

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
РУДАРСКО-ГЕОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ

Невенка М. Новаковић

**ПОВРШИНСКО РАСПАДАЊЕ КЕРСАНТИТА ИЗ  
ТЕШИЋА МАЈДАНА У КОРЕЛАЦИЈИ СА  
НАЧИНОМ ОБРАДЕ НА ПРИМЕРУ МАЛОГ  
СТЕПЕНИШТА (БЕОГРАДСКА ТВРЂАВА)**

докторска дисертација

Београд, 2024

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Nevenka M. Novaković

**SURFACE DEGRADATION OF KERSANTITE FROM  
TEŠIĆ MAJDAN QUARRY IN CORRELATION WITH  
THE PROCESSING METHOD ON THE EXAMPLE OF  
THE SMALL STAIRCASE (BELGRADE FORTRESS)**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024



## Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације

### Ментор:

др Весна Матовић, редовни професор,  
Ужа научна област: Петрологија,  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет

### Чланови комисије:

1. др Даница Срећковић Батоћанин, редовни професор,  
Ужа научна област: Петрологија,  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
2. др Сузана Ерић, редовни професор,  
Ужа научна област: Фундаментална и примењена минералогичка,  
Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет
3. др Ана Радивојевић, редовни професор,  
Ужа научна област: Архитектонске конструкције,  
Универзитет у Београду, Архитектонски факултет

Датум одбране: \_\_\_\_\_

## Захвалност

Менторки, проф. др Весни Матовић дугујем захвалност што ме је инспирисала да проучавам *науку о камену*. Наша сарадња и њена страст у бављењу својим послом је била подстрек да као архитекта закорачим у свет геологије. Захваљујем се за храброст, стрпљење, несебично дељење знања, искустава, истрајност и подршку у овом изазовном подухвату.

Колективу Рударско–геолошког факултета, свим професорима и научним сарадницима захваљујем се на сарадњи, отворености, пријатној и добронамерној атмосфери и поверењу. Посебну захвалност дугујем проф. др Сузани Ерић и проф. др Даници Срећковић Батоћанин на драгоценим саветима и сугестијама.

Захваљујем се проф. др Ани Радивојевић са мог матичног Архитектонског факултета Универзитета у Београду на саветима и коментарима.

Заводу за заштиту споменика културе града Београда сам захвална на прилици да се бавим послом који волим и ком сам посветила свој досадашњи професионални рад. Захваљујем се свим колегама из Завода, а посебно Ивани Филиповић Јорк која ме је увек несебично подржавала и била глас разума.

Захваљујем се колегиници др Маји Франковић, др Вањи Видекинд (dr Wanja Wedekind) и професору др Зигфриду Зигесмунду (prof. dr Siegfried Siegesmund) на заједничком раду и информацијама.

Захвална сам каменоресцу Јовану Бранковићу на великој помоћи при припреми узорака.

Захваљујем се свим својим пријатељима који су имали стрпљења и пружали ми енергију да истрајем, а Ивани Мрконић на стрпљењу у читању тезе и помоћи при техничким детаљима.

На крају све дугујем мојој породици, мами, Хаџи Верици Новаковић, као вечитој инспирацији и подршци, сестри, др Нади Новаковић, која је моја смерница, супругу, Ђорђу Васићу, на безграничном стрпљењу и посвећености и сину Филипу који је разлог да истрајем.

# Површинско распадање керсантиа из Тешића мајдана у корелацији са начином обраде на примеру Малог степеништа (Београдска тврђава)

## САЖЕТАК

Архитектуру Београда на прелазу 19. у 20. век обележила је употреба керсантиа из каменолома Тешића мајдана. Као камен високих декоративних својстава, керсантит је коришћен за јавне споменике, делове или потпуну изградњу објеката (Народна скупштина Србије, Мало степениште, Народни музеј и др.). Како очување споменика културе изискује познавање својстава уграђеног камена, истраживања су обухватила детаљно проучавање петролошких, хемијских и физичких карактеристика керсантиа из Тешића мајдана и узорака камена из споменика Мало степениште (студија случаја). Након детаљног мапирања стања керсантиа, лабораторијских анализа (оптичких, SEM-EDS, XRPD и анализа физичких својстава) идентификоване су форме распадања керсантиа у каменолому (руралној средини) и керсантиа уграђеног у споменике културе (урбаној средини). Проучавањем утицаја процеса површинског распадања керсантиа на промену интринзичних својстава керсантиа, одређен је и утицај екстринзичних, историјских и антропогених фактора на интензитет процеса деградације керсантиа (изложеност атмосферским агенсима, начин површинске обраде, геометријска позиција камених елемената у структури објекта). Израчунавање индекса распадања керсантиа у корелацији са положајем у микролокацијским оквирима, омогућило је идентификовање главних фактора распадања и детерминацију степена њиховог утицаја у целокупном синергетском развоју процеса физичког и хемијског распадања керсантиа. То је допринело сагледавању значаја свеобухватног проучавања интринзичних и екстринзичних параметара који утичу на стање керсантиа у објектима културног наслеђа као главне основе за будуће конзерваторско-рестаураторске радове.

**Кључне речи:** керсантит, Мало степениште, споменик културе, архитектонски камен, физичко-хемијско распадање, мапирање, форме распадања, површинска обрада

Научна област: Гео-науке

Ужа научна област: Петрологија

УДК: 679.85:552.1(043.3)

## **Surface degradation of kersantite from Tešić Majdan quarry in correlation with the processing method on the example of the Small Staircase (Belgrade Fortress)**

### **ABSTRACT**

The architecture of Belgrade at the turn of the 20th century was marked by the use of kersantite from the Tešić Majdan quarry. As a stone with high decorative properties, kersantite was used for public monuments, parts, or complete construction of buildings (National Assembly of Serbia, Small Staircase, National Museum, etc.). As the preservation of cultural monuments requires knowledge of the properties of built-in stone, the research included a detailed study of the petrological, chemical, and physical characteristics of kersantite from Tešić Majdan quarry and stone samples from the Small Staircase monument (case study). After a detailed mapping of the state of kersantite, laboratory analyzes (optical, SEM-EDS, XRPD and analysis of physical properties), the forms of decay of kersantite in the quarry (rural environment) and kersantite embedded in cultural monuments (urban environment) were identified. By studying the influence of the surface decomposition process of kersantite on the change of intrinsic properties of kersantite, the influence of extrinsic, historical and anthropogenic factors on the intensity of the kersantite degradation process was determined (exposure to atmospheric agents, method of surface treatment, geometric position of stone elements in the structure of the object). Calculating the kersantite decomposition indices in correlation with the position in the microlocation frames, enabled the identification of the main factors of decomposition and the determination of the degree of their influence in the overall synergistic development of the process of physical and chemical decomposition of kersantite. This contributed to understanding the importance of a comprehensive study of intrinsic and extrinsic parameters that influence the state of kersantite in cultural heritage objects as the main basis for future conservation and restoration works.

**Key words:** kersantite, the Small Staircase, cultural monument, architectural stone, physical-chemical decomposition, mapping, forms of degradation, surface processing

Scientific field: Geo-sciences

Scientific subfield: Petrology

UDC: 679.85:552.1(043.3)

# САДРЖАЈ

<b>1. УВОД.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ПРЕГЛЕД РАНИЈИХ ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. ПРЕГЛЕД ПРЕТХОДНИХ ГЕОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА         КАМЕНА .....</b>	<b>7</b>
<b>3. ГЕОГРАФСКИ ПОЛОЖАЈ КАМЕНОЛОМА .....</b>	<b>12</b>
<b>4. ПОЛОЖАЈ, ОПИС И КРАТАК ИСТОРИЈАТ ИСТРАЖИВАНИХ ОБЈЕКТА     ИЗГРАЂЕНИХ ОД КЕРСАНТИТА.....</b>	<b>13</b>
<b>5. ГЕОЛОШКА ГРАЂА ШИРЕГ ПОДРУЧЈА ТЕШИЋА МАЈДАНА.....</b>	<b>20</b>
<b>5.1. МЕЗОЗОИК.....</b>	<b>20</b>
5.1.1. Серпентинити .....	20
5.1.2. Офиолитски меланж.....	20
5.1.3. Доњокредни седименти (K <sub>1</sub> ).....	21
5.1.4. Горњокредни-палеогени седименти - флиш (K <sub>2</sub> ) .....	21
5.1.5. Стене горњојурског и кредног магматизма .....	21
5.1.6. Лампрофир .....	22
<b>5.2. КЕНОЗОИК.....</b>	<b>22</b>
5.2.1. Терцијарне магматске стене .....	22
5.2.2. Неогени седименти.....	23
5.2.3. Квартарне творевине.....	23
<b>6. ИСТОРИЈСКИ ПРИКАЗ НАЧИНА ОБРАДЕ И УГРАДЊЕ АРХИТЕКТОНСКОГ     КАМЕНА У СРБИЈИ ОД КРАЈА 19. ВЕКА ДО ДАНАС .....</b>	<b>24</b>
6.1.1. Смернице за градњу каменом крајем 19. века у Србији .....	29
<b>7. ПОВРШИНСКО РАСПАДАЊЕ СТЕНА - КАМЕНА.....</b>	<b>31</b>
7.1.1. Алтерационе промене .....	32
7.1.2. Физички процеси површинског распадања .....	32
7.1.3. Хемијски процеси површинског распадања .....	34
7.1.4. Форме распадања камена уграђеног у објекте.....	36
<b>8. КЛИМА БЕОГРАДА И ЊЕГОВЕ УЖЕ ОКОЛИНЕ .....</b>	<b>38</b>
<b>9. МЕТОДОЛОГИЈА ИСПИТИВАЊА.....</b>	<b>44</b>
<b>9.1. ТЕРЕНСКО ИСТРАЖИВАЊЕ У КАМЕНОЛОМУ .....</b>	<b>44</b>
<b>9.2. ТЕРЕНСКО ИСТРАЖИВАЊЕ ОДАБРАНИХ ОБЈЕКТА.....</b>	<b>45</b>
<b>9.3. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА .....</b>	<b>49</b>
9.3.1. Оптичка испитивања.....	49
9.3.2. Хемијска испитивања.....	50
9.3.3. Индекси површинског (хемијског) распадања .....	50
9.3.4. Рендгенска испитивања .....	52

9.3.5.	Скенирајућа електронска микроскопија (SEM-EDS).....	52
9.3.6.	Испитивања физичких карактеристика.....	53
9.3.7.	Одређивање привидне и стварне запреминске масе камена, отворене и укупне порозности - SRPS EN 1936:2006.....	53
9.3.8.	Одређивање упијања воде камена при атмосферском притиску – метода имерзије - SRPS EN 13755:2009.....	55
9.3.9.	Одређивање капиларног упијања воде камена - SRPS EN 1925:2009.....	56
<b>10.</b>	<b>МОРФОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА КЕРСАНТИТА У КАМЕНОЛОМУ.....</b>	<b>59</b>
<b>11.</b>	<b>ФОРМЕ ВРЕМЕНСКОГ ПРОПАДАЊА КЕРСАНТИТА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ.....</b>	<b>62</b>
11.1.	ГЛАВНЕ ГРУПЕ ФОРМИ РАСПАДАЊА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ.....	63
11.1.1.	Губитак каменог материјала.....	63
11.1.2.	Деколорација/наслаге-инкрустације.....	65
11.1.3.	Одвајање каменог материјала.....	68
11.1.4.	Пукотине.....	71
11.2.	СТАЊЕ КАМЕНИХ БЛОКОВА КЕРСАНТИТА ИСПОД ЗЕМЉЕ.....	72
11.3.	КАТЕГОРИЈЕ ОШТЕЋЕЊА КЕРСАНТИТА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ.....	73
11.4.	ИНДЕКСИ ОШТЕЋЕЊА.....	76
<b>12.</b>	<b>ФОРМЕ ОШТЕЋЕЊА НА ОСТАЛИМ ИСПИТИВАНИМ ОБЈЕКТИМА.....</b>	<b>77</b>
12.1.	СПОМЕНИК ЂУРИ ЈАКШИЋУ.....	77
12.2.	СПОМЕНИК ЈОВАНУ СКЕРЛИЋУ.....	81
12.3.	ЗГРАДА КЛАСНЕ ЛУТРИЈЕ (ВАСИНА УЛИЦА БР. 20).....	86
12.4.	НАРОДНИ МУЗЕЈ У БЕОГРАДУ.....	91
12.5.	ГРАДСКО ПРАВОБРАНИЛАШТВО (Тиршова 3) ЗГРАДА НАЧЕЛСТВА СРЕЗА ВРАЧАРСКОГ.....	93
12.6.	ОСНОВНА ШКОЛА КРАЉ ПЕТАР ПРВИ.....	97
<b>13.</b>	<b>ПЕТРОГРАФСКА СВОЈСТВА КЕРСАНТИТА.....</b>	<b>99</b>
13.1.	КЕРСАНТИТ ТЕШИЋА МАЈДАНА.....	99
13.1.1.	Крупнозрни варијетет керсантита.....	100
13.1.2.	Ситнозрни варијетет керсантита.....	104
13.2.	ПЕТРОГРАФСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КЕРСАНТИТА УГРАЂЕНОГ У ИСПИТИВАНЕ ОБЈЕКТЕ.....	106
<b>14.</b>	<b>ХЕМИЈСКИ САСТАВ КЕРСАНТИТА.....</b>	<b>112</b>
<b>15.</b>	<b>ХЕМИЈСКИ ИНДЕКСИ ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА.....</b>	<b>116</b>
<b>16.</b>	<b>МОРФОЛОШКЕ И ФАЗНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОДУКАТА РАСПАДАЊА (SEM-EDS И XRPD АНАЛИЗЕ).....</b>	<b>118</b>
<b>17.</b>	<b>ФИЗИЧКА СВОЈСТВА КЕРСАНТИТА.....</b>	<b>123</b>
17.1.	ЗАПРЕМИНСКА МАСА.....	123
17.2.	ПОРОЗНОСТ.....	124

17.3. УПИЈАЊЕ ВОДЕ.....	125
17.4. КАПИЛАРНО УПИЈАЊЕ ВОДЕ .....	126
<b>18. МОРФОЛОГИЈА РАЗЛИЧИТО ОБРАЂЕНИХ ПОВРШИНА КЕРСАНТИТА ....</b>	<b>129</b>
<b>19. ДИСКУСИЈА.....</b>	<b>132</b>
19.1.1. Узроци, процеси и продукти површинског распадања керсантита .....	134
19.1.2. Ефекти завршне обраде керсантита на интензитет површинског распадања .....	144
19.1.3. Утицај геометрије споменика и позиције блокова на распадање керсантита .....	146
<b>20. ЗАКЉУЧАК.....</b>	<b>150</b>
<b>21. ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>153</b>
<b>22. ЛИСТА КОРИШЋЕНИХ СИМБОЛА И СКРАЋЕНИЦА.....</b>	<b>172</b>

## 1. УВОД

Архитектонско-грађевински објекти изграђени од камена, због карактеристика трајности, остали су сачувани до данашњег тренутка и представљају важно културно наслеђе. Обавеза савременог друштва је да тако вредноване објекте/споменике одржава и сачува за будуће генерације, а познавање својстава камена представља једно од кључних знања потребних за предузимање свих сложених радњи у циљу очувања ових структура (Sleater, 1973; Misirlisoy and Günçe, 2016; Šekularac et al., 2019). Са друге стране, егзистирање споменика културе у срединама различитог степена агресивности (руралној и урбаној) иницира сложене процесе физичко-хемијске деградације уграђеног камена (Castillo-Miranda et al., 2017; Theodoridou and Török, 2019). Временска постојаност (алтерабилност), као сложено интринзично својство камена, у комбинацији са технолошким својствима обрадљивости, пресудан је чинилац степена и интензитета деградационих промена које се манифестују кроз различите форме и продукте површинског распадања (Bilbija i Matović, 2009).

Последње деценије проучавања трајности магматских стена уграђених у споменике културе резултирале су данашњим сазнањима о облицима пропадања који су им својствени, као и разумевањем узрока и механизма деградације, што је основ за правилну санацију оштећења и способност контроле фактора и динамике даљег пропадања (Baptista-Neto et al., 2006; Novaković et al., 2016; Basu et al., 2020). Љускање, љуспање, формирање кора, грануларна дезинтеграција као и ефлоресценција су регистровани облици пропадања на магматским стенама као што су гранити (Sanjurjo et al., 2016), трахити (Siegesmund and Brimblecombe, 2013; Graue et al., 2013), габро (Matović et al., 2010). Јединствено виђење ових истраживања је да степен разградње камена првенствено зависи од интринзичних својстава стене, као што су минерални састав и физичко-механичка својства, као и да степен алтерисаности стене битно утиче на њену даљу подложност процесима површинског пропадања (Ren et al., 2022). Предложени модел деградације гранита у урбаним срединама објашњава узрочно-последичну везу између алтерационих промена главних петрогених минерала који формирају стене, физичких својстава и одређених облика распадања (Basu et al., 2020). Главни екстринзични узрок пропадања магматских стена је вода у свим њеним облицима (Amoroso and Fassina, 1983; Winkler, 1997; Siegesmund and Snelthage, 2014). Она је главни носилац физичке, хемијске и биолошке деградације камена. Вода контролише транспорт, кристализацију/рекристализацију и хидратацију соли, транспортује атмосферске загађиваче, хемијски раствара камен и изазива разградњу камена током цикличних промена влажности и температуре ваздуха (Winkler, 1994). Сви процеси биоразградње одвијају се у присуству воде/влаге (Frasca and Yamamoto, 2004). Соли су такође кључни фактор у деградацији камена, а врста и извори ових секундарних продуката зависе од врсте коришћених материјала и услова околине (Winkler, 1994; Amoroso and Fassina, 1983; Schiavon et al., 1995; Charola and Blauer, 2015).

На трајност камена често утиче положај објекта на широј локацији, положај блокова унутар објекта, као и чињеница да се поједини делови објекта током употребе могу наћи у промењеним околностима или изложени различитим антропогеним утицајима (Fookes and Lee, 2007; López-Arce et al., 2010; Satterthwaite, 2008).

