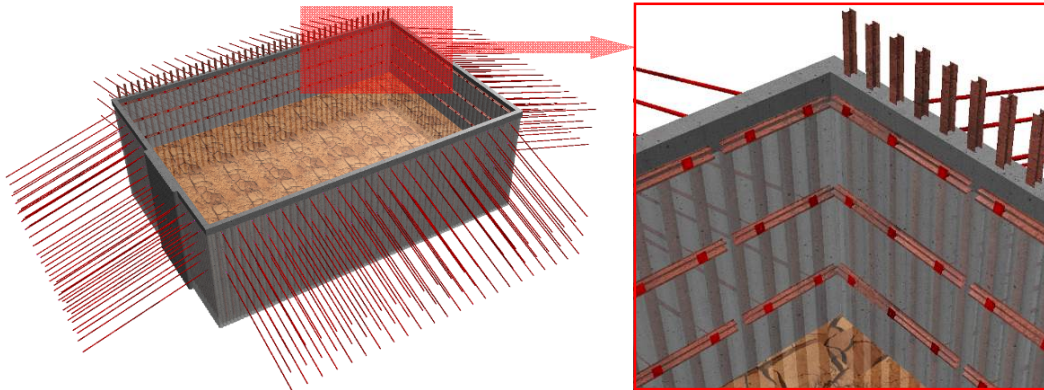
Вторият пример с приложение на „джет-граутинг“ системата представя укрепване на дълбок изкоп чрез изграждане на водоупътна почво-циментова стена („soil-mix wall“) в град Бургас – Фиг. 5. Проектът е реализиран през 2021 г.

Размерите в план на изкопа са 32 m на 47 m, а дълбочината му е 11.50 m. Укрепителното съоръжение (почво-циментова стена) е с обща площ 3000 m<sup>2</sup> и е оформено чрез армирани (всеки втори елемент с профил HEA280) секантни (осово разстояние от 500 mm) инжекционни колони с диаметър 700 mm и дължина 17.00 m – в горния си край е обединено чрез стоманобетонна греда. Укрепителната стена и подпряна на три реда чрез самопробивни анкери, които са снабдени със система за предотвратяване на навлизане на вода при пробиването на стената, а след изпълнението им е предвидена допълнителна операция – последващо инжектиране непосредствено зад гърба на почво-циментовата стена. Концепцията за укрепване на дълбокия изкоп е показана на Фигура 6 чрез план и разрез.

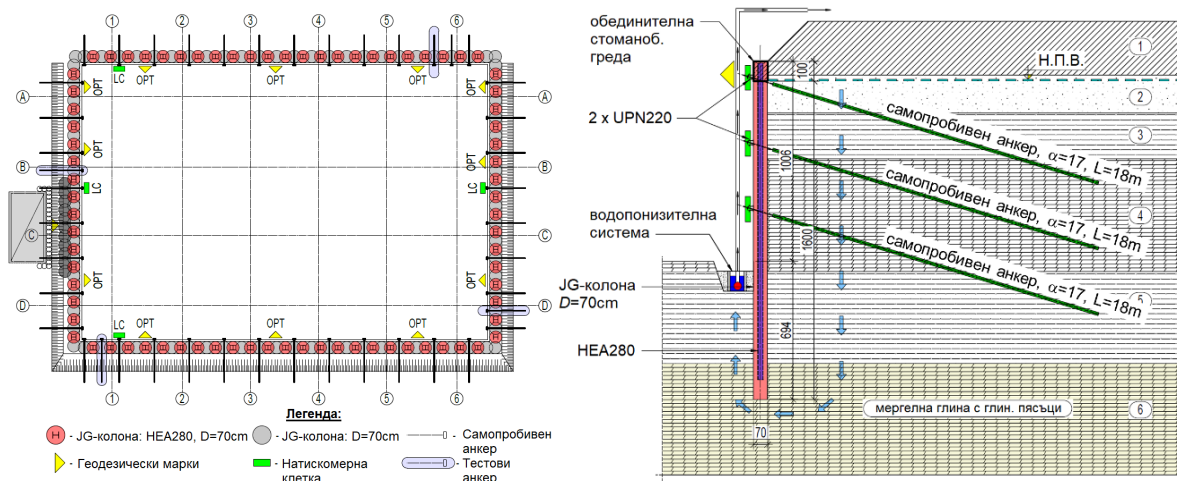
Някои от предизвикателствата, свързани с реализирането на проекта, бяха свързани с високото ниво на подпочвените води, намиращи се на около 2.90 m под нивото на терена, както и с наличието на съществуващ вълнолом на строителната площадка.



