



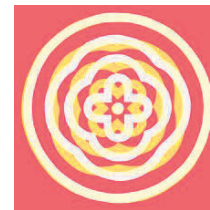
**ДГКМ**  
ДРУШТВО НА  
ГРАДЕЖНИТЕ  
КОНСТРУКТОРИ НА  
МАКЕДОНИЈА

Партизански одреди 24,  
П. Факс 560, 1000 Скопје  
Северна Македонија

**MASE**  
MACEDONIAN  
ASSOCIATION OF  
STRUCTURAL  
ENGINEERS

Partizanski odredi 24,  
P. Box 560, 1000 Skopje  
North Macedonia

**MRS-9**



mase@gf.ukim.edu.mk  
<http://mase.gf.ukim.edu.mk>

## РЕГЕНЕРИРАЊЕ НА АКВАДУКТОТ ВО СКОПЈЕ

Борче ВЕЉАНОВСКИ<sup>1</sup>, Јован Бр. ПАПИЌ<sup>2</sup>, Андреа ТАНЕВСКИ<sup>3</sup>

### АПСТРАКТ

Аквадуктот во Скопје, долг околу 400 m и висок 6 m, низ својата повеќеветковна историја има претрпено оштетувања од геотехнички, земјотресни и вандалски причини. Во последните две децении, регистрирани се и отклонувања на две негови делници: изнесуваат по 50-тина cm, се јавуваат во должина од по речиси 25 m, со што зафаќаат повеќе столбови, а се со спротивни насоки. Имајќи ги предвид загрозувањата што ги предизвикуваат за опстојувањето на аквадуктот, спроведени се две серии на обемни геотехнички истражувања, врз основа на кои е изработен проект за негова стабилизација. Притоа, направен е внимателен избор на мерки, кога, покрај на финансискиот аспект, внимавано е и на технологијата на изведба, па предложена е инсталација на вертикални и закосени самобушечки микроколони од двете страни на секој од десетте најотклонети столбови, со што е минимизиран ризикот за оштетување од механизација. Поради сезонски и финансиски ограничувања, мерките се спроведени во две фази: во зимата 2022/23 год. и во пролетта 2023 год., при што во првата фаза стабилизирани се столбовите кај чии врвови се воочени најголемите хоризонтални поместувања. Со оглед на неповолните геолошки и тектонски услови и постојна состојба, и покрај елегантното техничко решение за стабилизација, при неговата реализација особено внимание е посветено на техничките мерки за потпирање, заштита и безбедност на осетливата горна конструкција на аквадуктот. Во рамките на трудот ќе бидат опишани спроведувањето на проектантските решенија за геотехничка стабилизација, предизвиците во реализацијата, преземените мерки за спречување на загрозување на стабилноста на аквадуктот во тек на изведба, искуствата при фазна имплементација на предвидените мерки и ќе бидат споделени препораки за идни слични зафати.

**Клучни зборови:** Аквадукт; Отклонување на столбови; Стабилизација со микроколони; Осетливост; Заштита

<sup>1</sup> ГЕОИНГ, Скопје, Р. С. Македонија

<sup>2</sup> Градежен факултет, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, Р. С. Македонија

<sup>2</sup> Интерградба Таневски ДОО, Скопје, Р. С. Македонија

## 1. ВОВЕД

Скопскиот аквадукт, оддалечен само 4 km од центарот на градот, е монументална градба од типот на надземен водоводен систем на едно ниво, сочуван во полна должина од 385,80 m [1]. Се состои од: 53 квадратни или правоаголни столбови (C) со висина од 6 m, распоредени на осно растојание од 6,50-6,70 m; две бочни рампи; 54 лац; сидови над лаците; венци и водоводна конструкција. Постојат неколку претпоставки за староста, бидејќи сè уште не е конечно утврдено дали е изграден во Јустинијаново доба (6-ти век) или датира од 15-ти или 16-ти век.