Начин технолошке обраде камена је такође један од значајних антропогених фактора који предодређују механизме његовог пропадања. Уколико се занемари естетски допринос, штоковање као облик површинске обраде камена, због специфичног механичког поступка, ствара „вештачки ослабљену” површинску зону камена (Vázquez et al., 2016). Тако вештачки створене микропукотине чине површинску зону камена подложну љускању/љуспању и убрзавају процес пропадања у условима изложености води, мразу и солима (López-Arce et al., 2010; Momeni et al., 2015; Freire-Lista et al., 2015; Freire-Lista and Fort, 2016).

Сви горе поменути интринзични и екстринзични фактори иницирају у камену физичке и хемијске процесе распадања. У урбаним агресивним срединама они се најчешће одвијају



симултано у камену узрокујући напоне који се временом акумулирају и резултирају распадањем камена у различитим формама (Ruffolo et al., 2023). Процеси како физичког тако и хемијског распадања камена условљени су доминацијом неколико кључних параметара што резултира нелинеарном прогресијом распадања (Doehne and Price, 2010) па сходно наведеном, њихово проучавање захтева детаљно испитивање не само камена као супстрата, већ и корелацију са свим варијаблама окружења и факторима којима је камен изложен (Fasina, et al., 2001; Smith and Prikryl, 2007; McCabe et al., 2007).

Егзактно дефинисање узрока распадања камена, уз свеобухватну процену стања споменика културе и разумевање процеса разградње, захтева мапирање камена као неопходан дијагностички поступак за идентификацију стања културног добра. Мапирање форми распадања пружа свеобухватне информације о врсти и дистрибуцији промена на површини камена (Doehne and Price, 2010; Fitzner et al., 1992; Siegesmund et al., 2002; Svahn, 2006). Користећи морфолошке и геометријске критеријуме промене површине камена, омогућена је класификација различитих форми распадања (Vergès-Belmin et al., 2008; Siedal et al., 2011). „Фицнеров модел мапирања“ је метода за прецизну, објективну литолошку класификацију и регистрацију форми и интензитета распадања уз егзактно лоцирање категорија оштећења и процену прогресивности даљег распадања која је нашла велику примену у научној пракси (Fitzner et al., 1995, 1997).

У поређењу са гранитима, чије је распадање у споменицима културе релативно често истраживано, студије понашања распадања лампрофит/керсантита у урбаним условима ретко се могу наћи у научној литератури. Утицај циклуса влажења/сушења на димензионе промене керсантита проучавали су само Тиено и сарадници [Tiennot et al.] (2018) који истичу да значајно присуство филосиликата (примарног и секундарног порекла) значајно утиче на бубрење, појаву смицања дуж равни цепљивости минерала, стварање пукотина, што све заједно смањује механичку отпорност керсантита.

Предмет истраживања докторске дисертације су физичко-хемијски процеси површинског распадања керсантита из Тешића мајдана уграђеног у градитељско наслеђе Београда. Керсантит је магматска стена, специфичног хемијског и минералног састава, изграђена доминантно од биотита и плагиокласа. Керсантит лежишта Тешића мајдан код Рипња, у стручној литератури и пракси познат као „Рипањски керсантит“, представља значајан архитектонски грађевински камен Србије и маркантно је обележје престоничке архитектуре прве половине 20. века. Масовно је коришћен у изградњи Београда до Другог светског рата, а најрепрезентативнији објекти на којима је коришћен су: Народна скупштина Србије, Мало степениште Савског шеталишта, Народни музеј, споменик Ђури Јакшићу, споменик Јовану Скерлићу, зграда Класне лутрије и многи други знаменити објекти Београда. На згради Народне скупштине Србије, Народног музеја и згради Класне лутрије керсантит је коришћен за изградњу сокле и појединих делова фасада (улазни портали, подеони венци, спољашња и унутрашња степеништа), на згради Градског правобранилаштва за изградњу спољашњих и унутрашњих степеница, док су споменици Ђури Јакшићу, Јовану Скерлићу и Мало степениште у потпуности изграђени од овог камена. На свим споменицима/објектима се запажају бројни трагови временског распадања керсантита различитог интензитета и порекла (Novaković et al., 2015, 2016; Новаковић и Матовић, 2019). Истраживањима је обухваћено детаљно проучавање петролошких и физичких карактеристика како керсантита у каменолому Тешића мајдан, тако и керсантита уграђеног у Мало степениште и његове алтерабилности након деценијске изложености различитим екстринзичним факторима агресивне урбане средине. Мало степениште је изабрано за студију случаја због сложеног положаја, геометријске конструкције објекта, различите изложености блокова керсантита временским утицајима током дуге историје споменика и последичног развоја бројних сложених механизма деградације. Поред детаљног проучавања врста и степена деградације свежег керсантита у каменолому (руралној средини) и керсантита уграђеног у одабрани споменик

културе (студија случаја), извршено је и снимање стања керсантита у другим, горе поменутиим споменицима изграђеним од овог камена са аспекта корелације и утицаја начина површинске обраде на његову постојаност. Истраживања студије случаја спроведена су пре конзерваторско – рестаураторских радова извршених 2018. године, након којих је добијена могућност узорковања деградираних блокова керсантита, на којима су спроведена додатна испитивања. Због споменичког значаја свих других објеката који су били предмет истраживања, узорковање је било лимитирано и оријентисано на макроскопске опсервације. Поред детаљног проучавања интринзичних фактора временске алтерабилности керсантита која обухватају петролошке и хемијске карактеристике „свежих“ узорака керсантита из каменолома Тешиха мајдана и деградираних узорака из Малог степеништа, као и физичка својства истих, предмет докторске дисертације је и проучавање физичко-хемијских процеса који се одигравају током површинског распадања керсантита као и интензитет деловања ових процеса у руралној и урбаној средини. Детаљно су проучавани и екстринзични фактори који су утицали на данашње стање споменика изграђених од керсантита. Разматрани су првенствено начин површинске обраде, утицај атмосферских фактора, као и утицај геометрије и позиције камених елемената у структури објекта. У оквиру ове комплексне поставке, а полазећи од проучавања „свеже“ стене из каменолома, извршена је анализа утицаја примарних алтерационих промена главних петрогених минерала на секундарне продукте површинског распадања у агресивној урбаној средини. Кроз различите индексе хемијског распадања засноване на миграцији јона и кроз величину промена физичких својстава узорака свежих и деградираних керсантита, анализиран је степен површинског распадања који се одиграо у протеклих 100 година изложености агресивним факторима деградације колика је приближна старост објекта. Осим наведеног, подједнак значај у истраживању има и проучавање утицаја покривености камених елемената тлом и другим грађевинским материјалима (асфалтне мешавине) на степен очуваности камених површина споменика, као и проучавање утицаја геометријског положаја камених елемената у споменику на степен њиховог пропадања. На основу ових полазних основа, докторска дисертација се базирала на следећим основним хипотезама:

- Форме и интензитет распадања керсантита у каменолому (руралној средини) и споменицима културе (урбаној средини) разликују се по врсти и интензитету промена,
- Распадање керсантита, без обзира на окружење, зависно је од интринзичних - петролошких и физичких карактеристика камена и екстринзичних фактора (атмосферских и микроклиматских фактора, положаја и начина градње објекта, антропогених утицаја),
- Врста главних и секундарних минералних конституената керсантита и степен њихове примарне алтерисаности је најдоминантнији интринзични фактор од утицаја на временску трајност камена уграђеног у споменик културе,
- Технолошки процес површинске обраде керсантита, као антропогени утицај, је екстринзични фактор који опредељује реактивност камена на све спољашње утицаје,
- Мапирање типова и категорија оштећења омогућава прецизно и поуздано детерминисање узрока и индекса распадања као индикатора брзине распадања и ургентности конзерваторског третмана,
- Декохезија минералних зрна и физичка деградација камена у виду љускања и љуспања узроковани су дејством јаким кристализационих/хидратационих притисака соли и леда,
- Архитектонске одлике споменика као што су геометрија и уклапање у непосредно окружење имају двоструко деловање на алтерабилност керсантита; са једне стране могу да допринесу повећању интензитета појединих процеса пропадања, док са друге стране пружају значајну заштиту од временских утицаја, односно његову природну

„конзервацију“.

Заштита градитељског наслеђа захтева мултидисциплинарни приступ и разумевање више научних области које представљају сублимацију знања различитих научних дисциплина. Научна знања о особинама материјала комбинована са архитектонском инжењерском праксом дају комплексан приступ актуелним темама и проблемима са којима се суочава конзерваторска струка. Истраживања примењена у докторској дисертацији својим резултатима доприносе научној јавности која се бави геологијом, али и архитектуром, проучавањем неорганских порозних грађевинских материјала и примењеном конзервацијом. Системски су приказане детаљне петрофизичке карактеристике керсантиа и потврђена важност разумевања и сагледавања синергијског утицаја својстава коришћеног материјала, архитектуре споменика, услова његове микро средине и свих утицаја и механизма који доводе до деградације споменика културе изграђених од камена. Разумевање механизма пропадања керсантиа даје одговоре који до сада нису научно испитани и омогућује правилну и адекватну заштиту на вредним објектима градитељског наслеђа престонице.

## 2. ПРЕГЛЕД РАНИЈИХ ИСТРАЖИВАЊА

За потребе израде докторске дисертације извршен је преглед публикованих радова, анализа и резултата досадашњих истраживања како на пољу геолошких карактеристика керсантиста, тако и на пољу физичко-хемијских процеса површинског распадања стена и камена уграђеног у објекте, са посебним освртом на површинско распадање магматских стена. Тематска комплексност анализираних публикација условила је приказ досадашњих истраживања у два дела. Први део је обухватио преглед резултата досадашњих истраживања геолошких карактеристика ширег подручја Рипња, док се други део овог поглавља односи на досадашње резултате истраживања физичко-хемијских процеса распадања стена и камена уграђеног у објекте у руралној и урбаној средини.

### 2.1. ПРЕГЛЕД ПРЕТХОДНИХ ГЕОЛОШКИХ ИСТРАЖИВАЊА

Прве писане податке о геологији терена Тешића мајдана дао је Буе (Boue, 1840) који је у оквиру научне студије „Геолошка скица европске Турске“ (*Esquisse géologique de la Turquie d'Europe*) описао путовања по тадашњим турским земљама на југу Европе (делови Босне, Србије, Црне Горе, Албаније, Македоније, Бугарске и Грчке) дајући крајње једноставна геолошка запажања о овим теренима. О геолошкој грађи Авале писао је Гудовић (1875) констатујући да су стене које изграђују Авалу девонске или карбонске старости. Жујовић 1886. године први пут помиње стене Тешића мајдана и означава их као керсантисти, а детаљнији опис ове стене и запажање да су керсантисти утиснути паралелно међу кредним слојевима седиментних стена даје у својим каснијим радовима (Жујовић, 1888, 1900). Исти аутор даје и прву скицу геолошке карте околине Београда са детаљним подацима о односу седимента и вулканита у овој зони (Жујовић, 1989), док Радовановић (1902) закључује да су керсантисти горњокредне старости. Истраживањем овог подручја бавио се и Цвијић који је описао стене Авале и околних подручја сврставајући их у такозвану прелазну зону (Цвијић, 1909, 1924, 1926). Антула (1910) је у околини Авале издвојио серпентините, лампрофиге и риолитске жице. Прве податке о тектоници планине Авала и старост седиментних стена разматра Петковић (1910, 1912, 1925) истичући да су серије седиментних стена са честим интрузијама лампрофиге, и да оне које садрже аптихусе у слојевима рожнаца, одговарају горњојурској или доњокредној старости. Након минералолошких и петролошких истраживања стена Авале Димитријевић (1928. и 1931) сврстава стену из Тешића мајдана у лампрофиге и истиче да се правац пружања ових интерстратификованих жица лампрофиге мења према положају слојева у које су се ињектовале. Горчанин (1938) указује да најстарије слојеве на простору Рипња чине аргилошисти и глинци са жицама и сочивима лампрофиге и те слојеве сврстава у дијабаз-ројначку формацију горњојурске старости.

Прве податке о квалитету рипањског керсантиста као грађевинског камена дао је Ванђел (1956). Аутор сматра да ове стене имају задовољавајућа физичко-механичка својства за употребу као грађевински и архитектонски камен. Илић (1962) проучава кварцлатитски дајк који пресеца стене Тешића мајдана истичући његову горњомиоценску старост. Изданке у околини Београда проучавали су Анђелковић (1954, 1964 и 1973) као и Анђелковић и Милојевић (1964). Они су издвојили четири фазе магматизма: прегорњојурски магматизам, горњојурски, титон-беријаски и горњокредни магматизам. Детерминацију стена Тешића мајдана као „дијабаз-спилити“ дали су Анђелковић и Обрадовић (1967).

Приликом израде основне геолошке карте СФРЈ и детаљног геолошког проучавања простора шире околине Београда (Лист Панчево), стене Тешића мајдана су описане као лампрофиге сивозелене боје, порфиرويدне структуре које према минералном саставу (биотит, калијски фелдспат, плагиоклас, моноклинични пироксен, хлорит, апатит, калцит, ретко кварц и металични минерали) одговарају керсантист-минетама. Генеза лампрофиге се везује за присуство тада још неоткривеног интрузива гранитоидног састава, а старост за магматизам палеогена (Ивковић и др., 1966).

Нова, детаљна минералошко-петролошка и хемијска проучавања стена Тешића мајдана спроводе Илић и Кнежевић (1968) закључујући да према минералном саставу и начину појављивања ове стене граде мањи лаколит и припадају спилитима, а не жичним керсантитима како се до тада сматрало. На основу хетерогености у погледу свежине, боје и крупноће састојака, аутори су издвојили: тамнозелени, најкрупнозрнији основни спилит, зеленосив, светлосив, ситнозрни млађи спилит и тамносив, врло ситнозрни спилит рубне фације. Издвојене групе имају генерално исти минерални састав тј. изграђени су од: албита, биотита и аугита као главних састојака који граде офитску структуру, споредног илменита трансформисаног у леуоксен, ретког пирита и секундарних хлорита, калцита и епидота. Аутори су дошли до закључка да се спилити одликују повишеним садржајем калије, а у погледу старости прихватају већ утврђени концепт горњојурске старости (Илић и Кнежевић, 1968). Проучавањем еруптивних стена између Беле стене, Ресника и Кијева, Терзић (1971) претходно декларисане керсантите такође петролошки детерминише као спилите.

Анализом руптурног склопа шире околине Авале и карактеризацијом различитих кинематских фаза бавили су се Ђоковић и Маровић (1990). Нова детаљна проучавања петролошких и геохемијских карактеристике еруптивних стена Авале односно геохемијских карактеристика главних и акцесорних минерала, резултирала су подацима о старости ових стена, међу којима су керсантити описани као најстарије стене (K/Ar - 54,58 мил. година) (Vasković, 1990; Vasković i Jović, 1993; Vasković i Matović, 1996).

Новија структуролошка и петролошка проучавања каменолома Тешића мајдана са аспекта оцене грађевинског камена, указала су на постојање резерви довољних само за послове рестаурације објеката изграђених од овог камена на територији града Београда (Aničić i Miroslavljević, 1992).

Последњу деценију прошлог века и почетак 21. века обележила су нова проучавања геолошке грађе Авале, али са аспекта њеног регионалног геотектонског склопа и припадности. Значајне резултате у овој области дали су: Тољић (1995) који је геолошку грађу Авале окарактерисао као моноклину структуру чију грађу усложњавају обдуковани серпентинити и утиснути дајкови; Ђоковић и др. (1997) објашњавају механизам интрудовања плутона авалског магматског тела, док Цветковић и сарадници (Cvetković et al., 2004) и Прелевић и сарадници (Prelević et al., 2005) у проучавање порекла и геодинамичког значаја терцијарног постколизивног магматизма у Србији укључују и керсантите из потока Пречице. Аутори закључују да су ултракалијске примарне магме, од којих потичу керсантити, настале топљењем метасоматизованих литосферских делова. Детаљна проучавања геолошке грађе простора између Авале и Космаја резултирала су израдом геолошке карте размере 1:25000 (Toljić, 2006; Toljić et al. 2018).

Синтезу резултата дотадашњих истраживања и геотектонску припадност керсантита Сава-Вардар зони, као представника ултракалијског каснокредног вулканизма овог дела Балканског полуострва, описали су у својим радовима Шмит и сарадници (Schmid et al., 2008), Устажевски и сарадници (Ustaszewski et al., 2009), Цветковић и сарадници (Cvetković et al., 2016) и Прелевић и сарадници (Prelević et al., 2017). Керсантите Тешића мајдана, код Рипња, Тољић и сарадници (Toljić et al., 2018) описују као лампрофирски сил утиснут у околне кредне „парафлишне“ седименте, главну постофиолитску седиментну јединицу. Најновији допринос геодинамичкој и геохронолошкој карактеризацији овог терена уз реконструкцију примарног састава лампрофира дају Сокол и сарадници (Sokol et al., 2020). Њихови резултати петролошких и геохемијских проучавања лампрофира овог локалитета у комбинацији са досадашњим публикованим резултатима, дају нове одреднице које се могу сумирати у следећем: керсантит је настао у најстаријој фази горњокредног ултракалијског вулканизма Сава-Вардар зоне; моделовањем примарног минералног састава стене и петролошком детерминацијом примарне стене као ваугнерит (плутонски еквивалент керсантита), закључено је да је каснија спилитизација узроковала обогаћење натријумом и осиромашење калијумом

што отежава јасну класификацију алтерисане стене; лампрофир је продукт метасоматски измењеног литосферског омотача насталог рециклирањем старе континенталне коре или њених седиментних деривата.

## 2.2. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА КАМЕНА

Проучавање површинског распадања стена датира из давне 1938. године када Голдич (Goldich) истражује редослед распадања минерала магматских и метаморфних стена и указује на зависност стадијума површинског распадања од величине зрна, порозности, односно релативне стабилности минерала под различитим условима температуре и влажности ваздуха. Од тада су веома сложени утицаји који доводе до распадања стена проучавани са аспекта средине у којој се оне налазе и њихове постојаности као градивних елемената у објектима.