Диаметърът и натисквата якост на инжекционните колони са потвърдени чрез провеждане на ядково сондиране и изпитване на проби в лаборатория. Резултатите са обобщени в Таблица 2.



Фиг. 5 Пространствена визуализация на триредово подпряна укрепителна конструкция („цименто-почвена стена“) изпълнена по система „джет-гарутинг“ – град Бургас



Фиг. 6 План и разрез на триредово подпряна укрепителна конструкция („цименто-почвена стена“) изпълнена по система „джет-гарутинг“ – град Бургас



Фиг. 7 Изпълнение на двуредово подпряна укрепителна конструкция („цименто-почвена стена“) изпълнена по система „джет-гарутинг“ – град Бургас



Таблица 2 Механични параметри на пробни инжекционни „джет-граутинг“ колони – „циментопочвена“ укрепителна стена в град Бургас

Схематично представяне на опитна JG-колона	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб най-горен блок)	Якост при едноосов натиск, $q_u$	Осова деформация при разрушение, $\epsilon_{u,z}$	Деформационен модул, $E_d$	Тип почва
[-]	[-]	[m]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]
	Пр. 32	1.70 ÷ 2.10	5.24	0.41	1278	пясък и дребен чакъл
	Пр. 33	3.35 ÷ 3.60	9.48	0.58	1634	
	Пр. 34	5.60 ÷ 6.00	4.51	0.67	673	
	Пр. 35	6.50 ÷ 6.80	1.99	0.33	603	едроз. пяс. и чакъл
	Пр. 36	7.50 ÷ 7.70	1.84	0.29	634	
	Пр. 37	10.30 ÷ 10.50	11.21	0.82	1367	глина
	Пр. 38	11.10 ÷ 11.30	4.04	0.54	748	
	Пр. 39	12.40 ÷ 12.60	5.09	0.66	771	
	Пр. 40	14.30 ÷ 14.45	8.52	0.63	1352	
	Пр. 41	16.30 ÷ 16.55	6.46	0.98	659	песъчлива глина
	Пр. 42	1.35 ÷ 1.55	4.74	0.64	741	пясък и дребен чакъл
	Пр. 43	2.95 ÷ 3.25	4.43	0.63	703	
	Пр. 44	3.80 ÷ 4.10	4.07	0.69	590	
	Пр. 45	4.80 ÷ 5.00	7.47	0.47	1589	
	Пр. 46	6.40 ÷ 6.60	2.77	1.02	272	едроз. пяс. и чакъл
	Пр. 47	7.40 ÷ 7.60	2.53	0.88	288	
	Пр. 48	8.85 ÷ 9.15	8.23	0.51	1614	глина
	Пр. 49	12.60 ÷ 12.80	2.78	0.94	296	
	Пр. 50	13.20 ÷ 13.40	5.94	0.65	914	
	Пр. 51	16.15 ÷ 16.40	13.63	0.71	2920	песъчлива глина
	Пр. 52	1.40 ÷ 1.70	8.72	0.79	1104	пясък и дребен чакъл
	Пр. 53	3.30 ÷ 3.70	4.52	0.74	611	
	Пр. 54	4.90 ÷ 5.10	5.35	0.68	787	
	Пр. 55	6.00 ÷ 6.35	5.61	0.59	951	едроз. пяс. и чакъл
	Пр. 56	7.55 ÷ 7.75	4.07	0.41	993	
	Пр. 57	11.10 ÷ 11.30	10.71	0.55	1945	глина
	Пр. 58	2.40 ÷ 2.75	5.38	0.67	803	пясък и дребен чакъл
	Пр. 59	3.50 ÷ 3.70	3.65	0.63	579	
	Пр. 60	4.60 ÷ 5.00	7.98	0.77	1036	
	Пр. 61	5.70 ÷ 6.00	9.83	0.79	1244	едроз. пяс. и чакъл
	Пр. 62	6.80 ÷ 7.00	10.49	0.61	1720	глина
	Пр. 63	8.45 ÷ 8.70	11.49	0.58	1981	
	Пр. 64	9.45 ÷ 9.70	6.89	0.43	1602	
	Пр. 65	11.25 ÷ 11.50	6.27	0.84	746	
	Пр. 66	14.40 ÷ 14.55	4.14	1.04	398	пясък и дребен чакъл
	Пр. 67	2.55 ÷ 2.90	5.60	0.94	596	
	Пр. 68	4.40 ÷ 4.80	9.77	0.48	2035	едроз. пяс. и чакъл
	Пр. 69	6.10 ÷ 6.40	13.23	0.50	2646	глина
	Пр. 70	7.00 ÷ 7.35	12.90	0.74	1743	
	Пр. 71	11.60 ÷ 11.90	11.06	0.52	2127	
Пр. 72	13.75 ÷ 14.00	16.51	0.48	3440		
Пр. 73	15.30 ÷ 15.50	2.05	0.69	297		