Поради своето големо значење, не само за историјата, културата и уметноста во нашата земја, скопскиот аквадукт е предмет на интерес на меѓународната стручна и научна јавност. Благодарейќи на тоа, покрената е постапка за негово зачувување и рехабилитација бидејќи се соочуваше со проблеми од конструктивна природа што влијаат врз неговата стабилност и понатамошно постоење, како и со значителни и разновидни оштетувања од архитектонска природа. Имено, иако постои во сета своја должина, тој има претрпено нарушувања од различни причини. Од тој аспект, најголем проблем претставува сериозната деструктивна трансформација на дел од столбовите, лаците и целокупната структура над нив, во вид на две инклинации од вертикалната положба, во должини од по 20-тина m. Така, отстапување од вертикала во насока кон запад е регистрирано на столбовите C7÷C19 во износи од -44 mm за C18 и C19 до -498 mm за C12, додека отстапување од вертикала кон исток е регистрирано на столбовите CS20÷CS26, во вредности од +16 mm за C20 до +351 mm за C24 [2]. Нивните темели практично претставуваат само продолжение на надземниот габарит испод нивото на теренот, без посебна конструкција, а изградени се од камен и малтер. Овој начин на градење е применет до котата на терен, од која започнува сидарија на надземниот дел на столбовите. Испитаните темели на столбовите се со слични висини, додека длабочината на фундирање, во зависност од конфигурацијата на теренот, варира 1,0-1,5 m. Темелите во основа имаат приближно квадратен одлик и ширина 2,15-2,24 m и не покажуваат видливи оштетувања, пукнатини и девастација на потконструкцијата.

## 2. МОЖНИ ПРИЧИНИ ЗА ИНКЛИНАЦИЈА НА СТОЛБОВИТЕ

Описот на можните причините за настанатите оштетувања и инклинации на аквадуктот се детално дадени во [3] и [4], од кои во продолжение се изнесуваат клучните елементи. Со анализа на податоците, не само геотехнички, туку и археолошки и конзерваторски, не може со прецизност да се дефинира периодот на развој на деформациите или почетокот на нивниот процес, иако постојат одредени насоки кои пружаат ориентација.

Така, антропогените влијанија имале улога во развојот на деформациите или барем овозможиле некоја друга серија на настани да доведе до неповолната ситуација. Пред сè, некои делови на локалитетот се користени како одлагалиште на градежен шут, особено после земјотресот од 1963 год., што ја променило морфологијата. Во тој период и оската на аквадуктот е пресечена со вештачки формиран канал на реката Серава која порано не поминувала низ овој реон, а што се одразило врз природното движење на површинските и подземните води, и со што директно се врши континуирано водозаситување на тлото. На таков начин, условено е формирање на високи зони што се дренираат, и вдлабнати зони кај кои тоа не е случај. Оттаму, на најниските делови, токму оние во близина на загрозените столбови, при дождовни периоди доаѓа до задржување на водата, со што се загрозуваат темелите.

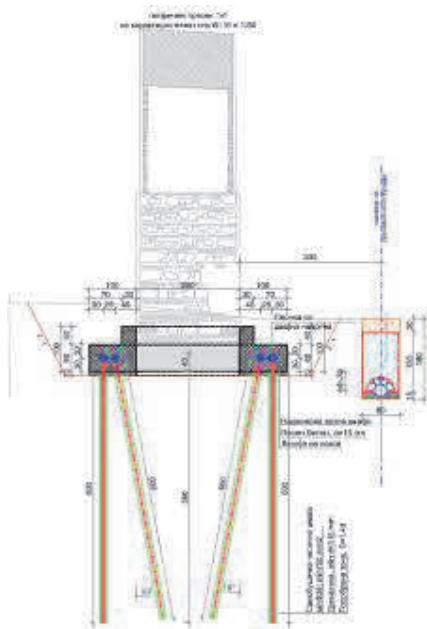
Овие причини не би влијаеле неповолно доколку не се дополнети со други предуслови. Имено, можни причини од геотехнички аспект се изразените промени во простирањето на почвените слоеви по должина и попречно на аквадуктот, повремено приповршинско присуство на ситнозрни почви (глини) со релативно слаби деформабилни карактеристики, малата длабочина на фундирање и сл. Со дополнителни истражни и лабораториски работи е констатирано дека недоволната носивост и промената на физичко-механичките карактеристики на глината во зависност од присуство на вода, претставуваат еден од главните причинители за реализираните деформации на столбовите на аквадуктот. Имено, она што особено привлекува внимание е мошне високиот притисок на бабрење што се јавува кај глината на котата на фундирање: 400 kPa!

Од геотектонски аспект, треба да се истакне дека локацијата спаѓа во подрачја со максимален интензитет на земјотреси од VIII-IX степени според MCS. Најсилен земјотрес е забележан во 1963 год., во скопското епицентрално подрачје, проследен со афтер-шокови со сопствено локално жариште на длабочина од 5 km. Локалната тектоника ја одликуваат две тектонски дислокации, кои ја пресекуваат истражуваната локација на аквадуктот и најверојатно условуваат развивање на отклонувања со спротивни насоки (кон исток и кон запад).