Стене су у свом природном окружењу (на месту настанка) стабилне, али када се нађу изложене атмосферским утицајима оне подлежу интензивним површинским променама чији интензитет зависи од бројних унутрашњих (интринзичних) и спољашњих (екстринзичних) фактора (Price, 1995). Процеси површинског распадања могу бити физички, хемијски и биолошки и осим ретких појединачних деловања, у природи се ови процеси најчешће одигравају симултано. Физички процеси се одвијају углавном на површини земље, док хемијски могу досећи дубине од неколико стотина метара испод површине (Chorley, 1969). Који ће процеси пресудно утицати на распадање зависи како од природе саме стене тако и од климатских фактора (Price, 1995). Процеси површинског распадања могу довести до различитих појединачних или удружених форми деградације: губитка каменог материјала (Karpuz and Paşamehmetoğlu, 1992; Szymanski and Szkaradek, 2018), појаве микропукотина (Ündül and Tugrul, 2012; Sousa, 2013; Ismail et al., 2014), распадања интер и интракристалних веза (Hartley, 1974; Goswami, 1984; Ismail et al., 2014; Borrelli et al., 2014; Rigoroulos et al., 2015), и увећања запремине пора камена (Ismail et al., 2014; Ündül and Tugrul, 2012; Zhao et al., 1994).

Процеси *физичког распадања* стена доводе до механичког дробљења и уситњавања стене без промене њеног хемијског састава. Физичко распадање стена зависи од различитих екстринзичних фактора као што су температура, вода, лед, соли, ветар, биолошки организми. Неки од најважнијих типова физичког распадања стена настају услед промена температуре која изазива термичке дилатације минерала, што доводи и до појаве пукотина и лома (Fredrich and Wong, 1986; Fei, 1995; Gunzburger et al., 2005). Распадање камена под утицајем мрза догађа се услед притиска на зидове пора који се генерише растом кристала леда (Ondrasina et al., 2003; Vlcko et al., 2005). За ове процесе су кључни интринзични параметри камена као што су величина и дистрибуција пора, обзиром да је поред осталог раст кристала леда омогућен дотоком воде кроз капиларе. За процесе распадања камена су кључне поре пречника 0,1-1  $\mu\text{m}$  (Torgasa, 2005). Понављање процеса мржњења-отапања иницира механичку дезинтеграцију стене, а деструктивни утицај напона на кохезионе везе минерала настаје при дневним осцилацијама температуре у зони око 0  $^{\circ}\text{C}$  чије понављање зависи од положаја камена у објекту и изложености Сунчевом зрачењу (Brimblecombe, 2014). Проучавањем спољних фактора као што су промене температуре, кристализација леда или соли и њиховим утицајем на повећање микропукотина и смањење чврстоће камена бавили су се Винклер (Winkler, 1997), Буж и сарадници (Buј et al., 2011) и Васкез и сарадници (Vázquez et al., 2018), а утицајем на појаву одвајања и љуспања Бромблет и сарадници (Bromblet et al., 1996), Бенавенте и сарадници (Benavente et al., 2008) и Васкез и сарадници (Vázquez et al., 2008).

Са водом у камен продиру и растворљиве соли које у порама камена, својим хидратационим и кристализационим притисцима на околне минерале, узрокују физичка оштећења камена па се данас сматрају једним од најчешћих узрочника физичког распадања споменичког наслеђа изграђеног од камена (Amoroso and Fasina, 1983; Charola, 2000; Doehne, 2002). Врсте соли и извори одакле потичу соли које изазивају оштећења на објектима изграђеним од камена могу

да варирају у зависности од врсте коришћених материјала и услова животне средине (Winkler 1994; Amoroso and Fassina, 1983; Schiavon et al., 1995; Charola and Bläuer, 2015). Соли могу настати из различитих извора: од постојећих минерала камена или градивних компоненти објекта (нпр. малтера, цемента, опеке и др.) или су водом унете као растворени састојци из тла. Неке соли, као што су  $SO_x$  и  $NO_x$ , настају услед реакције камена са атмосферским аерозагађивачима. Услед негативног утицаја соли јављају се различите форме распадања као што су зрнаста дезинтеграција, потклубчење, љуспање и љускање (у појединачним и вишеструким облицима) као и стварање црних кора. Генерално, развој процеса физичког распадања камена највише зависи од фактора као што су минерални састав, порозност, врста и количина присутних соли, присуство воде, климатски услови и механичка отпорност камена (Benavente et al., 2007; Ruiz-Agudo et al., 2007; Thomachot-Schneider et al., 2011; Steiger et al., 2014).

Процесе површинског распадања стена и њихов утицај на ерозију тла проучавали су Робинсон и Мозес (Robinson and Moses, 2011) и Вилс (Viles, 2013). Климатски утицаји и промене, као и разумевање њихових утицаја на процесе распадања стена били су тема многих радова (Neall, 1977; Viles, 2002; McCabe et al., 2011; Smith et al., 2011; Viles and Cutler, 2012). Тако је на пример утврђено да су *хемијски процеси* распадања, у односу на процесе физичког распадања, доминантнији у суптропским и тропским климатским регионима са високим температурама и великом количином падавина (Blight and Leong, 2012; Dinis et al., 2017; Perri, 2020).

Током процеса физичког и хемијског распадања долази до значајних промена минералног и геохемијског састава стене које даље узрокују деградацију примарних својстава стене (O'Brien et al., 1995; Perri et al., 2016). Оксидација, разлагање и растварање као главни хемијски процеси површинског распадања првенствено захватају главне минералне фазе стене, посебно фелдспате, биотит и друге бојене састојке, а као најзначајнији секундарни минерални продукт њиховог распадања, настају минерали глина (Perri et al., 2016). Опште је познато да се током процеса површинског распадања неки алкални и земноалкални елементи лако испирају/излучују из стена, односно да њихови резидуални остаци са појединим компонентама из атмосфере формирају нове минерале који су у стабилној или метастабилној равнотежи са околином (Loughnan, 1969). Растворљивост минерала условљена је јонским потенцијалом њихових хемијских елемената те се минерали са елементима ниског јонског потенцијала лакше растварају од минерала са елементима високог јонског потенцијала тј. најлакше се излучују:  $Ca^{2+} > Na^{+} > Mg^{2+}$ ,  $K^{+} > Fe^{2+}$  (Васковић и Костић, 2022).

Осетљивост биотита на хидратационе процесе и њихова трансформација у секундарне продукте (најчешће вермикулит) праћено распадањем матичне стене били су предмет проучавања бројних аутора (Sneath and Wendler, 1997; Scherer and Jimenez-Gonzalez, 2005; Tiennot et al., 2017). Значајне податке о генези вермикулита као продукта површинског распадања биотита под утицајем циркулације атмосферске воде, испирању  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ , и  $Fe_2O_3$  из биотита уз обогаћење  $SiO_2$  и  $MgO$ , кроз континуиране физичко-хемијске процесе (растварање, катјонску измену, апсорпцију и др.) дали су бројни аутори (Boettcher, 1966; Dubinska and Wiewiora, 1988; Hillier and Marwa, 2013; Tematio et al., 2017). Проучавани су механизми трансформације биотита у вермикулит, односно замени  $K^{+}$  са  $H_2O$  молекулима, оксидацији  $Fe^{2+}$  у  $Fe^{3+}$  и замени  $OH^{-}$  са  $O^{2-}$  уз постанак мешане-слојевите структуре биотит-вермикулит (Bassett, 1961; Srodon, 1999; Wilson, 1970, 1986; Moon et al., 1994; Harraz and Hamdy, 2010; Murakami et al., 2003). Детаљније су проучаване фазне секвенце површинског распадања биотита (Ross et al., 1982; Fanning et al., 1989; Moon et al., 1994), а публиковани су и резултате о брзини трансформације, утицају величине зрна на брзину замене  $K^{+}$  са хидратисаним катјонима (Basset, 1961; Scoot, 1968; Ross and Rich, 1973). Као кључни фактор за трансформацију биотита у вермикулит оцењена је расположивост  $Mg$  у раствору (Hoda and Hood, 1972; Murakami et al., 2003).

Потреба истраживача за квантификањем процеса хемијског распадања, евалуације геохемијских промена стена и мобилности елемената у процесу површинског распадања, резултирала је развојем индекса распадања и њиховој широкој употреби до данашњих дана (Jenny, 1941; Ruxton, 1968; Parker, 1970; Nesbitt and Young, 1982; Brimhall and Dietrich, 1987; Fedo et al., 1995; Gaillardet et al., 1999). Први индекс базиран на ослобађању алкалија и CaO при распадању фелдспата предложио је Харасовиц (Harrassowitz, 1926), док је Фогт (Vogt, 1927) при предлагању свог индекса истакао степен резидуалног карактера стене третирајући калијум као имобилну компоненту. У област научног истраживања Реич (Reiche, 1943) уводи два индекса хемијског распадања PI и WPI. Док први индекс представља однос силиције и слабо мобилних елемената, други индекс представља однос мигративних оксида према суми главних оксида. Фокел (Vogel, 1975) модификује WPI индекс третирањем K<sub>2</sub>O као мобилне компоненте, а изузимањем H<sub>2</sub>O, FeO и TiO<sub>2</sub> из прорачуна индекса. Паркеров индекс одражава јачину веза најмобилнијих елемената стене (оксида алкалних и земноалкалних елемената, Parker, 1970), док хемијски индекс алтерације CIA прати прогресивну промену плагиокласа и К-фелдспата као најчешћих минерала у магматским стенама (Nesbitt and Young, 1984). Харноис (Harnois, 1988) предлаже индекс распадања CIW базиран на претпоставци да се Na и Ca испирају, док се имобилни Al обогаћује при процесу површинског распадања. Федо и сарадници (Fedo et al., 1995) успостављају два нова индекса - индекс алтерације плагиокласа (PIA) настао модификацијом CIA индекса и индекс продуката временског распадања (PWI).

Интензитет површинског распадања квантификован горе описаним хемијским индексима и моделовање понашања стена у том процесу разматран је у бројним публикацијама (Irfan, 1999; Gupta and Rao, 2001; Ng et al., 2001; Duzgoren-Aydin et al., 2002; Price and Velbel, 2003; de Jayawardena and Izawa, 1994; Okewale and Coop, 2018). Окевале (Okewale, 2020) је један од ретких аутора који квантитативно повезује хемијске индексе са степеном отпорности стене на временске утицаје. Међутим, и поред широке и дугогодишње примене поменутих индекса у научно-истраживачким радовима, они имају бројна ограничења и недостатке која данас захтевају критички став при тумачењу добијених резултата.

Значајни резултати о процесима биолошке деградације стена и камена уграђеног у објекте културног наслеђа публиковани су у бројним радовима (Paine et al., 1933; Pochon and Jatou 1967, 1968; Strzelczyk, 1981; Caneva and Salvadori, 1989; Griffin et al., 1991; May et al., 1993; Warscheid and Braams, 2000; Siegesmund et al., 2002). Док се раније сматрало да биодеградацији увек претходе процеси физичког и хемијског распадања стене који својим деструктивним деловањем „припреме“ површину стене за развој биолошке колонизације, савремена истраживања откривају да се ефекти бидеградације могу јасно регистровати врло брзо након излагања површине камена спољашњим агресивним факторима средине (Warscheid, 1996; de la Torre et al., 1991, 1993; Gaylarde and Morton, 1999; Warscheid and Braams, 2000). На механичка напрезања минерала услед циклуса ширења и скупљања биогеног филма унутар порног система камена указали су Воршајд (Warscheid, 1996) и Дорниден и сарадници (Dornieden et al., 2000), док су бројни радови публиковани о последичној промени порне мреже и путева циркулације влаге (Krumbein, 1988; Garty, 1991; Warscheid and Krumbein, 1994; Warscheid and Braams, 2000). Ефекат биодеградације гранита и кречњака кроз физичку деградацију продирањем хифа лишаја у стену и хемијски утицај органске киселине са удруженим растом неорганских соли приказан је у раду Шиавона (Schiavon, 2002).

Проучавањем ефеката процеса површинског распадања на камен уграђен у објекте бавили су се бројни научници (Fitzner et al., 1992; Fitzner et al., 2002a; Fitzner et al., 2002b; Pope et al., 2002; Prikryl and Viles, 2002; Smith, 2003; Siegesmund et al., 2004; Turkington and Paradise, 2005; Prikryl, 2007; Smith et al., 2008; Viles, 2013). Обзиром да су за грађевине историјског наслеђа масовно употребљаване лако обрадиве, углавном карбонатне стене, вековна употреба је омогућила добро познавање и разумевање њиховог понашања у атмосферским условима (Amoroso and Fasina, 1994; Siegesmund and Sneathlaga, 2014). Последњих деценија правац научног



истраживања скоро потпуно је оријентисан на истраживање могућности консолидације и заштите ових стена. Тврде силикатне магматске стене, посебно поједини литотипови попут диорита, сијенита и керсантита, ретко су коришћени као градитељски камен. Последично они су недовољно истражени, за разлику од гранита, габра, базалта, андезита чије је понашање у урбаним срединама под утицајем различитих спољних фактора на њихово пропадање и разградњу, разматрано у бројним научним радовима (Siegesmund et al., 2002; Basu et al., 2020; Patil and Kasthurba, 2020; Patil et al., 2021; Çelik and Sert, 2021). Базичне магматске стене, познате као „*црни гранити*”, су се историјски показале стабилнијим на временске утицаје од петролошки правих гранита (Matović et al., 2010; Morales Demarco et al., 2011). Разлог за то се приписује минералном саставу гранита и њиховој подложности хемијским процесима као што су каолинизација, серицитизација и др. (Stoch and Sikora, 1976; Schiavon, 2007), односно мањој порозности „*црних гранита*” па тиме и мањој способности упијања воде што их свеукупно чини постојанијим стенама (Siegesmund and Snethlage, 2014).

Проучавања понашања магматских стена уграђених у споменике културе резултирале су данашњим сазнањима о облицима разградње, као и разумевањем узрока и механизма деградације, што је основ за правилну санацију оштећења и способност контроле фактора и динамике даљег распадања (Baptista-Neto et al., 2006; Novaković et al., 2016; Basu et al., 2020). Форме распадања као што су љускање/љуспање, формирање и одвајање коре, зрнаста дезинтеграција и грусирање, као и ефлоресценција, су већ добро познати облици пропадања гранита (Sanjurjo et al., 2016), трахита (Siegesmund and Brimblecombe, 2013; Graue et al., 2013) и габра (Matović et al., 2010). И поред опште прихваћеног става да степен разградње камена највише зависи од интринзичних својстава стене, као што су минерални састав и физичко-механичка својства (Ren et al., 2022), утицај средине којој је камен изложен (рурална/урбана) је подједнако важан фактор. Узрочно-последичну везу између облика распадања и физичких својстава, односно алтерационих промена главних минерала гранита у урбаним срединама разрадили су Басу и сарадници (Basu et al., 2020). У поређењу са гранитима чије је распадање релативно често истраживано (Garcia-Talegon et al., 1999; Matias and Alves 2002; Vázquez et al., 2018; Sousa et al., 2018), студије процеса распадања лампрофира у урбаним условима се ретко могу наћи у научној литератури. Утицај циклуса влажења/сушења на промене керсантита проучавали су само Тинот и сарадници (Tiennot et al., 2018) који истичу да значајно присуство филосиликата значајно утиче на бубрење, појаву смицања дуж равни цепљивости, стварање пукотина, што све заједно смањује механичку отпорност керсантита.

Генерално, без обзира на окружење у коме се неки камен налази, главни екстринзични узрок физичке, хемијске и биолошке деградације уграђеног камена је вода у свим њеним облицима. Она омогућава кристализацију и хидратацију соли, транспортује атмосферске загађиваче, хемијски раствара камен и изазива разградњу камена током цикличних промена релативне влажности и температуре ваздуха (Winkler, 1994). Сви процеси биоразградње одвијају се искључиво у присуству воде/влаге (Frasca and Yamamoto, 2004).

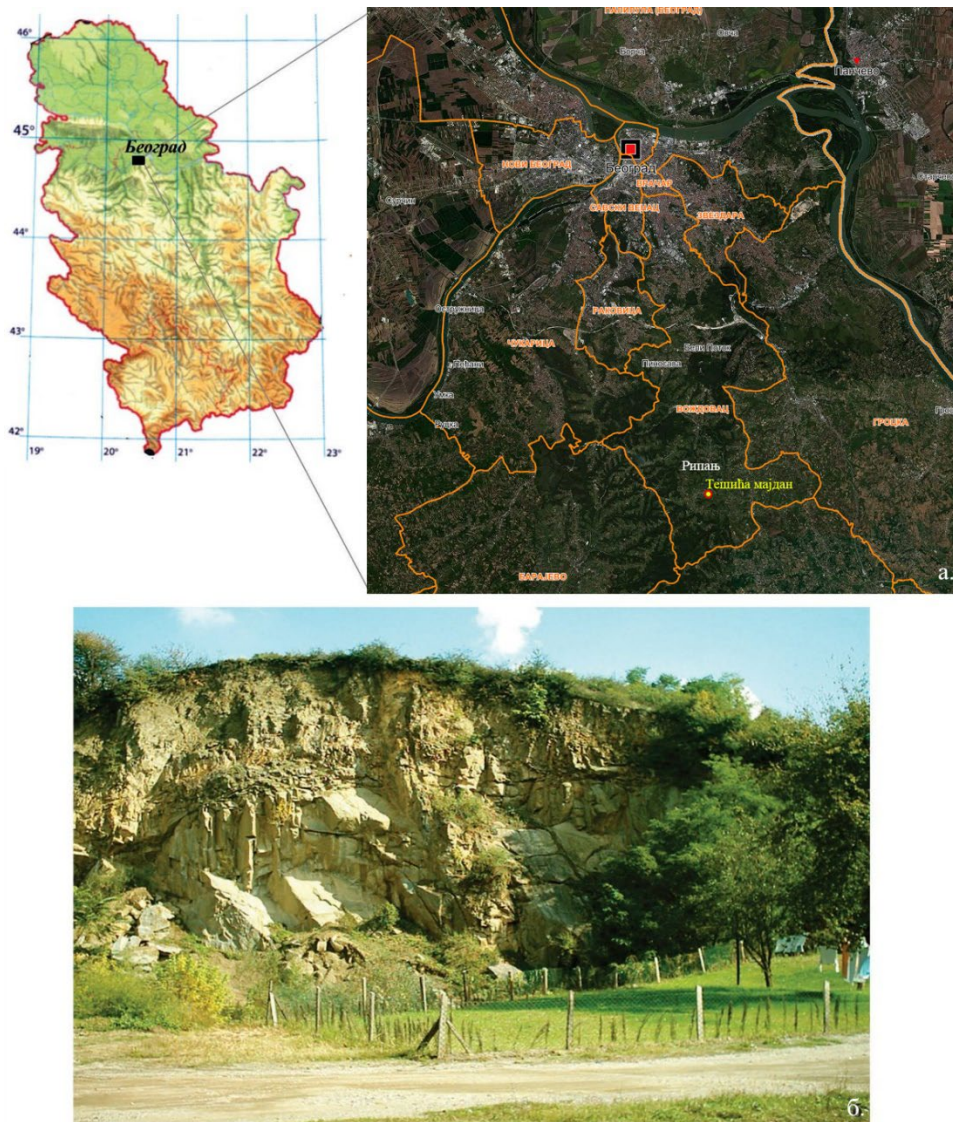
Изузетно интересантан, али недовољно проучен феномен је стање уграђеног камена који је у појединим фазама своје историје, случајно или намерно, неко време био под земљом, односно, у условима „*природне конзервираности*“. Археолошка истраживања открила су нам предмете од камена, гробнице, храмове или читаве градове старе неколико хиљада година, који су сачувани захваљујући прекривености слојевима земље као природном заштитом. Бројни примери, од Гобекли Тепе-а (Göbekli Tepe), преко Помпеје, до најновијих открића античког града Атоса, у јужној провинцији Луксор, старог око 3.000 година, материјални су доказ да су земља или песак одлична заштита камена од површинског пропадања (Karkanis, 2010), чак и у условима влажног окружења где постоје активни циклуси смрзавања-одмрзавања (Kibblewhite et al., 2015; Novaković et al., 2023). Ретку експерименталну студију понашања камена у условима прекривености различитим неорганским материјалима (каменим агрегатом, песком) спровели су Хант и Гроси (Hunt and Grossi, 2016) и указали на

предности и ризике овог начина „природне“ конзервације.