ПРИМЕР 3: УСИЛВАНЕ НА ФУНДАМЕНТНА ПЛОЧА И ПОДОБРЯВАНЕ НА СЕИЗМИЧНОТО РЕАГИРАНЕ НА СИСТЕМАТА „ЗЕМНА ОСНОВА – ФУНДАМЕНТИ – ВРЪХНА КОНСТРУКЦИЯ“

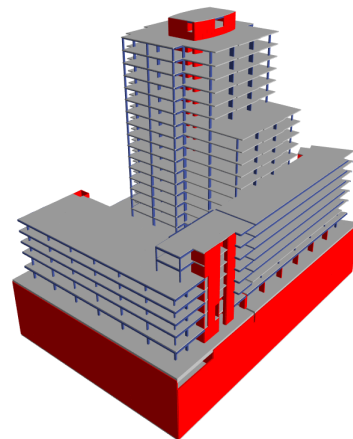
Третият пример практиката демонстрира усилване на системата „почва – фундамент“. Разглежданата конструкция на сградата (Фиг. 8) е стоманобетонна (колони, греди и плочи за поемане на вертикалните товари и стени за поемане на сеизмичното въздействие) и е проектирана през 2007 г. Според оригиналния проект, сградата е с 14 етажа и 5 подземни нива. Изпълнението започва през 2008 г. и е прекъснато през 2010 г. За период от 2 години са изпълнени единствено подземните нива. Поради промени в инвестиционните намерения е решено сградата да бъде надстроена с 4 допълнителни етажа, както и да се смени функцията – от офиси на жилища. За тази цел е разработен проект за усилване.



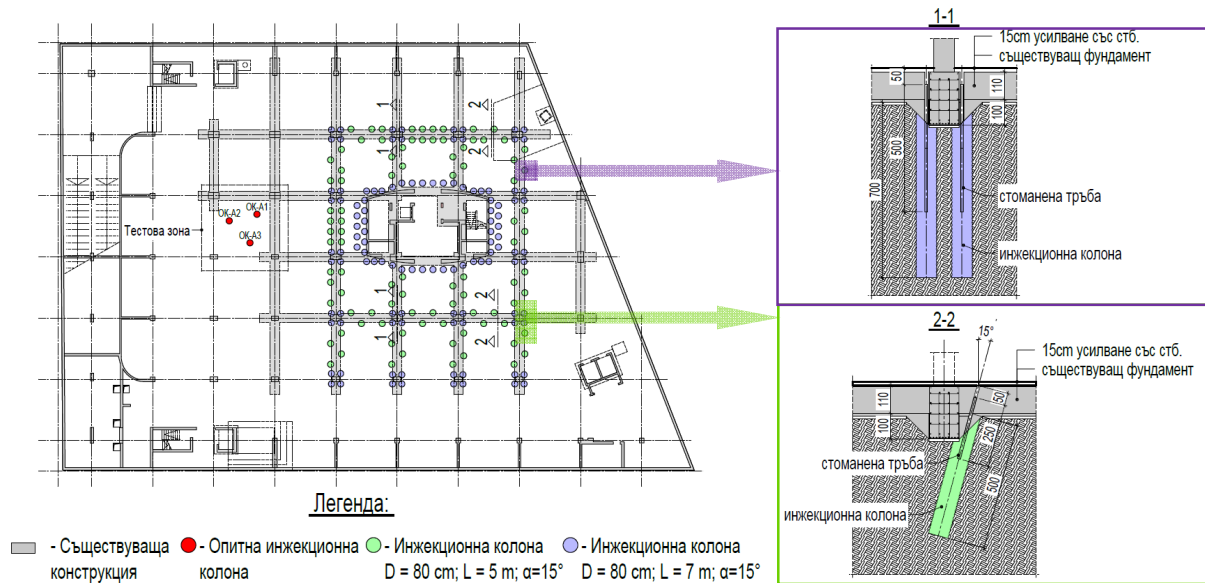
Фундаментната конструкция на съществуващата част от сградата е фундаментна плоча. С цел редуциране на сляганията вследствие на допълнителното натоварване, от надстрояването на сградата, както и с цел увеличаване на стойностите на коефициента на леглото, заложен в изчислителния модел, е решено изпълнение на инжекционни колони по система „джет-граутинг“, като комплексна мярка за подобряване на почвените характеристики и усилване на съществуващата фундаментна конструкция – [2]. Особеностите на съществуващото положение (светла височина в сутерена от 2.80 m) обуславят избраното решение като единствен вариант.