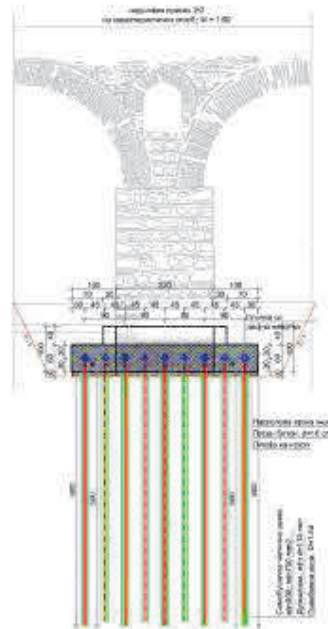
Она што, сепак, е воочливо за секој посетител, се изразените вандалски оштетувања.

### 3. ПРЕДЛОЖЕНИ САНАЦИОНИ МЕРКИ

Предложеното техничко решение за стабилизација се состои од примена на плитко дренирање и длабоко фундаирање, со изведба на микроколови (Сл. 1 и 2): покрај како длабоки темели оптоварени со сила на притисок, служат и како анкерни конструкции оптоварени со сила на извлекување [5]-[7]. Тие, воедно, влијаат и врз унапредување на вкупните услови, бидејќи со нивната изведба се подобруваат и јакоста и деформабилноста на почвите испод столбовите и се обезбедува подобра интеракција на аквадуктот со тлото. Така, со вклучување на геолошката средина опфатена со микроколовите, се добива поголем габарит во долната зона, наспроти досегашната состојба со релативно мала длабочина на фундаирање, со што тежиштето на интегралната конструкција се спушта значително пониско, подобрувајќи ја стабилноста на превртување и сеизмичката отпорност.

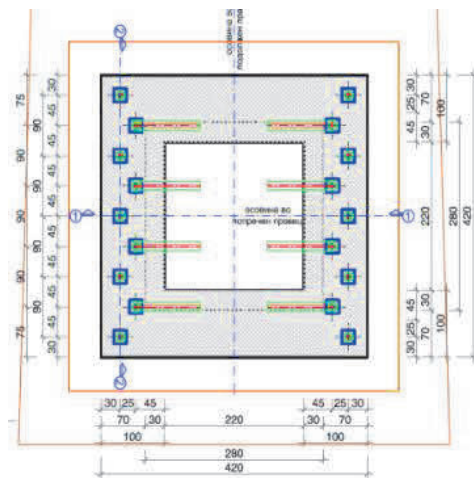


Сл. 1 Попречен пресек на аквадуктот и проектираните микроколови и дренажни мерки



Сл. 2 Подолжен пресек на аквадуктот и проектираните микроколови

Испод секој столб се проектирани по 18 микроколови со дијаметар  $\phi 115$  mm (челичен профил  $\phi 38$ ) и должина 6 m, лоцирани во четири реда: по два реда од двете страни на оската на аквадуктот (Сл. 3). Двата надворешни реда се проектирани вертикално, на оддалеченост 0,70 m од надворешната страна на столбовите, а двата внатрешни реда се закосени кон внатре под агол од  $10^\circ$  од вертикалата и на растојание од 0,50 m од столбовите. Основото растојание на микроколовите во еден ред изнесува 0,90 m. Микроколовите во двата реда од една страна се поставени наизменично, така што во надворешните редови се предвидени по 5 микроколови, а во внатрешните по 4. Тие се поврзани со ободна конструкција во форма на буквата L: нејзиниот долен дел е широк 1,0 m и висок 0,60 m, додека горниот дел е широк 0,30 m и висок 0,40 m. Освен тоа, оваа L-грета ги опшива столбовите со изведба долж нивниот цел обод, овозможувајќи взаемна соработка на микроколовите кои се изведуваат само од две страни, т.е. долж аквадуктот.