На стање уграђеног камена неретко утичу и положај самог објекта на широј локацији, положај блокова унутар објекта, као и чињеница да неки делови грађевина током коришћења могу да се нађу у измењеним околностима, или буду изложени различитим антропогеним утицајима (Fookes and Lee, 2007; López-Arce et al., 2010; Satterthwaite, 2008). Начин технолошке обраде камена је један од главних антропогених утицаја који предиспонирају механизме његовог пропадања под утицајем атмосферилија. Васкез и сарадници (Vázquez et al., 2016) проучавају штоковање као вид површинске обраде камена и констатују да уколико се занемари естетски допринос, овај специфични механички поступак ствара вештачки ослабљену, површински храпаву зону камена са микропрслинама генерисаним у различитим правцима, на малим растојањима, до дубине од 1 cm, што ствара зону камена подложну љускању/љускању (Freire-Lista and Fort, 2016). Исти аутори закључују да дубина формирања микропрслина у великој мери зависи од врсте главних петрогених минерала, њихове оријентације и способности да се одупиру ударним таласима штокерице/чекића. Тако на пример зрна К-фелдспата, својом оријентацијом паралелно површини могу да делују као заштитна баријера ширењу микропукотина, док кварц као крт минерал и биотит (зависно од оријентације лиски) представљају средину погодну за лако ширење микропрслина и последично повећање порозности камена, посебно капиларних пора (Freire-Lista and Fort, 2016). Једна од ретких експерименталних студија проблематике утицаја завршне обраде на временско пропадање компактног кречњака у приморској средини је указала да су полирани кречњаци отпорнији на агресивно деловање соли, али су склонији хроматској модификацији боје која се не враћа једноставним механичким уклањањем соли (Urosevic et al., 2013). Разлике у квалитету полирања свежег и алтерисаног гранита су проучавали Соуза и Гонзалвес (Sousa and Gonçalves, 2012), док су Васкез и сардници (Vázquez et al., 2016) разматрали утицај површинске обраде на пропадање камена изложеног киселој атмосфери уз закључак да су веће варијације изгледа на штокованим површинама у односу на полиране површине.

### 3. ГЕОГРАФСКИ ПОЛОЖАЈ КАМЕНОЛОМА

Лежиште керсантита Тешића мајдан налази се у селу Рипањ по коме је камен и добио назив Рипањски керсантит. Лежиште у коме је давне 1895. године отворен каменолом и активно експлоатисан до Другог светског рата, налази се на око 20 km удаљености од центра Београда коме административно припада, а географски је лоциран у најсевернијем делу Шумадије на јужним падинама Авале (Сл. 1).



Слика 1. а) Географски положај каменолома Тешића мајдан; б) панорамски изглед каменолома

Каменолом је отворен на површини од око 1,5 km<sup>2</sup> у ниско брдовитом пределу надморске висине до 500 m, са обиљем густих шума и развијеном хидрографском мрежом. Налази се између Црних глогова на северу, Пејине башче и Рипња на истоку, Рамаће на југу, Пландишта и Ливадица на западу.

Највиши врх је Авала са висином од 511 m, коју следи Петрино брдо са надморском висином од 283 m, а најнижа кота је корито реке Паланке на северу терена са висинском котом од 142 m. Терен дренажују поток Дучевац и река Паланка. Оне се на северу уливају у Топчидерску реку која припада сливу Саве, док у дренажну мрежу Дунава, источно од Авале, теку реке као што су Сопотска, Раља и Дренушица.

Пристап каменолому омогућава добро развијена путна мрежа овог терена. Каменолом је у непосредној близини асфалтног пута - Авалске улице и железничке станице у селу Рипањ.



#### 4. ПОЛОЖАЈ, ОПИС И КРАТАК ИСТОРИЈАТ ИСТРАЖИВАНИХ ОБЈЕКТА ИЗГРАЂЕНИХ ОД КЕРСАНТИТА

Објекти одабрани за истраживање у оквиру овог рада обухватају само један мали део споменичког наслеђа, односно део профане архитектуре града Београда чији је послератни период у првој половини 20. века обележила управо употреба керсантиа као архитектонско-грађевинског камена. Детаљна истраживања су обухватала Мало степениште Београдске тврђаве, док су остали објекти (споменик Јовану Скерлићу, споменик Ђури Јакшићу, Основна школа „Краљ Петар Први“, Народни музеј, Градско јавно правобранилаштво, Зграда Класне лутрије) били предмет корелације са Малим степеништем. Избор Малог степеништа за проучавање и корелацију са другим објектима базирао се на чињеницама да је споменик у целости изграђен од керсантиа, да је примењено више различитих типова површинске обраде камених елемената а да се они налазе у специфичним микролокацијским условима. Сви одабрани споменици културе су различите, али релативно блиске хронолошке старости и налазе се на територији главног града, у централној зони Београда (Сл. 2 и 3), што је био први предуслов за избор објеката за истраживање. Други критеријум одабира заснивао се на различитој површинској обради уграђених елемената од керсантиа, различитим позицијама у објектима, а тиме и променљивом утицају екстринзичних фактора распадања. Обим историјских података је приказан у складу са размерама истраживања на објекту.



Слика 2. Локација испитиваних објеката изграђених од керсантиа на територији града Београда; Легенда: 1. Мало степениште; 2. споменик Јовану Скерлићу; 3. споменик Ђури Јакшићу; 4. Основна школа „Краљ Петар Први“; 5. Народни музеј; 6. Зграда Класне лутрије; 7. Градско јавно правобранилаштво

Београдска тврђава, у оквиру које се налазе Мало степениште, споменик Ђури Јакшићу и Јовану Скерлићу, је споменик културе од изузетног значаја за Републику Србију, а у њеном склопу се налази Парк Калемегдан (Сл. 2, објекти 1, 2 и 3). Тврђава заузима око 80 ха старог београдског језгра, а подигнута је на завршном гребену шумадијске геолошке плоче – теразијској тераси, на надморској висини од 125 m, на ушћу Саве у Дунав (Stevanović, 1988).





Слика 3. Одабрани објекти у Београду изграђени делом или потпуно од керсантита; а) Мало Степениште б) споменик Јовану Скерлићу; в) споменик Ђури Јакишићу; г) Основна школа „Краљ Петар Први“; д) Народни музеј; е) Екстеријер зграде Касне лутрије; е) Ентеријер зграде Класне лутрије; ж) Градско јавно правобранилаштво; з) Спољашње степенице испред градског јавног правобранилаштва; и) Унутрашње централно степениште у згради градског јавног правобранилаштва

Београдску тврђаву карактерише дуга и сложена историја, од остатака словенског насеља на северозападном делу некадашњег римског каструма, преко византијског кастела, угарског пограничног утврђења, средњовековног утврђења деспота Стефана Лазаревића до турског и аустријског периода. Градитељска умећа извођена су *in situ*, употребом локалног лајтовачког кречњака (Franković, 2022), међутим, током 20. века примат у избору камена за изградњу објеката на тврђави преузима керсантит из Тешића мајдана од кога су подигнути: Мало степениште, споменик Ђури Јакшићу и Јовану Скерлићу.

**Мало степениште** спаја Париску улицу са Савским шеталиштем у делу парка Велики Калемегдан. Иницијативу за подизање ових степеница дао је 1900. године тадашњи општински баштован, Чех Франц Копта (Леко, 1909; Нешковић, 2021), а три године касније настаје овај архитектонски парковски елемент у необарокном стилу према пројекту Јелисавете Начић, прве жене архитекте у Србији (Сл. 3а, 4, 5а). Извођач радова је била фирма Феђе Голумбовског<sup>1</sup> (Леко, 1909; Нешковић, 2021). Мало степениште је по класификацији двоструко степениште какво се употребљавало за монументалне објекте (Несторовић, 1927), у овом случају репрезентативне због положаја у најважнијем престоничком парку. Два ужа полукружна крака, ширине 245 cm воде до подеста са ког се трећим линеарним краком ширине 340 cm долази до Савског шеталишта. Димензионисање је одговарало прописима у време грађења<sup>2</sup> (Несторовић, 1927; Roter Blagojević, 2012). Висина степеника износи 13-15 cm, а ширина на горњем краку 32 cm, док је на доњим крацима ширина променљива због радијалног правца пружања, то јест клинастог облика степеника. Висина ограда са рукохватом је 85 cm. Нагиб терена (падине) на коме је споменик изграђен (24°), условио је форму степеништа, а вештим пројектантским умећем Јелисавете Начић добијена је маестрална геометрија. Комплексност положаја додатно повећава и нагиб улице (6°) коју степениште повезује са парком (Сл. 5б, в). Веома захтевни облици и димензије камених елемената прилагођени су нагибу терена и нагибу степеништа. Чеони део објекта представља плитка слепа arkada са чесмом у виду бронзане лавље главе (Сл. 4в). Споменик је у потпуности израђен од камених елемената и плоча од керсантита међусобно спојених на перо и жљоб. Спојнице су накнадно испуњене малтером како би се добио утисак монолитне структуре (Павловић, 2016). Видљиве површине камена (укупно 436 доступних уграђених блокова) су рустично обрађене, штоковане или клесане длетом, док елементи газашта имају видљиве резане површине. Торзични елементи рукохвата захтевали су велико умеће клесара (симетрични пад хоризонталних површина), а керсантит као градивни материјал је омогућио постизање жељених облика. Цео објекат је био у потпуности видљив, а са бочних страна су постављени калдрмисани канали за одвођење воде (Сл. 3а, 5а). У том периоду најнижа кота споменика је била у равни са улицом.

Део споменика је 1914. године претрпео велика оштећења услед разарања током I св. рата и у том стању остао наредне четири деценије (Сл. 5б). Последице Другог светског рата вероватно постоје на споменику (трагови гранатирања), али њих није могуће поуздано разликовати од ранијих оштећења због недостатка материјалне документације. Ограда/рукохват, оштећен у I св. рату, је 1960-тих година сукцесивно обновљена, а реконструкцијом трамвајских шина, терен је насут и степенице су делимично затрпане, пре свега део доње ограда и прва три газашта (Сл. 5г, д). Додатно, у наредном периоду, нивелацијом терена и радовима на уређењу

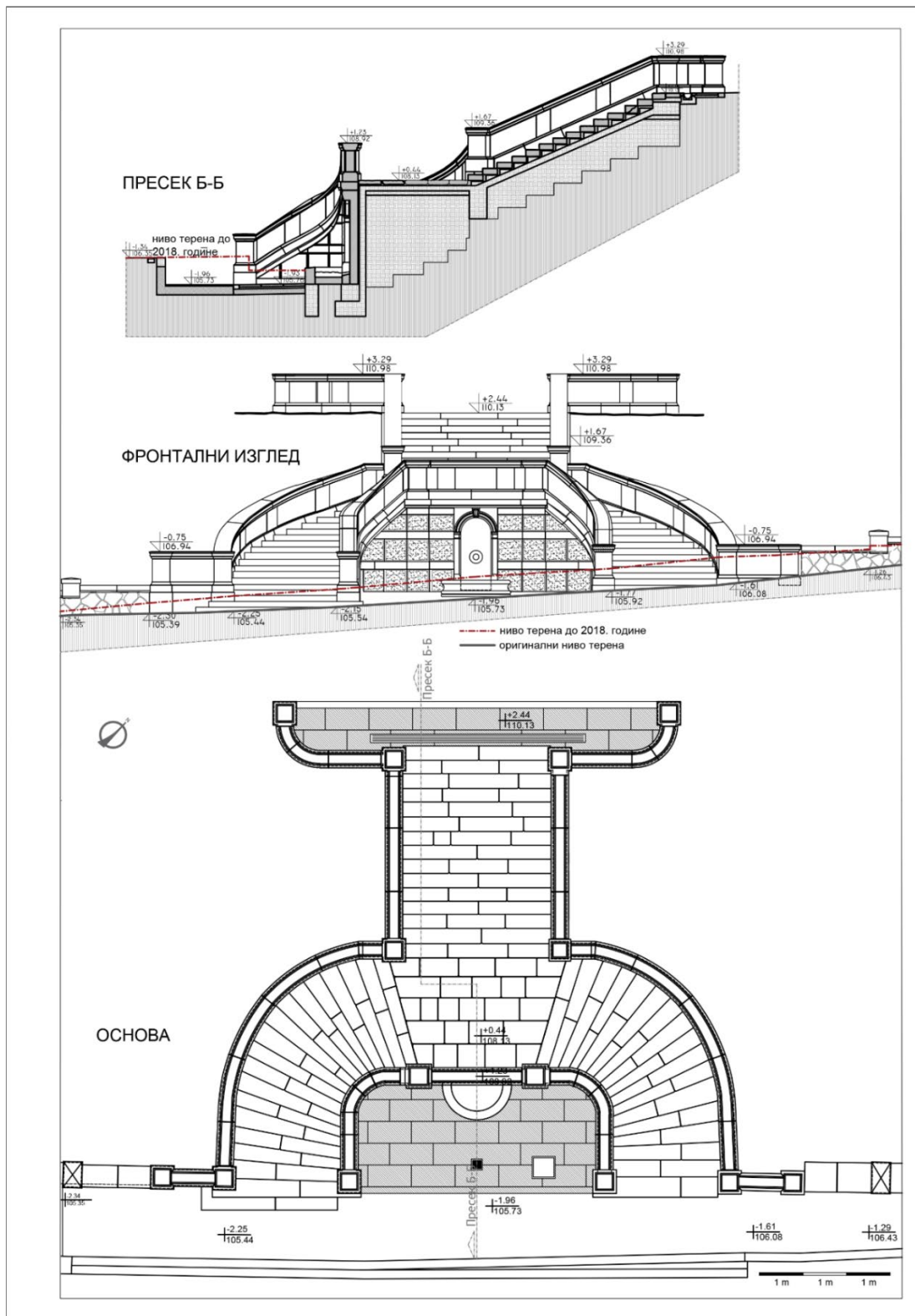
---

<sup>1</sup> Вечерње Новости, 11. мај 1903. године, страна 3

<sup>2</sup> 11. децембра 1896. године донет је Грађевински закон за варош Београд; 01. марта 1897. донет је Грађевински правилник за варош Београд



парка (зеленило) као и поновном реконструкцијом трамвајских шина, промењена је висинска кота падине на којој степенице леже, што је резултирало затрпавањем одводних канала, дела газишта и спољашње стране ограде са земљом. Изнад земље су, у појединим деловима објекта, остали видљиви само рукохвати (Сл. 4, 5в, г, д). Новонастали положај објекта је условио да се земљом покривени делови степеништа нађу у условима „природног конзервирања“ њиховог тренутног стања и последично успоравања процеса површинског распадања.



Слика 4. Основа, фронтални изглед и пресек кроз Мало степениште са обележеним оригиналним и нивоом терена до 2018. године

Реконструкцијом споменика 2018. године извршено је откопавање и уклањање насутог слоја земље. Тада су откопани дренажни канали, а „конзервирани“ делови камених блокова су нађени у веома очуваном стању. Извођењем сондажних радова откривен је профил у коме је регистровано неколико различитих слојева повлате којим су делови газишта били прекривени: асфалт, туцаник, земља (Сл. 5г, д).



Слика 5. Хронолошки изглед објекта Мало степениште; а) изглед након изградње 1908. године; б) Мало степениште у току Првог светског рата 1914-1915. године; в) Мало степениште, фронтални изглед 2016. године; г) откривена газишта која су била испод нивоа тротоара; д) попречни пресек слојева повлате затрпаних степеника (а) и б) извор документација Завода за заштиту споменика културе града Београда, в), г), д), извор аутор)

**Споменик Ђури Јакшићу** се налази на зеленој површини парка Калемегдан уз главну стазу из правца Кнез Михаилове улице, оријентисан ка центру ронделе<sup>3</sup> (Сл. 3в). Просторно припада Београдској тврђави, споменику културе од изузетног значаја за Републику Србију<sup>4</sup>. Споменик се састоји од каменог постамента од керсантита, обрађеног полирањем и бисте са попрсјем од ливене бронзе. Висина постамента је 209 cm, док је ширина базе 150 cm. На централном најужем делу предње стране постамента исклесан је натпис, исписан златном бојом: *Ђури Јакшићу/песнику/1832-1878/Типографско певачко друштво/“Јакшић“/1896*. Са бочних страна (северне и јужне) се налазе рељефи у облику лире, израђени од керсантита као посебни елементи који су уграђени у централни део постамента. Аутор споменика је Петар Убавкић, а споменик је постављен 02.08.1896. године. Биста споменика је од ливене бронзе, док је постамент исклесан од керсантита обрађеног полирањем. Постамент се састоји од неколико суперпонираних кубичних блокова обликованих у духу класицизма. Цела форма се сужава ка врху.