Възприетото разпределение на 206 броя инжекционни колони с диаметър 800 mm е показано на Фигура 9. Последователността на изпълнение се състои от шест основни етапа, както следва: 1) пробиване на отвори в съществуващата фундаментна плоча; 2) изпълнение на инжекционни колони (дължина от 7.0 m и 5.0 m) чрез инжектиране на водоциментов разтвор под високо налягане; 3) монтаж на стоманени тръби (114.3x8, дължина 5.0 m и 2.5 m) с цел предаване на товарите от фундаментната плоча към инжекционните колоните, както и за повишаване на натисковата им носимоспособност; 4) замонолитване на отвора между стоманените тръби и фундаментната плоча; 5) монтаж на армировъчни пръти в стоманените тръби, осигуряващи връзка с армировката, необходима за усилване на фундаментната плоча чрез кожух; 6) запълване на стоманените тръби със замонолитващ разтвор и усилване на фундаментната плоча чрез изпълнение на 15 cm доливане на горната ѝ повърхност (кожух). Усилването е реализирано през 2019 г.

Изпълнението е показано на Фигура 10, а Таблица 3 обобщава резултатите от опитния участък (ядково сондиране и вземане на образци, които са изпитани в лаборатория за едноосов натиск).



Фиг. 8 Съществуващо положение и пространствен изглед на сградата в град Бургас



Фиг. 9 План и разрези, показващи концепцията за усилване на сградата в град Бургас





Фиг. 10 Изпълнение на комплексен метод за подобряване параметрите на земната основа и усилване на фундаментната конструкция чрез прилагане на технология „джет-граутинг“ – сграда в град Бургас

Таблица 3 Механични параметри на пробни инжекционни „джет-граутинг“ колони – усилване на фундаментна конструкция на сграда в град Бургас

Схематично представяне на опитна JG-колона	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб фонд. плоча)	Якост при едноосов натиск, $q_u$	Осова деформация при разрушение, $\varepsilon_{u,z}$	Деформационен модул, $E_o$	Тип почва
[-]	[-]	[m]	[MPa]	[%]	[MPa]	[-]
	S1	0.80 ÷ 1.00	3.272 ± 0.164	0.37 ± 0.04	885	плиоценска глина, N <sub>2</sub>
	S2	0.84 ÷ 1.00	4.992 ± 0.250	0.95 ± 0.09	525	
	S3	2.76 ÷ 2.90	4.577 ± 0.229	0.37 ± 0.04	508	
	S4	4.80 ÷ 4.94	8.093 ± 0.405	0.47 ± 0.05	1722	
	S5	6.00 ÷ 6.23	7.332 ± 0.367	0.49 ± 0.05	1496	
	S6	6.23 ÷ 6.40	4.665 ± 0.233	0.96 ± 0.10	486	
	S7	6.40 ÷ 6.53	6.038 ± 0.302	0.48 ± 0.05	1258	
	S8	6.53 ÷ 6.71	6.100 ± 0.305	0.62 ± 0.06	984	
	S9	2.60 ÷ 2.88	4.985 ± 0.249	0.76 ± 0.08	656	
	S10	4.50 ÷ 4.63	6.259 ± 0.313	0.94 ± 0.09	665	
	S11	5.20 ÷ 5.36	5.837 ± 0.294	0.73 ± 0.07	800	
	S12	5.60 ÷ 5.76	6.874 ± 0.344	0.86 ± 0.09	799	
	S13	5.86 ÷ 6.00	5.790 ± 0.290	0.77 ± 0.08	752	