Сл. 3 Основа на столб и поставеност на микроколовите и ободната L-греда

#### 4. ОПИС НА ИЗВЕДБЕНИ РАБОТИ

Имајќи предвид дека се работи за заштитен објект од културно наследство, чија сидана конструкција е стара повеќе векови и веќе има претрпено оштетувања, пред изведувачот на геотехничката стабилизација беа поставени сериозни предизвици, помеѓу кои императив беше особена внимателност при реализација на работите. Од овие причини и со цел намалување на ризици од оперативни оштетувања на аквадуктот при зафатот (отпаѓање на делови, удар од машина, дополнително отклонување...), пред отпочнување со санационите работи пристапено е кон подградување на критичните конструктивни елементи со привремена дрвена конструкција (Сл. 4), поставена кај столбовите и сводовите во зоните предвидени за санација.



Сл. 4 Предвидено (горе) и реализирано (долу) потпирање на лаците и столбовите од аквадуктот

Пред да се започне со изведба на микроколовите, поради големата детериорација на столбовите, беше предложено да се изврши дел од втората фаза на санацијата. Имено, во делот од столбовите каде што своевременно при нивната изградба биле поставени дрвени затеги, недостасуваа дел од обложните камења (Сл. 5), со што значително им беше намален попречниот пресек и отпорниот момент. Ваквата состојба ги доведуваше во ризик од евентуалното обрушување при неочекувано слегнување или отклонување на темелот при изведба на работите. Поради тоа, според проектот за санација, во отворите каде што некогаш имало дрвени затеги, се изведоа челични затеги кои беа залиени со варов малтер (Сл. 6). За постигнување на предвидената јакост и крутост на заливката од варов малтер беа потребни четири месеци.



Сл. 5 Оштетувања на столбовите

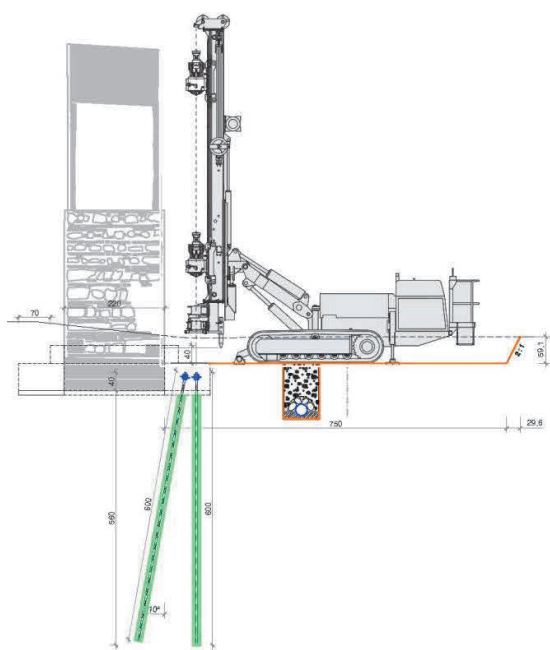


Сл. 6 Поставување на челични затеги кај оштетени столбови

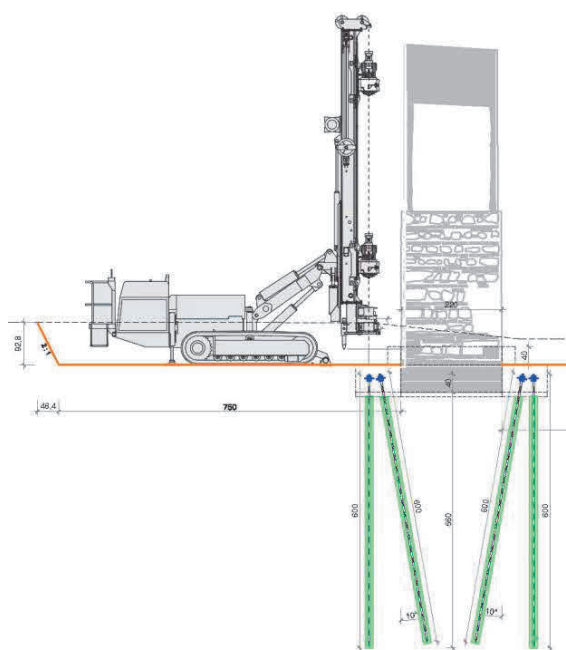
Во овакви околности, еден од првите предизвици со кој се соочија изведувачите на микроколовите, беше котата на работното плато од кое ќе се изведуваат истите. Наједноставно би било тоа да биде еднакво со долниот раб на надколовата греда, во кој случај екипата би имала идеални услови за изведба, па наддавањето на коловите сегменти и инјектирањето на вградениот кол би биле вршени рутински. Сепак, еден ваков пристап носеше со себе повеќе ризици:

- Доста длабок ископ, кој ќе се доближеше до котата на темелење на аквадуктот, со што ќе се загрозе неговата стабилност, ионака веќе нарушена од оштетувања и отклонетост;
- Како мерка за санација, со проектот беше предвидено зафаќање на подземните води и нивно одведување во р. Серава, за која цел на источната страна од аквадуктот веќе беше изведена дренажа, сочинета од перфорирана цевка и слој крупен чакал над истата, па длабокото работно плато ќе значеше нејзино комплетно уништување.