<sup>3</sup> Декоративни партерни кружни елемент у парку

<sup>4</sup> Одлука о утврђивању „Службени гласник СРС“ бр. 14/79



**Споменик Јовану Скерлићу**, књижевном критичару, професору Београдског универзитета, уреднику Српског књижевног гласника, оснивачу и првом секретару Удружења књижевника, је постављен 1966/67. године (Сл. 3б). Просторно припада Београдској тврђави, споменику културе од изузетног значаја за Републику Србију. Аутор споменика је Градимир Алексић. Споменик се састоји од вертикалног рустично обрађеног постамента од керсантита, неправилног облика и бисте са попрсјем од ливене бронзе. Висина постамента је 187 cm, док је ширина базе 48 cm. На фронталној горњој страни постамента исклесан је натпис који је слабо читљив услед деградационих процеса. Стуб се шири ка врху и завршава равном површином на којој је постављена бронзана скулптура. Биста српског књижевника је изведена у духу портретског реализма са идеализованим цртама лица. Споменик поседује културно-историјску и уметничко - естетску вредност.

**Основна школа „Краљ Петар Први“** је изграђена 1906. године у истоименој улици у Београду, у архитектонском стилу академизма са елементима сецесије (Сл. 3г). Школу је, као и Мало степениште, пројектовала Јелисавета Начић. Не изненађује употреба истог материјала са којим је пројектанткиња била добро упозната током изградње Малог степеништа. У време подизања била је најмодернија школска зграда за основну наставу не само у Београду, већ у целој Србији. Изузетна репрезентативност објекта, условљена локацијом у непосредној близини Саборне цркве, Митрополије и Конака кнегиње Љубице, прави је показатељ друштвених и културних прилика у Србији на почетку 20. века. Сокла објекта, спољашње степениште и оградни зид школског дворишта су изграђени елементима од керсантита. Објекат има статус споменика културе<sup>5</sup>.

**Зграда Народног музеја** се налази се у ужем центру Београда, на простору између Трга Републике и улица Чика Љубине, Васе Чарапића и Лазе Пачуа, на квадратној парцели која се својом чеоном страном „ослања“ на Трг Републике, некадашњи Позоришни Трг (Сл. 3д). Објекат има статус споменика културе од великог значаја<sup>6</sup>. Уградња керсантита у виду камене облоге ниског дела фасаде зграде Народног музеја, се одвијала у две фазе. Прва фаза, изведена у периоду 1902-1903. године, обухватала је уређење фасаде према Тргу Републике по пројекту архитеката Андре Стевановића и Николе Несторовића. У оквиру друге фазе, тридесет година касније, урађена је фасада према улици Лазе Пачуа. Током Другог светског рата зграда је била знатно оштећена, али о степену оштећења и евентуалним интервенцијама нема писаних података. Са аспекта учешћа природног камена у целокупној фасади овог знаменитог културног објекта, керсантит је уграђен само у један од четири портала и у нижи део фасаде са варијабилном висином камене облоге (1,5 - 2,8 m). Керсантит је такође примењен и у изради људских фигура на кључном камену изнад врата. Према морфологији уграђених камених елемената јасно се разликују: сокла изграђена од елемената са штокованом видном површином профилисаном у завршном делу елемената; рустични буњасте елементи са хетерогено босираним видним површинама; кордонски венац изграђен од елемената различите дужине са глачаном горњом и штокованом чеоном површином.

**Зграда Класне лутрије** је споменик културе<sup>7</sup> саграђен 1899. године. Пројектовали су је архитекта Милан Капетановић и инжењер Милош Савчић под покровитељством Министарства народне привреде. У време грађења била је једна од најрепрезентативнијих грађевина на потезу од Калемегдана до данашњег Трга Републике (Сл. 3ђ, е). Државни значај установе утицао је на пројектно решење и репрезентативан спољашњи изглед зграде. Зграда

---

<sup>5</sup> Решење Завода за заштиту споменика културе града Београда бр. 278/7 од 25.12.1965.

<sup>6</sup> Одлука о утврђивању „Службени гласник СРС“ бр. 14/79

<sup>7</sup> Одлука о утврђивању „Службени гласник РС“ бр. 35/13

Класне лутрије пројектована је као угаони једносратни објекат у духу академизма. Највећа пажња посвећена је фасади на углу, са елементима француске неоренесансе и необарока, док су бочне фасаде решене једноставније са елементима италијанске неоренесансе. Репрезентативан изглед угаоног ризалита огледа се у залученим резбареним дрвеним вратима, уоквиреним рустичним полустубовима и луком који носе тимпанон са лављом маском. Мотив лавље главе понавља се и у орнаментици врата заједно са иницијалима установе. Изнад врата је француски прозор са лунетом, где је постављен грб Краљевине Србије, а све заједно надвишава пирамидално кубе са сатом. Сокла објекта као и улазна партија израђени су од керсантита. Блокови су различитих димензија и измењеног сагледавања због промене денивелације улица.

**Зграда градског правобранилаштва** - зграда начелства среза врачарског, у Тиршовој улици број 3. у Београду изграђена је 1907-1908. године. Првобитно спратна породична кућа, данас има функцију пословања и у њој се налази Градско правобранилаштво (Сл. 3ж). Објекат има културно историјску вредност. Спољашње (Сл. 3з) и централно унутрашње степениште (Сл. 3и) су израђени од керсантита.

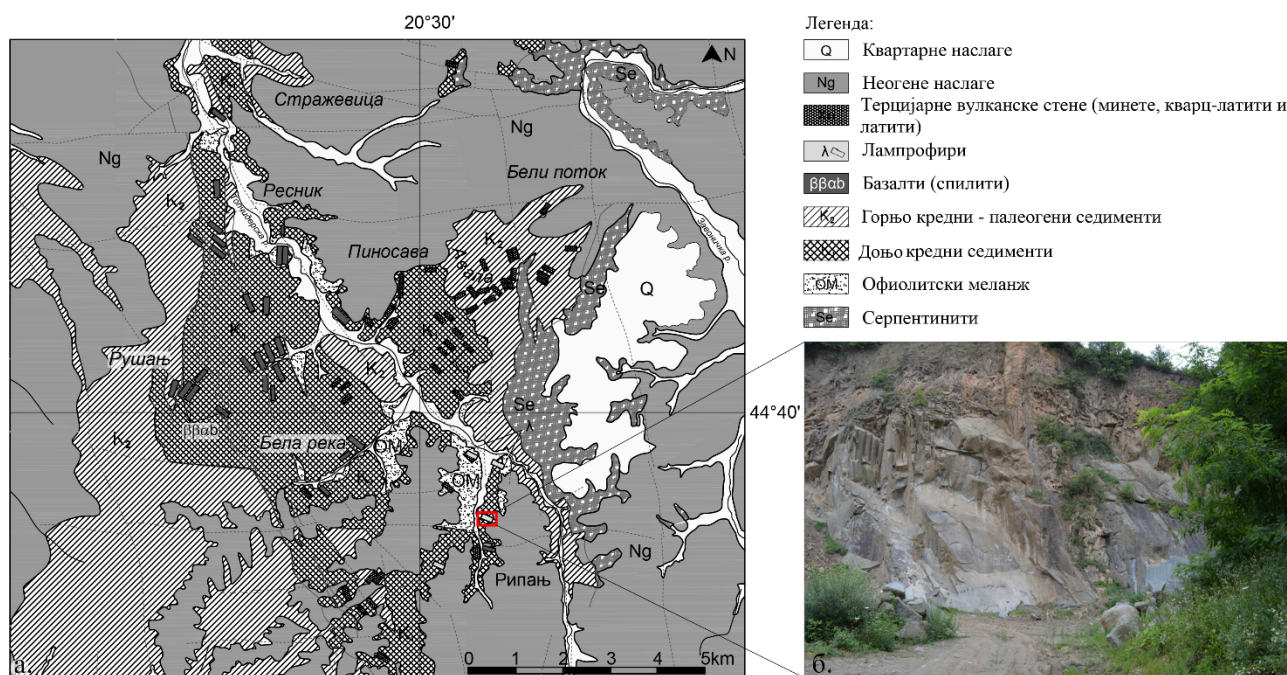
Табела 1. Преглед истраживаних објекта са аспекта године изградње и употребе керсантита

	Година изградње	Позиција керсантита у објекту
Мало степениште	1903.	цео објекат
Споменик Ђури Јакшићу	1896.	постамент
Споменик Јовану Скерлићу	1966-1967.	постамент
Основна школа „Краљ Петар Први“	1906.	сокла, степениште и ограда
Зграда Народног музеја	1902-1903.	сокла, портал, кордон венац, фигурална пластика
Зграда Класне лутрије	1899.	сокла, портал, унутрашње степениште, стубови у холу
Зграда градског правобранилаштва	1907-1908.	спољашње и унутрашње степениште

## 5. ГЕОЛОШКА ГРАЂА ШИРЕГ ПОДРУЧЈА ТЕШИЋА МАЈДАНА

Керсантит каменолома Тешића мајдана (Сл. 6) геотектонски припада Сава-Вардар зони (Pamić, 2002) која се протеже од централне мађарске плоче (Schmid et al., 2008; Ustaszewski et al., 2009), преко Загреба, дуж реке Саве, преко Фрушке горе, Београда, Скопља, Солуна до крајњег Измира у Турској. Керсантит Тешића мајдана представља најстарији продукт ултракалијског горњокредног вулканизма (Sokol et al., 2020) који је геохемијски веома варијабилан на овом подручју Балканског полуострва (Ustaszewski et al., 2009, 2010; Cvetković et al., 2014; Prelević et al. 2017; Toljić et al., 2018).

Шире подручје каменолома карактерише сложена геолошка грађа у којој се разликују серпентинити, офиолитски меланж, доњокредни седименти, горњокредни-палеогени седименти, базалти (спилити), лампрофири, терцијарне вулканске стене, неогене и квартарне насlage (Сл. 6а).



Слика 6. а) Упроишћена геолошка карта шире околине Тешића мајдана на основу Геолошке карте Југославије 1:100.000, лист Панчево, Обреновац, Смедерево и Београд у компилацији са Toljić et al. (2018) и Sokol et al. (2020); б) изглед дела стенске масе каменолома Тешића мајдана

### 5.1. МЕЗОЗОИК

#### 5.1.1. Серпентинити

Серпентинити су најстарија геолошка формација овог подручја. Налазе се у тектонском контакту са околним стенама, албским седиментима и горњокредним флишем, а прекривеност неогеним наслагама смањује доступност серпентинита (Toljić, 2006). Уочени реликти ромбичних пироксена и ређе оливина у серпентинитима, наводе на закључак да примарна стена одговара харцбургитском типу перидотита (Divljan, 1966; Toljić, 2006).

#### 5.1.2. Офиолитски меланж

Офиолитски меланж горњојурске старости (Toljić, 2006; Bragin et al., 2017) изграђен је од олистолита, блокова и класта кречњака, рожнаца и пешчара, уклопљених у матрикс глиновито-лапоровитог састава. У старијој литератури ова јединица је позната под називом дијабаз-рожначка формација (ДРФ). Дебљина ове формације износи око 80 m. Горњојурска старост меланжа одређена је на основу палеонтолошких одредби фауне која се налази у матриксу (Toljić, 2006).

### 5.1.3. Доњокредни седименти (K<sub>1</sub>)

Доњокредне творевине имају велико распрострањење и карактеришу се присуством лапораца са аптихусима, парафлишним развојем плочастих и слојевитих лапораца са променљивим присуством песковите, односно глиновите компоненте, затим глинаца и алевролита са интеркалацијама кречњака и калкареница, органогених кречњака, алевролита и лапораца алба и алб-ценоманских песковитих лапораца (K<sub>1,2</sub>).

Формација лапораца са аптихусима, откривена код железничке станице Беле реке и у Реснику, код Рушња, дуж пруге у Кијеву и у кориту Топчидерске реке, представља најстарију јединицу изграђену од глинаца и лапораца без остатака фауне карбонатног састава, осим аптихуса амонита на основу којих је одређена старост (Anđelković, 1973). Формацију парафлиша чине глинци, алеврити, пешчари, лапорци, лапоровити кречњаци, калкрудити и калкареници, а према старости припадају неокому (Тољјић, 2006). Постфлишни седименти су Стражевачки лапорци са остацима амонита (Petković, 1925; Gorčanin, 1938; Petković i Marković, 1951), Раковачки органогени кречњаци ограниченог простирања, потом следе банковити, песковити и бречастии кречњаци, откривени у околини Стражевице и Рушња. Њих карактерише присуство песковите компоненте и конкреција рожнаца у вишим деловима (Protić, 1969; Anđelković, 1973; Тољјић, 2006). Албски седименти су различите врсте кластита, кречњака и лапораца са малим распрострањењем, али са специфичним врстама фосила (цефалоподе, иноцерамуси, белемнители, гастроподе, алге итд.) (Gorčanin, 1935; Petković, 1939; Anđelković, 1954, 1973; Protić, 1956; Marković i Obradović, 1957; Filipović i dr., 1980; Marković i dr., 1985; Тољјић, 2006). Алб-ценомански песковити лапорци су прелазни седименти откривени на неколико локалитета у реону Рушња и представљени су сивим и мрким лапорцима који садрже остатке макрофауне и флоре (Marković i dr., 1985). У тектонском односу су са горњокредним лапорцима (Тољјић, 2006).

### 5.1.4. Горњокредни-палеогени седименти - флиш (K<sub>2</sub>)

Горњокредне творевине, према Тољићу (2006) представљене су јединицама базалне серије, префлишним лапорцима и флишном јединицом.

Базалну серију чине кластити или преталожени грубокластични карбонати који у матриксу садрже фораминифере или рудисте типичне за горњу креду (конијак-сантонска-кампанска старост). Откривена је код Кијева и Кијевског потока, околини Барајева, Трешње, Раље и околини Сопота. Префлишни лапорци су мање распрострањени од базалне серије и налазе се у околини Стражевице, Каменику и реону Клења (Тољјић, 2006). Флишна јединица се може пронаћи на западним странама Авале, Ковина, околини Сопота, у Барајеву, Сремчици и Остружници. На Авали се у флишној јединици јасно разликују карбонатни, кластични и карбонатно-лапоровити слојеви (Тољјић, 1995), делимично контактено метаморфисани (Vasković, 1990). Старост је одређена на основу фораминифера и на основу љуштура рудиста (Pavlović i dr. 1980).

### 5.1.5. Стене горњојурског и кредног магматизма

Мезозојски вулканизам са карактеристикама субмаринске активности, према ранијим литературним подацима хронолошки одређен као горњојурска магматска фаза (Anđelković i Milojević, 1964; Anđelković, 1973; Тољјић, 2006), новијим истраживањима је подељен на три фазе (Sokol et al., 2018, 2020): *пре горњојурска фаза, доњокредна фаза и бимодални горњокредни магматизам.*

Пре горњојурску фазу карактерише присуство одломака спилита у асоцијацији са хетерогеним седиментима (ушкриљеним глинцима, рожнацима, лапорцима и др.) и саставни су део офиолитског меланжа у околини Рипња, Беле реке и Ресника (Sokol, 2018). Карактеризација спилита као представника горњојурског магматизма није геохронолошки доказана, али на поменутој припадност, према истим ауторима, указује присуство обдукованих офиолита.

Доњокредни магматизам је део меланжа, базалтног је карактера и јавља се у асоцијацији са лапоровито-глиновитим седиментима са аптихусима (горња јура, доња креда) и седиментима флиша (парафилиш) неокома и може се наћи у околини Ресника, Рушња, Пиносаве и Рипња (Sokol, 2018).

Магматизам (бимодални) горњокредне фазе карактерише присуство спилита, трахидацита и трахиандезита и вулканокластита (Anđelković i Milojević, 1964; Anđelković, 1973; Terzić i Karamata, 1968; Karamata i dr., 1997, 1999; Toljić, 2006). Током ове фазе магматизма настали су и лампрофири – керсантити Тешића мајдана (Sokol et al., 2020).

### 5.1.6. Лампрофир

Лампрофир (керсантит) у околини села Рипањ, у каменолому Тешића мајдану, интродован је у парафлишне седименте, откривене у дужину до 200 m, ширине до 20 m (Pavlović i dr., 1977), са оштрим контактима према околним стенама. Иако раније петролошки дефинисани као спилити (Plić i Knežević, 1968), новија петролошка проучавања ових стена (Sokol et al., 2020) су потврдила већ дефинисане петролошке карактеристике уз значајну допуну са новим подацима и то:

- керсантит је хетерогена стенска маса која се карактерише варијабилношћу у погледу боје и структуре; док је у централним деловима стенске масе зелене до тамнозелене боје са изразито крупним зрнима главних минерала који често граде офитску структуру, у ободним зонама је сивозелене до тамносиве боје и маркантне ситнозрне структуре;
- минералогски је изграђен од: албита, биотита (флогопита), диопсида и ређе ортоклаза као главних састојака, споредног апатита, илменита трансформисаног у леукоксен, ретког пирита и секундарних хлорита, калцита, леукоксена и епидота;
- Главни минерали керсантита су хидротермално алтерисани тј. биотит је делимично хлоритисан, диопсид је уралитисан и хлоритисан, плагиокласи су у потпуности албитисани, а калијски фелдспат је интензивно серицитисан;
- Генерално, свеукупни алтерациони процес „спилитизације“ примарног састава стене се одразио на неочекиване хемијске карактеристике и то: ниски садржај  $K_2O$ , повишен садржај  $Na_2O$  и екстремно ниски однос  $K_2O/Na_2O$ ;
- Модалном анализом је закључено да примарни састав стене Тешића мајдана одговара плутонском еквиваленту флогопит лампрофира, који се може класификовати (Le Maitre, 2002) као ваугнерит (плутонски еквивалент керсантита) (Sokol et al., 2020); исти аутори закључују да је рипањски лампрофир продукт метасоматизованог литосферског омотача који потиче од рециклиране старе континенталне коре или њених седиментних деривата;
- На основу резултата изотопске старости  $^{40}Ar/^{39}Ar$  флогопита из свежих узорака лампрофира, старост кристализације лампрофирске интрузије је датирана на  $86,8 \pm 0,5$  Ма (Sokol et al., 2020), што представља значајан нови геохронолошки податак у односу на претходни концепт горњојурске старости (Plić i Knežević, 1968).