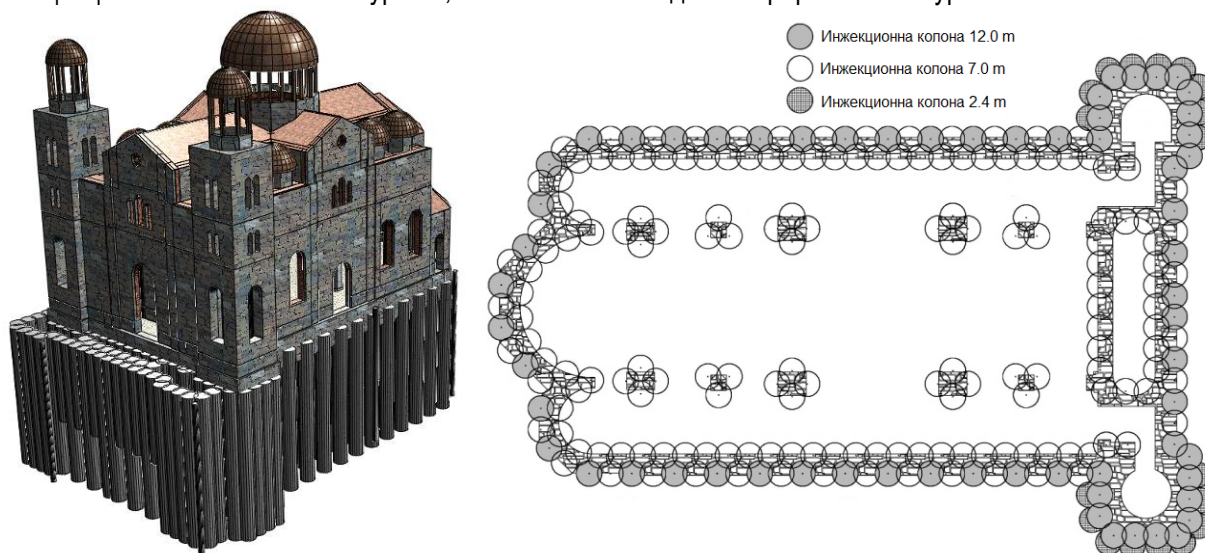
#### ПРИМЕР 4: ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ФУНДАМЕНТНАТА КОНСТРУКЦИЯ НА АВАРИРАЛ ПАМЕТНИК НА КУЛТУРАТА

Четвъртият пример представя системата „джет-граутинг“ като съвременен подход за разрешаване на инженерни проблеми в извънредни ситуации. По-конкретно е разгледана една от мерките за усилване и възстановяване на аварирания през 2013 г. храм „Св. Св. Кирил и Методий“ в град Бургас, който оригинално е построен през 1907 г. В църквата са генерирани значителни повреди вследствие на неравномерно слягане, причинено от изкоп в близост. Ето защо през 2016 г. тя е усилена по начин, който позволява понастоящем да поема гравитационно натоварване и сеизмично въздействие. Мерките за усилване и спасяване на храма включват следното: инжектиране на пукнатините с разтвор с компенсирано съсъхване и малко обемно разширение, полагане на въглеродна тъкан в уязвими зони (сводове и куполи), налягане на конструкцията в затворен контур на две нива, внедряване на обтегачи и усилване на фундаментите чрез прилагане на технологията „джет-граутинг“ – фокуса на настоящия доклад. Този тип усилване на земната основа е избран заради