Во овакви околности, како најсоодветно се наметна решението работното плато да биде што е можно поплатко, што носи усложнување на процесите, но сепак да овозможи непречена изведба. Така, работното плато беше поставено на горниот раб на надколовата L-греда (Сл. 7-8).



Сл. 7 Работна платформа за изведба, фаза 1а



Сл. 8 Работна платформа за изведба, фаза 1б

Со оглед на состојбата на објектот, и земајќи ги предвид локалните почвени услови, како метода со која ќе се врши ископот на микроколовите одбрана е ротациона постапка под заштита на цементна исплака подготвена од портланд цемент СЕМ II/A 42,5R, адитив против ефект на собирање на мешавината, адитив пластификатор за зголемување на вградливоста и водоцементен фактор  $w/c=0.4$  (Сл. 9). Оваа метода, за разлика од ударната, не создава значителни вибрации кои ќе бидат штетни по објектот, а обезбедува стабилност на дупнатина сè до достигнување на крајната длабочина. Напредувањето по длабочина се врши со помош на „жртвена круна“, т.е. длето што се наоѓа на врвот на микроколот (Сл. 10). За поголема флексибилност, коловите беа формирани од сегменти (челични цевки) со должини од по 3 m, споени со фасонски елемент. По завршеното дупчење пристапувано е кон инјектирање, а бидејќи микроколовите се шупливи, тоа се врши низ шипките, преку вбризување на цементна исплака под притисок, по сета должина, сè до излевање од дупнатината, со што и ископаната почва се истиснува на површината. На тој начин, просторот помеѓу микроколот и почвата е исполнет со цементна мешавина.

Машинската гарнитура користена при изведбата на микроколовите беше од реномираниот италијански производител „Casagrande“. На Сл. 11-12 е прикажана дупчалката, поставена во работна позиција за изведба на инклинираните микроколови од западната страна на аквадуктот.



Сл. 9 Подготовка на исплака за дупчење на микроловите



Сл. 10 Шематски приказ на вградениот микрокол (самобушечки анкер)

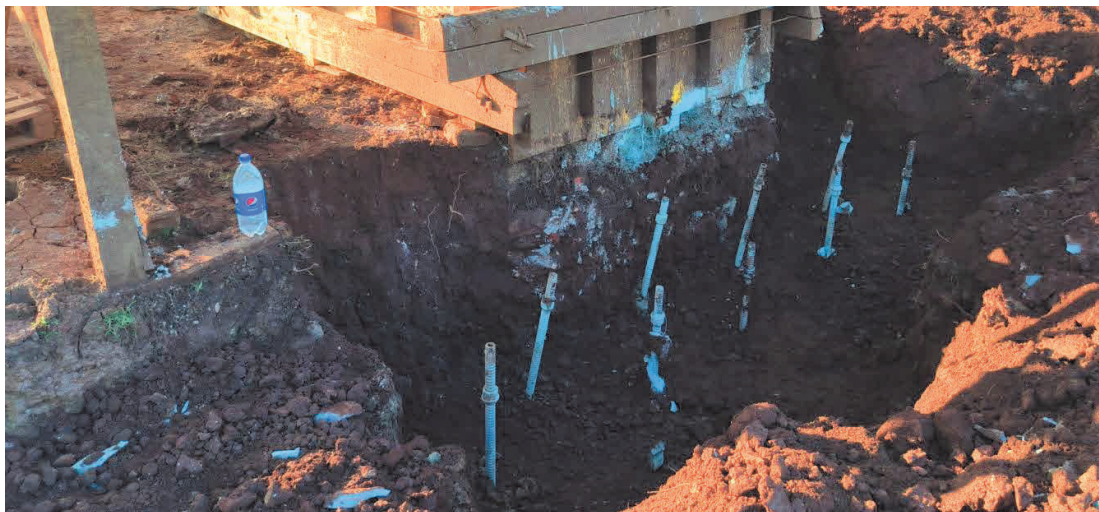


Сл. 11 Изведба на микроколони со машинска гарнитура Casagrande C6



Сл. 12 Инјектирање на микрокол

После извршеното вградување на микроколовите, се пристапува кон ископ на градежна јама, од работното плато за дупчење на микроколовите сè до длабочината за поставување на подлога од посен бетон за ободната L-конструкција (поврзна греда). Ископаната градежна јама со девет изведени микроколови е прикажана на Сл. 13.