## 5.2. КЕНОЗОИК

### 5.2.1. Терцијарне магматске стене

Терцијарне магматске стене припадају палеогено - неогеној вулканској формацији и откривене су на Авали, Бабама, Љутој стени, Стојнику и Космају. Јављају се у форми дајкова дебљине 1 - 20 m, ретко до 100 m и интродоване су у јурске серпентините, офиолитски меланж и седименте неокомског и турон - сенонског флиша (Vasković i Matović, 1996). На основу детаљних петролошких проучавања издвојене су две групе: стене сиромашне кварцом

(трахибазалти, базалтни трахиандезити, латити, андезити, лампрофири - керсантит) и стене богате кварцом (кварцлатити, дацито-андезити и дацити). Старост стена је датирана на еоцен-олигоцен (Vasković i Matović, 1996).

### 5.2.2. Неогени седименти

**Неогени седименти (Ng)** сармата ( $M_3^1$ ) и панона ( $M_3^2$ ) представљени су сарматским сивим и песковитим глинама, лапорцима, доломитичним и органогеним кречњацима. Дебљина сарматских наслага је око 20 m. Панон представља најраспрострањенију формацију на територији коју сачињавају углавном лапорци, глинци, пескови и шљункови (Marković i dr., 1985).

### 5.2.3. Квартарне творевине

**Квартарне творевине (Q)** су представљене алувијалним наслагама: фација корита - аде, плаже (a) чији су основни чланови фино стратификовани пескови са примесама глиновите и алевритске компоненте. Фација корита има дебљину седимената 5-10 m (Marković i dr., 1985).

## 6. ИСТОРИЈСКИ ПРИКАЗ НАЧИНА ОБРАДЕ И УГРАДЊЕ АРХИТЕКТОНСКОГ КАМЕНА У СРБИЈИ ОД КРАЈА 19. ВЕКА ДО ДАНАС

Камен се у архитектури и вајарству употребљава због својих јединствених естетских карактеристика, техничких својстава и временске постојаности. У архитектонском стваралаштву веома важну улогу, поред састава и техничких карактеристика камена које омогућавају трајност, имају и његова текстура, боја и начин површинске обраде (Жегарац и др., 1995). У циљу истицања боје и текстуре камена користе се различите технике површинске обраде које резултирају његовим финалним изгледом у погледу хроматских особености, храпавости и сјаја.

Обрада камена је традиционална грађевинска техника којом се помоћу ручних и/или машинских алата, из каменних блокова добијају жељени грађевински елементи (Shaked et al., 2021). Она камену даје монументалност и рустичност или пак омогућава софистициран изглед објеката, што се посебно истиче одређеним врстама обраде као што је полирање. Од врсте и начина површинске обраде зависи визуелни изглед и перформансе везане за специфични део објекта у који је камен уграђен. Тако се ивичњаци и камени елементи подне облоге у екстеријеру обрађују на начин који испуњава функционалне захтеве степена храпавости површине. На фасадама и оградама постоје захтеви који често могу имати само визуелну компоненту. Углавном су доњи делови грађевина од камена (сокле, зона приземља и мезанина) били рустично обрађени, док се на вишим етажама захтевала финална обрада што је обогаћивало изглед фасаде.

Избор типа површинске обраде зависи и од врсте камена и његових својстава. Тако се на пример карбонатне стене не могу површински обрађивати паљењем, а тврде, силикатне стене изискују јаче алате јер их је тешко ручно фино обрађивати. Површинска обрада камена, међутим, осим позитивног утицаја на изглед камена, може и негативно да утиче на физичко стање површинске зоне камена, па тиме и на својства као што су способност упијања воде или отпорност на дејство атмосферичке (Bilbija i Matović, 2009).

Према типу обраде, разликују се механички (ударни и абразивни) и немеханички (термички) поступци површинске обраде који се могу обављати ручно и машински (Милутиновић, 1894). Ударни поступци, као најстарији облици обрађивања каменних површина, заснивају се на кртости камена и лакоћи одламања (одвајања) мањих или већих фрагмената. Проистекли су из основног захтева да се мање или више поравна површина камена у зависности од тога на којој позицији је предвиђена његова уградња. Кроз историју су се мењали алати и технологије за обраду камена. Од примитивних алата насталих у праисторији дошло се до савремених CNC (*Computer Numeric Control*) машина које се данас претежно користе за обраду камена (Weiler, 2016).

На објектима на којима је вршено истраживање, керсантит је коришћен као архитектонско-грађевински и скулпторски камен. Објекти су грађени крајем 19. и почетком 20. века када су постојала одређена правила и смернице за грађење која су била последица степена технолошке развијености и умећа мајстора тог времена.

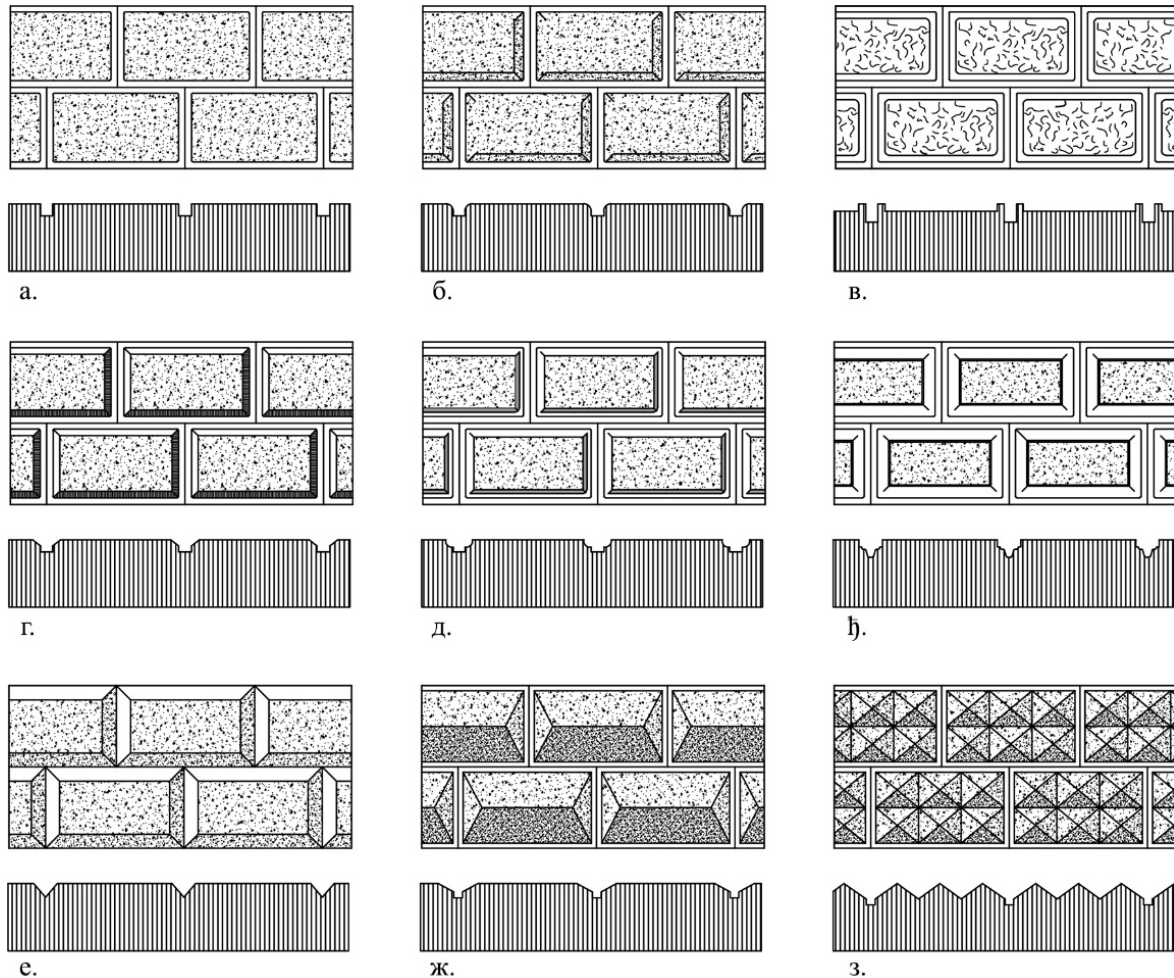
Крајем 19. века коришћени су различити типови ручне и машинске површинске обраде камена уз тада коришћене алате. Ручно су квадери<sup>8</sup> или тесаници предвиђени за грађење најчешће обрађивани: тесањем, резањем, рендисањем, глачањем и полирањем (Милутиновић, 1894).

---

<sup>8</sup> Правилно исечен (обликован) камен за зидање (облагање)



Тесари су израђивали квадере за зидање и за декоративне елементе. Након вађења у каменолому уз помоћ клинова, камен се прво обрађивао grubим *кресањем-босирањем* уз помоћ обичног длета. На овај начин су третиране све површине, а чеона површина се додатно обрађивала (Милутиновић, 1894). Додатно прецизно босирање на чеоној страни квадера је могло произвести ефекат рељефне површине, рустичне или заобљене, неравне - вијугаво избраздане, са накошеним странама, таласастом профилацијом, призматично обрађене, са узвишењем у облику дијаманта (једног или вишеструких) (Сл. 7а - з).

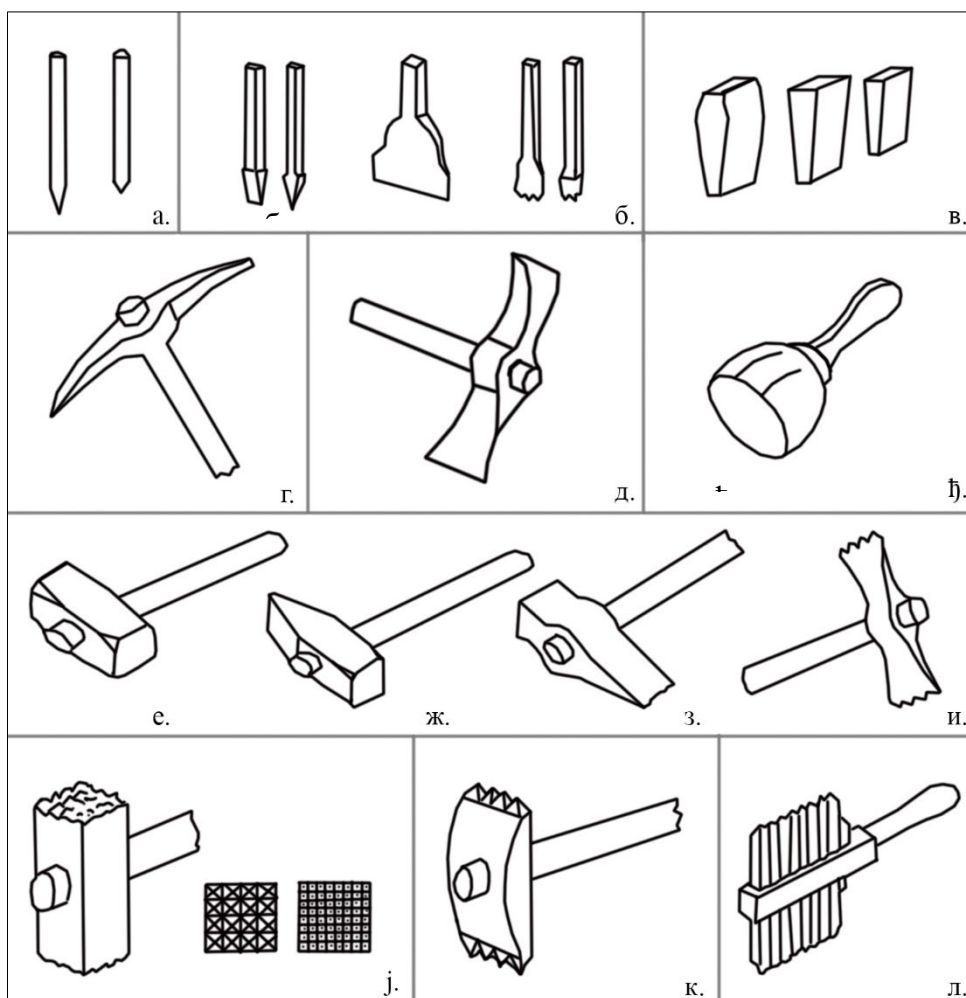


Слика 7. Скице босираних површина квадера а) квадратна профилација; б) рустична или заобљена; в) неравне - вијугаво избраздане; г) са накошеним странама; д) са таласастом профилацијом; е) призматично обрађених са дубљом таласастом профилацијом; ж) са узвишењем у облику дијаманта; з) са узвишењем у облику вишеструких дијаманата (модификовано <https://www.habiternosterritoires-bfc.fr/glossaire.htm> 2023)

Поред босирања вршено је *равнање* - ублажавање грубо босиране површине. Равнање је имало умирујући визуелни ефекат. *Гренелисање*, данас познатије као штоковање, представља зрнасту обраду која производи јамице и испупчења (Милутиновић, 1894). Преко босиране или гренилисане површине у неким случајевима се даљом обрадом вршило *шарирање*. Уколико се обрађивао веома тврд камен ова обрада се звала *зупчање* (Милутиновић, 1894).

За различите обраде коришћени су различити алати: шпигеви, обично длето за урезивање и израду равних пруга, назубљена длета, клинови, пијук, равна секира, маљ за ударање длета, мацола, гвоздени чекић, чекић за босирање, назубљена секира, бодљикави или зубаста чекић за ситнозрну обраду - гренилисање (штоковање), зубача, гренила или зубаста тесало од длета (Сл. 8а-л).





Слика 8. Скице алата за ручну површинску обраду камена а) ипциеви; б) равна и назубљена длета; в) клинови; г) пијук (двоишљак) д) равна секира; ђ) маљ (дрвени); е) мацола; ж) чекић; з) чекић за босирање; и) назубљена секира; ј) бодљикави чекић за штоковање; к) зубача; л) гринела (модификовано, Pletikosić, 2007)

Резањем се камен обрађивао кроз поступке ручног или механичког сечења и тестерисања што је представљало бржи и јефтинији начин добијања квадера. Тестерисање камена уз помоћ тестере са или без зубаца коришћено је за обраду „меког“ камена, а за сечење тесера за мозаике се користила челична жица (Милутиновић, 1894).

Глачање камена се употребљавало да би се истакла боја и склоп камена. У архитектури је употребљавано за декоративне елементе. „Тврде“ силикатне стене су се глачале кварцним песком (Милутиновић, 1894). Данашњи еквивалент ове обраде је четкање или пескирање. Полирање камена представља глачање до потпуног сјаја. Примењивало се у монументалној архитектури где је декоративност била значајан елемент. За полирање су коришћене шмиргле и различити прашкасти абразиви и није било усавршено као техника обраде.

Осим ручног начина обраде, крајем 19. века су постојале различите машине за обраду камена. Машински је вршено тесање, тестерисање, глачање, полирање, бушење, гравирање. Проблем са машинским тесањем је био у различитој брзини тупљења длета која су неуједначено обрађивала камен. Коришћени су и ножеви, зубаста котурови, машине са циркуларним и дијамантским тестерама. Од тада човек усавршава машине за сечење и обраду камена које олакшавају клесачки и каменорезачки посао.

Данас су поступци површинске обраде камена технолошки усавршени и аутоматизовани. Називи обрада који су у свакодневној употреби, иако од њих воде порекло, делимично одступају од некадашњих архаичних назива. Технике и процеси површинске обраде зависе од врсте камена и жељеног ефекта. Могу се поделити на три категорије: обраду ударним

поступцима, абразивним деловањем и немеханичким поступцима и у пракси се често комбинују. Док се абразивни поступци брушењем и глачањем могу применити на већину магматских, седиментних и метаморфних стена, обрада паљењем је у пракси ограничена на силикатне стене (Ciccu, 1993; Brite-Euram Report, 1999; Recommended Best Practices, 2010).

**Ударним поступцима** површинске обраде камена добија се: мајданска (природна) површина камена која подразумева слојевите површине природно плочастих стена без икакве дораде (Билбија, 1981); резана обрада постиже се на гатерима (Сл. 9д, ђ), а добијена површина се најчешће додатно обрађује другим алатима и техникама; површинска обрада клесањем употребом равног длета се спроводи до различито жељеног ефекта (Сл. 9б); обрада цепањем површине добија се помоћу специјалног широког длета (Билбија, 1981; Сл. 9д). Буњаста обрада подразумева површинску обраду чекићем и длетом (шпицем) или аутоматским цепачима, а површина камена је изразито неравна и храпава (Билбија, 1981); шпицовање подразумева ручну обраду уз употребу шпицастог длета које се под углом усмерава ка површини камена у зависности од густине удараца и дубине удубљења. Разликују се три степена обраде шпицом: крупно (грубо), средње и фино. Штоковање (озрњавање) камена је поступак површинске обраде која се изводи назубљеним чекићем – длетом које се још назива „озрњивач“ или „штокомер“. Према степену обраде, разликује се груба, средња или фина штокована површина камена (Билбија, 1981) (Сл. 9а, б, е). Штоковање камена захтева вештину и искуство уколико се изводи ручно, што је данас ретко захваљујући машинама које процес штоковања знатно убрзавају. Ова врста обраде се не може применити на веома танким плочама камена како не би дошло до ломљења. Обрада браздањем изводи се на претходно заравњеној површини употребом различитих типова назубљеног длета којима се постижу бразде различите дубине и ширине у зависности од алата који се користи и жељеног изгледа. Гребана површинска обрада добија се употребом специфичних назубљених ваљака за гребане камена и погодна је за обраду „мекших“ стена.