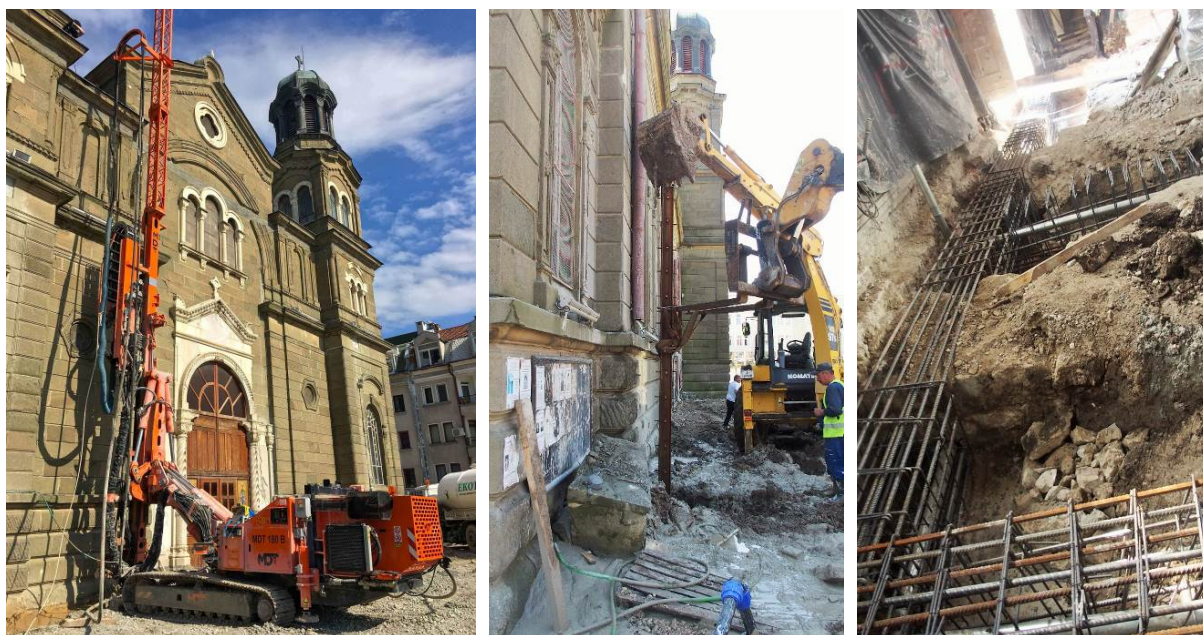


влошените почвени условия под фундаментите на църквата вследствие на аварията. Друга причина за избора е желанието да се избегне както компрометиране на анкерите на укрепителното съоръжение в близост до храма, така и на съществуващите аварийни мерки, взети при усилването на земната основа веднага след инцидента.

Усилването на фундаментите и земната основа се състои в следното: изпълнение на 209 броя армирани (чрез стоманен профил HEA140) инжекционни колони под наклон с диаметър 1100 mm; изпълнение на обединителна стоманобетонна греда в горния край на инжекционните колони. Концепцията е показана на Фигура 11, а изпълнението е демонстрирано на Фигура 12.



Фиг. 11 Пространствен изглед и план на концепцията за подобряване на механичните параметри на земната основа под паметник на културата – храм Св. Св. Кирил и Методий в град Бургас



Фиг. 12 Изпълнение на инжекционни колони по система „джет-граутинг“ – храм Св. Св. Кирил и Методий в град Бургас



### ПРИМЕР 5: УСИЛВАНЕ НА ИЗЛИВНИ ПИЛОТИ С УСТАНОВЕНИ ДЕФЕКТИ

Петият пример от практиката представя фундаментната конструкция на резервоар за амоняк в град Девня. Тя се състои от две стоманобетонни плочи с дебелини от 60 см и вертикални конструктивни елементи между тях. Съгласно инженерно-геоложкия доклад, почвените условия на строителната площадка са специфични – описани са процеси на консолидация от собствено тегло на почвените масиви (коефициентът на преуплътняване, OCR, има стойности по-ниски от 1.0). Поради тази причина, с оглед на надеждното предаване на товарите от резервоара към земната основа, е предвидено прилагане на дълбоко фундиране чрез изливни пилоти с диаметър 880 mm и дължина 28.95 m. Дължината на пилотите е съобразена със стратиграфията по начин, който гарантира достигне на „здрав“ почвен пласт (мергел), с което да бъде обезпечена достатъчна носимоспособност. Така предвидените пилоти са от „стоящ“ тип. Поради очакваното реализиране на слягания от собствено тегло на почвените пластове във времето, околното триене на пилотите е взето като негативно (допълнително натоварване върху пилотите).