Сл. 13 Ископ на градежна јама од една страна на столбот

Условено од оштетувањата и деформациите на аквадуктот, а со цел да не се изврши преголем ископ околу столбовите во исто време, со што би се загрозила локалната стабилност на поедини конструктивни елементи, како дополнителна мерка на претпазливост беше вршено бетонирање на надколовата L-греда во три фази. Притоа, прва фаза беше страната од која столбот е отклонет, со што се овозможуваше поставување на потпори, т.е. косници кај наклонетата страна. Така, по комплетирана изведба на микроколови од една страна на столб, пристапено е кон армирање и бетонирање на тој дел од темелот, Сл. 14-15.



Сл. 14 Бетонирање на дел од ободна надколова L-конструкција



Сл. 15 Избетониран долен дел од ободна надколова L-конструкција

Ископот од спротивна страна, за изведба на тамошните микроколови, се врши по постигнување на доволна јакост на избетонираниот дел. После целосно повторување на погоре наведеното, и откако доволна јакост ќе се утврди и за бетонот на таа страна, се пристапува кон ископ, армирање и бетонирање на делот од L-гредата испод лаците, т.е. нормално на оската на аквадуктот, со што се поврзуваат едниот и другиот избетониран дел, па столбот бива целосно опшиен.

Опишаната постапка за изведба е почитувана во целост за сите 10 предвидени столбови за санација, а е спроведувана во два наврата: декември 2022 год., кога е интервенирано на по три најзагрозени столбови од двете делници со отклонувања, додека преостанатите по два столба од двете делници се стабилизирани во пролетта 2023 год.

## 5. ЗАКЛУЧОК

Огромното значење на скопскиот аквадукт за културното наследство наметна голема одговорност при подготовка на проектот за санација и спроведување на предвидените мерки. Долгиот животен век и физичко протегање на објектот условил негова изложеност на различни геотехнички, сеизмички и антропогени влијанија, а поради недоволно податоци, лоцирањето на причините што довеле до негови оштетувања претставуваше предизвик. Во рамките на проектот, предвидени беа микроколови (и дренажен ров) кои претставуваат елегантно решение за санација на отклонетите столбови, бидејќи не заземаат простор, ниту пак го реметат изгледот над тлото, што беше едно од основните барања, а како приоритет се наметна безбедноста на аквадуктот во фаза на изведба на стабилизационите мерки и минимизирање на ризиците од негово оштетување со механизација при повторување на позиции. Изведувачот презеде и мерки за заштита и обезбедување на стабилноста на столбовите и лаците со нивно потпирање, со што планираните задачи и цели во целост ги исполни. Владата на Р. С. Македонија неодамна го прогласи аквадуктот за споменик од исклучително значење, додека Националниот конзерваторски центар ја финансираше реализацијата на опишаното решение, со што овозможи отпорност на аквадуктот на постојни и идни предизвици, и продолжување на негова (ис)трајност.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Građenje D.O.O (2014). Technical documentation for preparation of the executive design for conservation and restoration of the Aqueduct. East Sarajevo.
- [2] Градежен факултет – Скопје (2019). Геодетски мерења за определување невертикалност на столбови од аквадуктот во Скопје. Скопје.
- [3] ГЕИНГ Кребс унд Киефер Инт. (2014). Елаборат од геотехнички истражувања – Аквадукт во Скопје. Скопје.
- [4] Градежен факултет – Скопје (2019). Извештај од геомеханички лабораториски испитувања за аквадукт - Скопје. Скопје.
- [5] Градежен факултет – Скопје (2019). Техничко решение за стабилизација на инклинирани столбови на аквадуктот во Скопје. Скопје.
- [6] Papić J. et al. (2022). Geotechnical measures for stabilization of the Aqueduct in Skopje. 20<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – ICSMGE, Sydney, Australia.
- [7] Papić J. Br. et al. (2021). Živeo akvadukt! Doprinos geotehnike, Geotehnički aspekti građevinarstva. Vrnjačka Banja, Srbija, str. 514-524