**Абразивни поступци** површинске обраде камена, брушење и глачање до полирања, користе различите абразивне материјале како би се уклониле неравнине и добио жељени финални изглед (Сл. 9в). Процес брушења обавља се зрнастим абразивима, а процес глачања прашкастим полирним средствима (Билбија, 1981). Абразивним поступцима се истичу боја, структура и текстура стене, те су ове врсте обраде веома заступљене у архитектонским пројектима, поготово у ентеријеру. Деловањем зрнастог абразива (кварцни песак, корунд, силицијум карбид и челични песак) добија се пескирана површина камена различитог степена озрњености (Билбија, 1981). Полирањем се постиже високи сјај и глатка површина камена чиме се смањује површинска порозност.

Термичко третирање површине камена пламеном (паљење) представља немеханички начин обраде. Обзиром да се обрада врши на високим температурама погодна је за стене силикатног састава где услед дејства високе температуре долази до термофрактуре (Војновић, 2015). Овим поступком настаје неравна површина у степену који зависи од градивних минерала. Поступком термичке површинске обраде повећава се отпорност на хемијске утицаје и могу се третирати танке камене плоче (Bilbija i Matović 2009; Crnković i Šarić, 2012).





Слика 9. Примери површинске обраде керантита а) штокована површина рукохвата Малог степеништа; б) клесане и штоковане површине предње фасаде Малог степеништа; в) полирана површина, споменик Ђури Јакишићу; г) клесана обрада, споменик Јовану Скерлићу; д) резане и џепане површине калдрме на Малом степеништу; е) гатерисани блок керантита; е) машински сечен, ручно штокован елемент



### 6.1.1. Смернице за градњу каменом крајем 19. века у Србији

Смернице за градњу каменом постојале су од давнина и временом су се допуњавале. Односиле су се на различите типове грађевина и њихових делова. Постојали су прописи који су се односили на грађење свих конструктивних делова грађевине (темељи, зидови, сводови, степеништа) (Roter Vladojević, 2012). Било је прописано да се зидови од тесаног камена или квадера димензионишу у односу на врсту камена и његову притисну и савојну чврстоћу (Несторовић, 1927). Другачије смернице су постојале за облагање каменом, зидова изграђених од опека или ломљеног камена. Посебно се водило рачуна о типу везе, спајању плоча гвозденим анкерима, врсти малтера и хидроизолацији. Указивано је и да је код грађења сокли боље употребљавати граните, јер пешчари имају већу способност упијања воде (Несторовић, 1927). Такође је било познато штетно дејство мрза на конструкције од камена. Степенице су грађене од чврстог, тврдог и трајног камена. Веома је било важно да се степеници постављају тек након слегања конструкције како не би дошло до њиховог пуцања. Степеници су могли бити правоугаоног пресека (Сл. 10а-б), или са профилисаним ивицом како би се повећала газишна површина и формирала својеврсна окапница (Сл. 10д, љ). Према Грађевинском закону за варош Београд ови степеници не смеју имати мању ширину од 29 см на месту удаљеном 45 см од степенишног зида, док је прописано да са уже стране не смеју имати мању ширину од 13 см (Несторовић, 1927). Међутим, код полузавојитих степеница довољно је да прописна ширина буде само на линији хода.



Слика 10. Примери детаља градње степеништа од камена а-б) профил степеника са системом спајања на перо и жљеб; в) горња површина степеника са површином која је уметана у оградни образ степенишне ограде; г) део базе ограде степеништа (образима подупрто степениште, Несторовић, 1927); д) профилисани степеници централног степеништа зграде Класне лутрије; е) детаљ профила (окапнице), зграда Класне лутрије

Спајање степеника и других камених елемената често је извођено помоћу система пера и жљеба (Сл. 10а-б). Код спољашњих степеница водило се рачуна о одвођењу воде што је подразумевало планирање нагиба ка предњој страни од 2-5 mm. Узиђивање степеника се вршило након зидања степенишних (оградних) зидова у које су ужљебљене степенице. Неопходно је било да се жљебови накнадно уклешу и да степеници не леже директно један на другом, већ да се предвиди вертикални размак од 2 - 4 mm (Сл. 10д). Код образама подупртих степеника, овај начин конструисања степеништа окарактерисан је као скуп и компликован због већег утрошка материјала и радне снаге (Несторовић, 1927). Образи служе за подупирање и ограничење померања степеника (Сл. 10г). Чеона страна степеника се умеће у камени елемент – образ у дубини од 3 - 4,5 cm (Сл. 10в). Монументалним и значајним јавним степеништима се посвећивала посебна пажња у циљу неопходног естетског утиска и издржљивости услед велике фреквентности.

## 7. ПОВРШИНСКО РАСПАДАЊЕ СТЕНА - КАМЕНА

Стене у Земљиној кори се налазе у стабилном равнотежном стању. Када се нају изложене деловању различитих спољашњих фактора, стене или камен из њих извађен, подлежу процесима деградације који мењају њен оригинални изглед, састав и својства. Интензитет промена зависи од примарног састава, структуре и текстуре стене, од дужине изложености спољашњим агресивним факторима, али и врсте процеса деградације којима стена подлеже (Vilbija i Matović, 2009).

Како у стручној литератури постоје различите дефиниције процеса површинског распадања, који резултују променом оригиналних својстава стене, у даљем тексту су дате дефиниције термина усвојених и коришћених у овом раду:

- **Алтерација** – промена примарног минералног састава стене под утицајем топлих водених раствора – хидротермалних раствора која не подразумева нужно погоршање физичких и механичких својстава стене; промена се одиграва на температурама изнад 50 °C и осим састава стене и флуида на формирање секундарних разноврсних минералних парагенеза (епидот, серицит, калцит, минерали глина, (хидро)оксиди гвожђа и др.), утичу и други фактори као што су тектоника, термичке промене средине, мешање хидротермалних раствора са морском водом и др. (Galán and Ferrell, 2013).
- **Површинско распадање (weathering)** је прекид континуитета стене или камена који су дошли у контакт са водом и ваздухом и развоја физичких, хемијских и биолошких процеса распадања под утицајем различитих фактора атмосфере, хидросфере и биосфере (Reiche, 1945; Price, 1995). У зависности од доминантног процеса, површинско распадање се дели на физичко, хемијско и биолошко распадање (Јовић, 2000); **Физичко (механичко) површинско распадање** представља фрактурисање и дезинтеграцију стене/камена у комаде различитих димензија (од блокова до зрна) без промене примарног минералног и хемијског састава (Price, 1995); **Хемијско површинско распадање** је процес промене минералног и хемијског састава стене/камена уз стварање нових рецентних секундарних минерала; **Биолошко површинско распадање** је процес дезинтегрисања стене/камена изазван животним циклусом нижих и виших биљака или животиња (Price, 1995).
- **Распадање (decay)** – физичка и хемијска промена интринзичних својстава камена која узрокује губитак вредности или могућност употребе (Vergès-Belmin et al., 2008);
- **Деградација** - смањење квалитета или функционалног капацитета објекта од камена;
- **Оштећење (damage)** – људска процена губитка вредности каменог објекта услед временског распадања (Vergès-Belmin et al., 2008).

Процеси физичког, хемијског и биолошког распадања се развијају кроз интеракцију интринзичних и екстринзичних фактора површинског распадања. У интринзичне факторе спадају минерални састав и физичко - механичка својства стене. Екстринзични фактори подразумевају климатске карактеристике средине окружења у коме се стена или уграђени камен налазе (вода у свим њеним облицима, температура, влажност ваздуха, ветар, инсолација, аерозагађење), соли, биљке, животиње и човек (Kabata-Pendias and Pendias, 1984). Физичко распадање подстиче хемијско распадање и обрнуто, и на површини стена као и на споменицима изграђеним од камена, они се најчешће одигравају у синергетском циклусу без јасних граница раздвајања уз комплексну али отежану могућност тачног детерминисања доминантног процеса.

### 7.1.1. Алтерационе промене

Током завршних процеса настанка магматских стена, често долази до одређених алтерационих хидротермалних промена под утицајем топлих раствора који у контакту са примарним главним минералима стене резултирају стварањем нових секундарних минерала. Најчешће алтерационе промене у киселим, интермедијарним и базичним магматским стенама су серитизација, аргилитизација, силификација, пиритизација, хлоритизација, карбонатизација и пропицитизација (Srećković Batočanin i Kostić, nepublikovano). *Серицитизација* најчешће захвата фелдспате који се у присуству раствора (воде са јонима калијума и сумпора) трансформишу у ситнољускасти калијски лискун - серицит (Corbett and Leach, 1998). *Аргилитизација* је промена којом се минерали из стена или тла трансформишу у минерале глина: каолинит и монморијонит. Каолинит се образује трансформацијом фелдспата, а монморијонит трансформацијом амфибола или биотита услед деловања киселих раствора (Srećković Batočanin i Kostić, nepublikovano). *Хлоритизација* захвата бојене минерале као што су биотит и амфибол, а интензитет карактеристичне зелене боје хлорита зависи од количине присутног гвожђа. Веома честа врста алтерација је и *калцитизација* плагиокласа и хорнбленде која се одвија у присуству раствора обогаћених калцијумом и карактеристична је за површинске делове стенске масе (Srećković Batočanin i Kostić, nepublikovano). *Пропицитизација* је алтерација вулканских и вулканокластичних стена (Richtofen, 1868) и карактерише се присуством минерала хлорита и епидота (Srećković Batočanin i Kostić, nepublikovano).

Алтерационе, хидротермалне промене стене одигравају се у касним фазама магматског циклуса, камен који се вади из алтерисане стенске масе има минерални састав изграђен од примарних и секундарних минерала (продуката алтерационих процеса). Када се таква стена или камен нађу у контакту са атмосферским факторима, сви каснији новостворени минерали тј. продукти површинског распадања представљају рецентне секундарне минерале.

### 7.1.2. Физички процеси површинског распадања

Физичко распадање стена/камена као процес фрактурисања и дезинтегрисања у комаде различитих величина, јавља се као резултат ослобађања унутрашњих напона заосталих из магматског циклуса, термичких промена и контракција минерала. Формирање механичких дисконтинуитета омогућава циркулацију воде/раствора, стварање нуспродуката (леда, соли...), и развој кристализационих и хидратационих притисака у порама и (микро) прелинама камена. То резултира новим фрактурама, прекидом кохезионих веза минерала и даљим развојем дезинтеграције стене/камена (Price, 1995). Осим интринзичних својстава стене, главни фактори физичких процеса распадања јесу вода (у свим агрегатним стањима), температура и други климатски фактори средине, а најважнији процеси који се развијају су: мржњење-отапање, влажење-сушење, загревање-хлађење, кристализација соли. Генерално, најважнији фактор који иницира процесе површинског распадања јесте вода. Она делује на камен физички, изазивајући механичка оштећења услед циклуса мржњења, ерозије, или хидрауличког притиска који врше продукти транспортовани водом (соли).

Физичко разарање стена и камена услед деловања мрза је најважнији процес разградње у срединама са умерено-континенталном климом каква је и клима Београда (Bilbija i Matović, 2009). При циклусима мржњења долази до повећаног притиска на зидове пора услед ширења запреmine воде при преласку у чврсту фазу - лед. Циклуси *мржњења и отапања* су најагресивнији по камен на температурама око 0 °C када се њихово циклично понављање може одвијати и неколико пута дневно, у зависности од положаја камених блокова у објекту (Grimblecombe, 2014). На интензитет фрактурисања у овом процесу пресудну улогу има интринзично својство камена – порозност, односно дистрибуција величине пора у камену и њихова повезаност. Док макропоре (пречника изнад 1 mm) нису штетне по камен, најкритичнијим се сматра присуство капиларних пора (посебно оних пречника од 0,1-1 μm)

(Тоггаса, 2005) које могу да приме и задрже воду те понављање циклуса мржњења и отапања уз принос нових флуида, несумњиво доводи до механичког фрактурисања стене чак у веома кратком временском интервалу од свега неколико година (Bilbija i Matović, 2009).

Процеси *влажење-сушење* се манифестују ширењем камена приликом влажења, односно хидричком дилатацијом. Ови процеси су агресивни по стене са високим садржајем глиновитих минерала који имају способност бубрења (Bilbija i Matović, 2009), али и за стене са високим садржајем капиларних пора где циклуси влажења и сушења узрокују перманентно кретање воденог фронта у површинском делу камена и тиме слабење кохезионих веза минералних конституената. У условима умерено-континенталне климе, са карактеристичним олујним падавинама током летњих месеци, површине камена су изложене наглим променама температуре тј. загрејана површина камена прима велику количину падавина, а циклично понављање влажења-сушења у таквим случајевима води напрезањима и слабењу интергрануларних веза (Bilbija i Matović, 2009). Ветар је такође један од веома важних микроклиматских фактора који утиче на температуру и влажност камена. Он транспортује воду и аерочестице кроз систем пукотина и микропукотина које могу изазвати даље нежељене ефекте. Осим тога ветар носи абразивне честице, које еродују површину камена и чине је подложнијом даљој прогресивној деградацији. Јаки ветрови такође могу стварати притисак на камен и изазвати његово фрактурисање (Brimblecombe, 2014).

Процеси *загревања-хлађења* површине стене узрокују физичку разградњу услед термичких дилатација минерала. Степен загревања или хлађења стене/камена зависи како од боје камена и топлотне проводљивости минерала, тако и од климатских фактора средине у којој се камен налази. Дилатација минерала која се одвија током дневног топлотног циклуса узрокује напрезања у камену, фрактурисања и зрнасту декохезију (Bilbija i Matović, 2009).

Велики утицај на физичке процесе распадања камена имају и *растворљиве соли* које најчешће доспевају у камен капиларним кретањем воде/влаге из тла и ваздуха. Њихов извор су често и грађевински материјали који се налазе у непосредном контакту са каменом (везива на бази цемента, опекарски производи). Утицај соли на површинско распадање камена је један од главних узрочника пропадања архитектонског наслеђа (Winkler, 1973, 1994; Amoroso and Fassina, 1994; Price, 1996). Процес кристализације соли се одвија након засићења раствора унутар пора камена. Најчешће растворљиве соли су хлориди, нитрати, карбонати и сулфати међу којима је натријум сулфат у форми тенардита ( $\text{NaSO}_4$ ) или мирабилита ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ) најчешћи на фасадама споменика од камена (Steiger et al., 2014). Површинско распадање камена услед утицаја растворљивих соли дешава се као последица кристалizacionих и хидратационих притисака које кристали соли врше на зидове пора камена (Amoroso and Fasina, 1983).

Генерално, климатски параметри средине у којој се стене налазе или окружење грађевинског објекта од камена, утичу на њихову временску трајност. Последњих деценија све већу улогу и интересовање научне заједнице завређују динамичне и сложене климатске промене које мењају механизме претпостављеног деловања одређених климатских фактора (Daly, 2014). Због појаве повећања температурних екстрема и просечних вредности температуре ваздуха долази до промене биодиверзитета, долази до измењеног биолошког раста, мењају се циклуси влажења и сушења и последично измењених процеса кристализације соли. Ово посебно долази до изражаја при појави више дана са граничним температурама око температуре мржњења. Повећање количине падавина изазива слегање тла, убрзан биолошки раст, утиче на циклусе влажења и сушења камена, а може изазвати и поплаве које негативно утичу на стање објеката изграђених од камена. Сушнија лета посебно утичу на пропадање делова археолошких налазишта изграђених од камена, чак и када су затрпана, док повећање интензитета ветра може утицати на ерозију камена, и изазвати структурна оштећења.



### 7.1.3. Хемијски процеси површинског распадања

Површинско хемијско распадање камена настаје као резултат интеракције стене/камена са воденим растворима и у њима садржаним атмосферским загађивачима. Хемијски процеси обухватају растварање минерала (дисоцијација), хидролизу, хидратацију и оксидацију/редукцију (Price, 1995). *Растварање* је процес разградње - дисоцијације минерала под утицајем воде; *Хидратација* је стварање комплексних једињења са водом услед разградње молекула под утицајем воде; *Хидролиза* је процес уласка јона  $H^+$  у кристалну решетку минерала уз дифузију  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  у раствор уз често формирање нових стабилнијих минерала; *оксидација и редукција* су процеси отпуштања и примања негативног наелектрисања преласком валентних електрона са једног атома или молекула на други (Васковић и Костић, 2022).

Као и код физичког распадања, за интензитет и врсту процеса хемијског распадања стене, пресудан фактор јесте примарни минерални састав (растворљивост минерала), величина зрна (реакциона - контактна површина), порозност стене (количина раствора коју камен прима) и пермеабилност. У магматским стенама разлике у растворљивости минерала и величини зрна у великој мери утичу на отпорност стене према хемијском распадању. Генерално, базичне стене су отпорније у односу на групу киселих стена, док су крупнозрне стене подложније процесима хемијског распадања у односу на ситнозрне стене (Price, 1995). Од екстринзичних фактора, поред температуре, релативне влажности, садржаја аерозагађивача у ваздуху, свакако најважнији фактор јесте вода будући да се сви поменути процеси хемијског распадања одвијају само уз присуство воде/водених раствора.

Растварање, као главни механизам хемијског распадања стена, зависи од растворљивости минерала, количине и zasiћености раствора, температуре, рН раствора (Fe је 100 000 пута растворљивије на рН=6 у односу на рН=8,5). Са смањењем температуре средине и повећањем  $CO_2$  у атмосфери повећава се и растворљивост и она је интензивнија у урбаним градским срединама, јер поред  $CO_2$  на киселост кише утиче и присуство других гасова и киселина (Bilbija i Matović, 2009). Механизам хемијског растварања минерала је условљен и енергијом агенса који врши растварање (Keller, 1962) и том приликом катјони и ањони директно прелазе у раствор (Correns, 1949). Мобилност и миграција хемијских елемената као редован процес при хемијском растварању, зависи од растворљивости минерала и може се представити следећим низом (Price, 1995):



Катјони  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  лако мигрирају у раствор,  $Al^{3+}$  је имобилан, док излучивање феро јона ( $Fe^{2+}$ ) зависи од редокс потенцијала (у оксидационим условима лако прелази у фери јон ( $Fe^{3+}$ ) и први је знак површинског распадања) (Bilbija i Matović, 2009). Интензитет растварања је већи на местима где се јавља вишак слободне енергије као што су микропрслине, кристални дефекти, равни ближњења, пукотине, док је брзина растварања условљена јачином кристализационе везе, кристалном структуром минерала и хемијском активношћу агенса (Berner, 1978). Растварање почиње реакцијом између кристала и молекула дифундоване воде неколико милиметара испод површине кристала (Berner and Holdren, 1979; Nixon, 1979; Colman, 1982).