След изпълнение на всички пилоти през 2020 г. бяха направени геофизични проучвания („pile echo test“) и ядрови сондажи, чрез които бяха установени дефекти (липса на интегритет) във всички пилоти. Това наложи възприемането на мерки за усилването им. Те предвиждат пробиване през центъра на всички пилоти чрез хидроударник и инжектиране под високо налягане отдолу нагоре – Фиг 13. Целта е да бъде гарантиран интегритетът на пилотите, което да позволи предаването на силите по цялата им дължина до върха, а от там – в земната основа, както и да бъдат възстановени опорните условия на фундаментната конструкция (точково подпирание с неподдаваеми опори). Приетият метод за усилване е базиран на „джет-граутинг“ технологията и е реализиран през 2021 г. – Фиг. 14.

След усилване бяха взети образци от усилените елементи, които впоследствие бяха изпитани в лаборатория. Постигнатата натискава якост е систематизирана в Таблица 5.

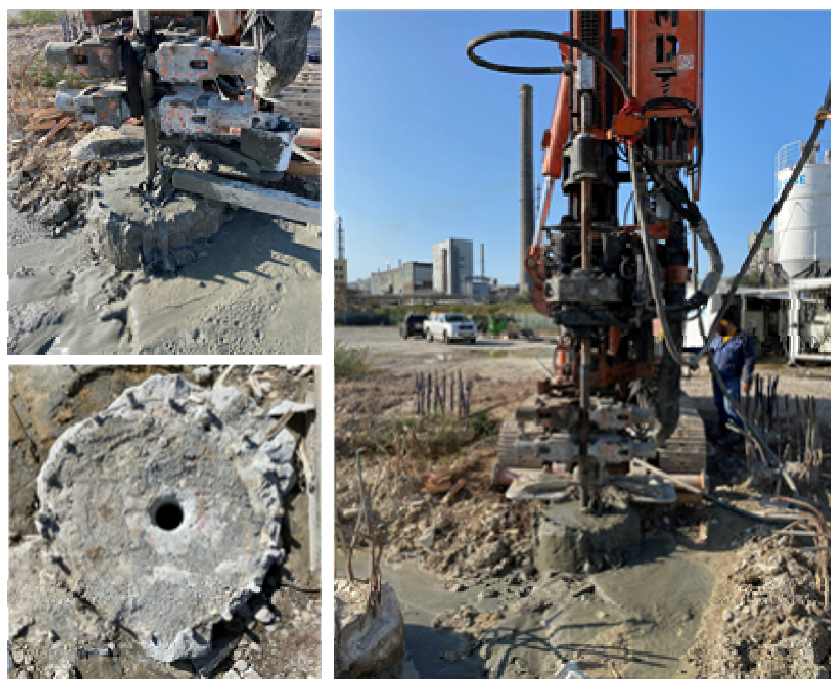


Фиг. 13 Концепция за усилване на дефектни пилоти чрез система „джет-граутинг“ – фундаментна конструкция на резервоар за амоняк в град Девня



Таблица 3 Якост при едноосов натиск на усилен чрез система „джет-граутинг“ изливни пилоти – резервоар за амоняк в град Девня

Усилен работен пилот	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб най-горен блок)	Якост при едноосов натиск, $q_u$	Усилен работен пилот	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб най-горен блок)	Якост при едноосов натиск, $q_u$	Усилен работен пилот	№ проба	Дълбочина на проба (от горен ръб най-горен блок)	Якост при едноосов натиск, $q_u$
[-]	[-]	[m]	[MPa]	[-]	[-]	[m]	[MPa]	[-]	[-]	[m]	[MPa]
P36	48	3.00 ÷ 3.23	52.6	P48	8	3.10 ÷ 3.44	53.3	P69			
	49	5.00 ÷ 5.40	54.9		9	5.12 ÷ 5.50	27.9				
	50	7.00 ÷ 7.32	45.6		10	7.17 ÷ 7.53	50.6				
	51	9.00 ÷ 9.38	50.7		11	9.00 ÷ 9.42	48.6				
	52	10.00 ÷ 10.38	56.5			-					
	53	11.07 ÷ 11.37	57.5		12	11.00 ÷ 11.36	57.1				
	54	12.00 ÷ 12.37	53.1			-					
	55	13.09 ÷ 13.43	47.2		13	13.00 ÷ 13.47	45.3				
	56	14.13 ÷ 14.50	56.5			-					
	57	15.00 ÷ 15.35	56.0		14	15.21 ÷ 15.52	48.5				
	58	16.08 ÷ 16.38	41.5			-					
	59	17.00 ÷ 17.38	45.8		15	17.16 ÷ 17.53	51.2				
	60	18.06 ÷ 18.30	56.5			-					
	61	19.00 ÷ 19.24	43.7		16	19.00 ÷ 19.40	48.7				
	62	20.00 ÷ 20.41	59.4		17	20.05 ÷ 20.52	47.6				
	63	21.00 ÷ 21.23	61.8		18	21.00 ÷ 21.47	43.8				
	64	22.00 ÷ 22.37	51.6		19	22.00 ÷ 22.43	37.0				
	65	23.00 ÷ 23.36	40.0		20	23.10 ÷ 23.47	30.5				
	66	24.00 ÷ 24.23	33.4		21	24.00 ÷ 24.36	33.8				
67	25.00 ÷ 25.38	46.3	22	25.00 ÷ 25.47	34.9						
68	26.00 ÷ 26.32	30.7	23	26.08 ÷ 26.50	41.5						
69	27.00 ÷ 27.31	37.5	24	27.09 ÷ 27.36	39.6						
	-		25	28.00 ÷ 28.45	25.7						
			26	29.15 ÷ 29.28	8.9						
						70	17.14 ÷ 17.45	70.7			
							-				
						71	19.16 ÷ 19.44	54.0			
						72	20.11 ÷ 20.37	53.3			
						73	21.16 ÷ 21.39	37.0			
						74	22.16 ÷ 22.50	62.7			
						75	23.00 ÷ 23.38	41.8			
						76	24.16 ÷ 24.54	32.5			
						77	25.00 ÷ 25.41	35.8			
						78	26.00 ÷ 26.36	64.7			
						79	27.00 ÷ 27.36	66.5			
						80	28.00 ÷ 26.30	30.2			
						81	29.00 ÷ 29.26	47.1			



Фиг. 14 Инжектиране под високо налягане чрез система „джет-граутинг“ – фундаментна конструкция на резервоар за амоняк в град Девня



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Петте изложени примера от практиката показват широкото приложение на системата „джет-граутинг“ в България през последното десетилетие. Всички представени проекти са реализирани успешно и са с доказано добър краен резултат. Докладът поднася богат набор от експериментални данни, които биха послужили като ориентир относно очакваните стойности на механичните параметри на почво-циментовите елементи в конкретни геоложки условия.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] AGI. 2012. *Jet Grouting Guidelines*: Associazione Geotecnica Italiana: 69 p [in Italian].
- [2] Bustamante, M. 2002. *Les colonnes de jet grouting. Report of the Seminar: Pathologies des Sols et des Foundations*, <http://www.keller-france.com/rechercheet-developpement/theses-et-publications>: 6 p [in French].
- [3] Covil, C. S. and A. E. Skinner. 1994. Jet grouting: A review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process, In *Grouting in the Ground*: London, United Kingdom: Thomas Telford: pp. 605–627.
- [4] Croce, P., Flora, A., Modoni, G. 2014. *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. Taylor & Francis Group.
- [5] de Vleeshauwer, H. and G. Maertens. 2000. Jet grouting: State of the art in Belgium. Proceedings of the Conference 'Grouting: Soil Improvement—Geosystem Including Reinforcement': Helsinki, Finland: Finnish Geotechnical Society: pp. 145–156.
- [6] EN 12716. 2001. *Execution of Special Geotechnical Works: Jet Grouting*. European Committee for Standardization.
- [7] DIN 4093. 2012. Design of ground improvement: Jet grouting, deep mixing, or grouting. *Standard of the Deutsches Institut für Normung*, 2012 ed.: Düsseldorf, Germany: 17 p.
- [8] Fang, Y. S., J. J. Liao, and T. K. Lin. 1994a. Mechanical properties of jet-grouted soilcrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 27: pp. 257–265.
- [9] Keller. 2018. Jet Grouting (Soilcrete). *Company Borchure*.



*Proceedings of the XVI INTERNATIONAL CONFERENCE  
OF THE OPEN AND UNDERWATER MINING OF MINERALS  
06 – 10 SEPTEMBER 2021, VARNA, BULGARIA*

---