Хемијско растварање главних петрогених минерала, као и генерално понашање минерала у условима површинског распадања је различито. Док поједини силикатни минерали показују знаке растварања након временски изузетно дугог процеса површинског распадања, неки гвожђевити минерали врло брзо подлежу разлагању услед оксидације и хидратације што у значајној мери мења изглед уграђеног камена.

Биотит је чест петрогени минерал киселих и интермедијарних магматских стена и за разлику од других феромагнезијских минерала, он већ у самом почетку процеса хемијског

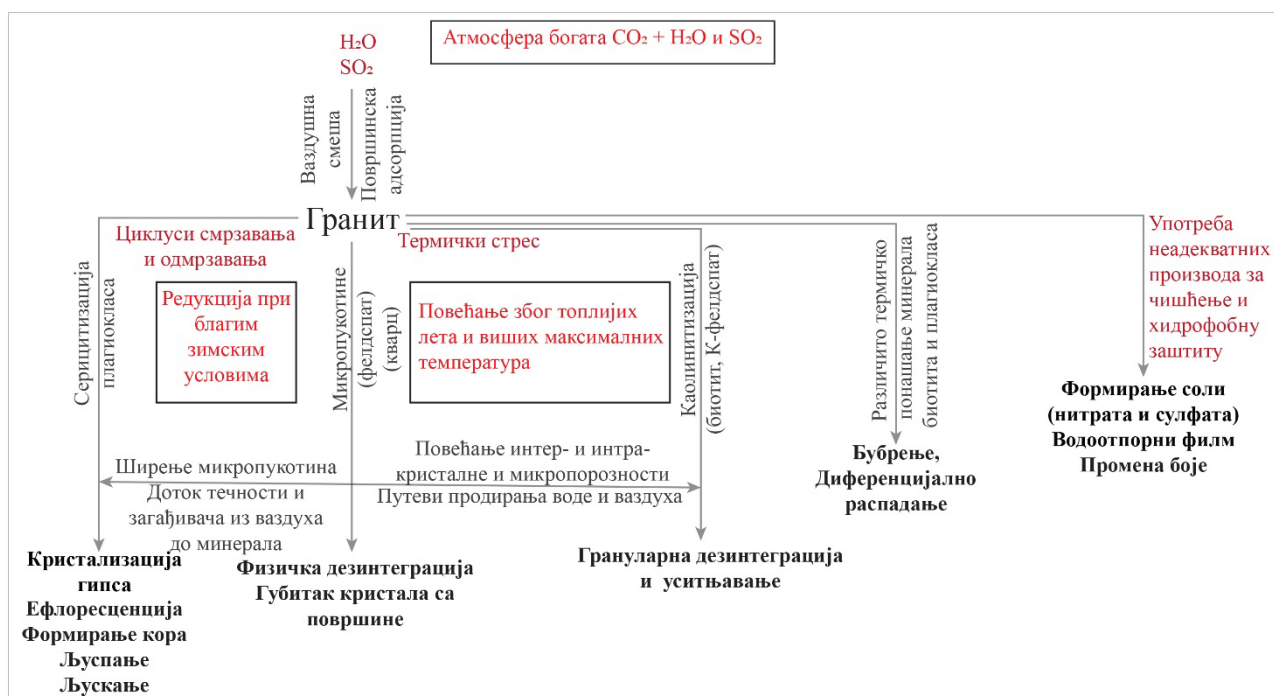
површинског распадања, релативно брзо ослобађа гвожђе из кристалне решетке узрокујући појаву рђастих обојења на површини камена (Bilbija i Matović, 2009). Биотит под утицајем атмосферске воде лако подлеже процесима растварања и хидролизе који резултују настанком сложеног минералног ланца продуката: хидробиотит → интерстратификације биотит-вермикулит → вермикулит (Wilson, 1970; Schoeman, 1989; Schroeder et al., 2000; Fang et al., 2019; Rama et al., 2019). Механизам формирања вермикулита (Mg-Fe хидратисани алумосиликат из групе филосиликата) започиње заменом  $K^+$  са молекулима  $H_2O$ , оксидацијом  $Fe^{2+}$  у  $Fe^{3+}$  и заменом  $OH^-$  са  $O^{2-}$  уз стварање интерстратификоване структуре (Bassett, 1961; Srodon, 1999; Wilson, 1970; 1986; Moon et al., 1994). Даља фаза распадања укључује даљи принос воде и замену веће количине  $K^+$  са водом, замену  $Fe^{2+}$  са  $Mg^{2+}$  уз формирање вермикулита као крајњег продукта (Nazzari and Hamdy, 2010) са веома слабом кохезијом између слојева где међуслојни катјони заузимају само трећину доступних позиција (Erić, 2019). Осим вермикулита као крајњег продукта распадања, фаза хидробиотита може се површинским распадањем трансформисати у каолинит, гетит, хематит и Al-хидроксид што узрокује јаку ексфолијацију лиски и отварање нових путева за циркулацију површинских раствора (Wilson, 1970). Пироксени се при површинском распадању трансформишу у хлорит, монморијонит и каолинит (Loughnan, 1969), или у талк, серпентин и бруцит (Veblen and Buseck, 1980, 1981; Nakajima and Ribbe, 1980). Фелдспати у процесима површинског распадања ослобађају јоне  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  и прелазе у илит и каолинит уз формирање Al-хидроксида (Neuzil et al., 1984), док се јони  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  ослобађају при хемијском растварању калцита и хлорита. Сулфиди гвожђа, међу којима је пирит најчешћи састојак, брзо оксидишу на ваздуху уз истовремено стварање сумпорне киселине која реагује са околним минералима (Bilbija i Matović, 2009).

Генерално сви процеси површинског распадања силиката воде формирању рецентних секундарних минерала, најчешће оксида(хидроксида) Fe и Al и глиновитих минерала. Ови рецентни секундарни продукти распадања су најчешће хидратисани, али осиромашени са катјонима метала (Streiger, 2011). Осим наведених продуката, честа појава на уграђеном камену су соли  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  настале као реакциони продукти растварања, хидратације и рекристализације. Катализатори наведених процеса су аерозагађивачи (гасови  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_3$  и аеросолне честице) присутни у урбаној атмосфери услед сагоревања фосилних горива, индустријском производњом и саобраћајем. Аерозагађивачи утичу на растварање минерала на различите начине:

- мењајући рН вредност воде и тла, чинећи их киселијим или базнијим што може убрзати или успорити растварање минерала, зависно од њихове растворљивости у различитим рН условима;
- аерозагађивачи могу да реагују са минералима и формирају нова једињења која имају другачију растворљивост од оригиналних минерала. На пример,  $SO_2$  и  $SO_3$  могу да реагују са карбонатним минералима и формирају сулфатне минерале (као што су гипс и анхидрит), који су растворљивији у води;
- аерозагађивачи могу да утичу на температуру и влажност воде и тла, чиме се мења брзина растварања минерала. На пример, повећање температуре може да повећа растворљивост неких минерала (као што су халит и силикати), а смањи растворљивост других (као што су калцит и арагонит).

Генерално, развој секундарних рецентних минерала може се одвијати на површини камена, непосредно испод површине или у (микро)прслинама. Као продукти хемијског распадања ови нови секундарни минерали узрокују промену запремине, генерисање унутрашњих притисака, што све заједно резултира фрагментирањем стене/камена. Познато је да чак и растварање само једног минералног конституента стене може изазвати њену комплетну дезинтеграцију (Price, 1995).

Модел развоја сложених процеса површинског распадања гранита уграђеног у објекте културног наслеђа у урбаној загађеној атмосфери градова приказан је на слици 11.



Слика 11. Модел пропадања гранита у урбаној средини (модификовано Basu et al., 2020)

У природи, различити процеси који су укључени у површинско распадање камена ретко делују сами, а присутна оштећења су резултат њихове интеракције. Познавање свих минералošких карактеристика стене, алтерационих промена насталих пре екстракције камена, до микроклиматских услова у којима је камен уграђен у објекат и у којима егзистира у дефинисаном периоду времена, представља кључ за разумевање присутних форми распадања.

#### 7.1.4. Форме распадања камена уграђеног у објекте

За документовање стања објеката културног наслеђа изграђеног од камена користи се терминологија и класификација оштећења, описана у различитим публикацијама, али углавном са уједначеним појмовима главних форми површинског распадања камена (Normal 1/88, 1990; Fitzner et al., 1995; Vergès-Belmin et al., 2008; VDI 3798 Blatt 1, 2020). У предметној докторској дисертацији примењена је Фицнерова класификациона шема форми распадања (Fitzner et al, 1995), али за одређене форме усаглашена са терминологијом датом у Илустрованом појмовнику форми распадања камена ИКОМОС-овог међународног научног комитета за камен (Vergès-Belmin et al., 2008). Хијерархијска категоризација оштећења према наведеној подели обухвата четири главне групе форми распадања (Fitzner et al., 1995):

- губитак каменог материјала,
- деколорација/наслаге,
- одвајање каменог материјала и
- пукотине/деформације.

Губитак каменог материјала обухвата дубинско, рељефно и комадасто распадање. Дубинско распадање карактерише губитак материјала са површине блока, паралелно са површином (Сл. 12а). Оно је често у вези са групом одвајања каменог материјала у виду кора или љуски. Рељефно распадање представља морфолошке промене у виду заобљавања, пре свега оштрих ивица (Сл. 12б), или храпавост на хоризонталним површинама изложеним хабању. Комадасто распадање је последица конструкционих, непрепознатљивих, антропогених или природних

узрока (Сл. 12в). Доводи до губитка мањих или већих делова блокова и често је у спрези са четвртом формом распадања - пукотинама и деформацијама.

Деколорација и насlage као форма распадања обухватају следеће подгрупе: деколорацију (обојење), запрљаност, насlage соли, коре и биолошку колонизацију. Деколорација у виду обојења (хроматске промене боје) јавља се као последица хемијске измене минерала (нпр. оксидација једињења гвожђа, Сл. 12г), и акумулирања ових обојених једињења на површини камена (Fitzner et al., 1995). На камену се могу јавити слабо причвршћене насlage прашине, чађи, земље, животињских екскремената, али и насlage соли (Сл. 12д). Коре представљају добро везане насlage које могу бити тамне, светле и обојене и разликовати се по томе да ли прате или не морфологију камена (Сл. 12ђ). Биолошка колонизација се појављује у виду нижих (бактерије, лишавици, гљиве, алге, маховине) и виших биљака (Сл. 12е). Више индивидуалних форми се могу појавити удружено и тада се констатују прелазни облици као што су на пример прелазни облик између обојености и тамне или обојене коре која прати морфологију камена.

Одвајање каменог материјала појављује се у виду зрнасте дезинтеграције, љуспања, љускања, одвајања коре са материјалом камена. Зрнаста дезинтеграција настаје услед испадања појединачних зрна или зрнастих агрегата (Сл. 12ж). Може настати примарно или као пратећа форма дубинском распадању, одвајању коре, љуске или љуспи (Сл. 12з). Карактеристичне форме љуспања су појединачне и вишеструке, док се појава љускања јавља као последица примарних својстава стене или антропогених утицаја (Сл. 12и). Индивидуалне форме могу се појављивати комбиновано са другим формама: зрнаста дезинтеграција у комбинацији са одвајањем тамне или обојене коре, вишеструко љуспање и одвајање тамне или обојене коре, вишеструко љуспање и одвајање обојене коре и зрнаста дезинтеграција удружена са вишеструким љуспањем.

Пукотине настају услед утицаја физичких сила. Оне могу бити независне од структуре камена и везане за текстурне карактеристике одређене стене. Могу се јавити као појединачне пукотине различитих промера (Сл. 12ј) или као мрежа пукотина, у зависности од врсте утицаја који их је проузроковао.



Слика 12. Примери различитих форми распадања: а) дубинско распадање; б) рељефно заобљавање; в) комадасто распадање г) деколорација у виду обојења; д) насlage соли; ђ) црне коре; е) биолошка колонизација; ж) зрнаста дезинтеграција; з) вишеструко љуспање; и) љускање; ј) пукотине

## 8. КЛИМА БЕОГРАДА И ЊЕГОВЕ УЖЕ ОКОЛИНЕ

Београд карактерише природни положај који се сматра јединственим у Европи. Уникатност је резултат како позиције на ушћу реке Саве у Дунав, тако и сложене морфологије условљене природним факторима, односно комплексним историјским развитком и трансформацијама градског језгра (Градски завод за заштиту здравља, 2002). Београд и његову ужу околину карактерише умерено континентална клима са релативно благим зимама, топлим летима и сменом хладно-влажних и топло-сушних периода (Ракићевић, 1960). Близина планина Србије, Карпата и делом Панонског басена, утичу на то да је клима Београда под утицајем кошавског подручја. Изражени урбани утицај на микроклиму резултира већом температуром у граду („градско острво топлоте“), него у његовој непосредној околини (Ункашевић, 1994). Према Коррен-Geiger-овој класификацији климатских типова, корелисаној са аспекта утицаја климе на споменике културе од камена, Београд са ужом околином одликује клима класе Cfb, топла влажна клима са врућим летима (Kottek et al., 2006). Карактеристике овог типа климе на алтерабилност камена су топли и влажни услови као катализатори реакције загађивача ваздуха и камена. Промене влажности узрокују разарачко деловање соли, са потенцијалним деловањем мрза услед повремениог пада температуре испод нуле (Brimblecombe, 2010a, b).

Најважнији климатски фактори који утичу на временску постојаност камена су температурни параметри (опсег температуре, број мразних, ледених дана, циклуси мржњења – отапања), параметри падавина (количина падавина, број кишних дана, опсег релативне влажности ваздуха), параметри ветра (брзина, ветар са кишом), параметри аерозагађења (концентрације загађивача). Како би се сагледао вековни утицај климатских промена на стање керсантита у каменолому и испитиваним објектима (најстарији испитивани објекат је из 1899. године), према расположивости мерених климатских показатеља, у даљем тексту су дати хронолошки, без локацијских разлика, хронолошки генерални показатељи климе Београда (Табела 2). Они су подељени у три субпериода: период 1888-1959, стандардни климатолошки период 1961-1990 и период 1991-2020. На крају поглавља су приказани расположиви микроклиматски показатељи разлика између централне зоне Београда (зона 5) и његове уже околине – брдовитог залеђа (зона 4; Г333, 2002).

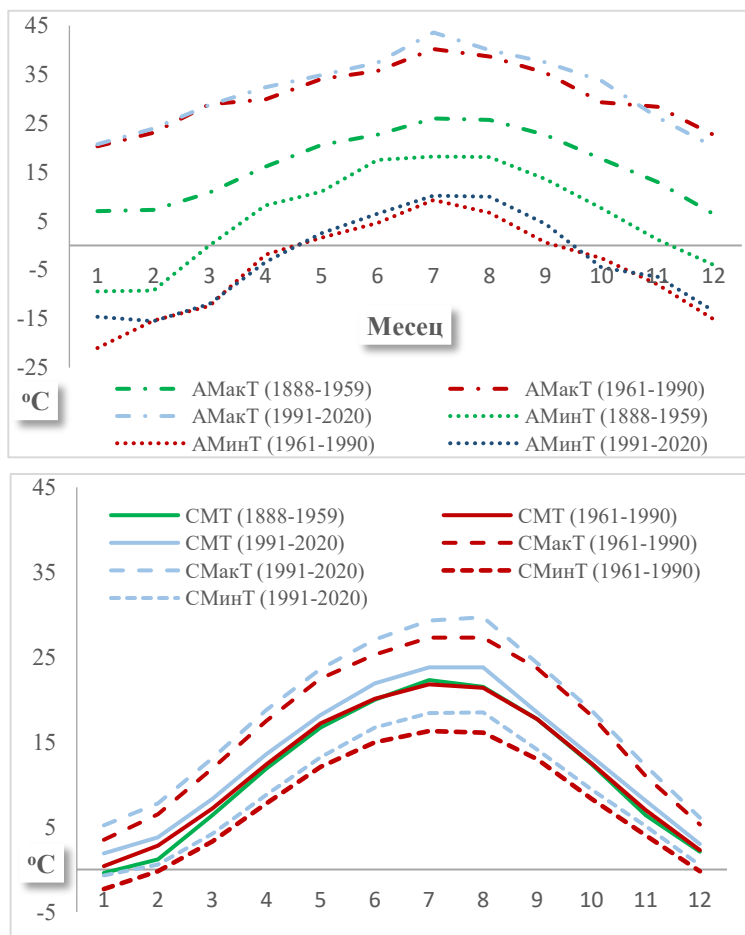
Табела 2. Климатске карактеристике Београда и уже околине

Климатске карактеристике	Климатски период		
	1888-1959. (Ракићевић, Т., 1960)	1961-1990. (Hidmet.gov.rs. 2023a)	1991-2020. (Hidmet.gov.rs. 2023b)
Средња годишња Т ваздуха	11,5 °C	11,9	13,2
Најтоплији месец (средња месечна Т)	Јул (22,3 °C)	Јул (27,3 °C)	Јул (27,1 °C)
Најхладнији месец (средња месечна Т)	Јануар (-0,4 °C)	Јануар (-2,3 °C)	Јануар (-0,7 °C)
Апсолутни максимум	41,8 °C	40,2 °C	43,6 °C
Апсолутни минимум	-26,2 °C	-21,0 °C	-15,5 °C
Ср. број тропских дана (макс. дневна Т >30 °C)	33,7 (1920-1959)	25,1	44,6
Ср. број мразних дана (мин. дневна Т < 0 °C)	69,4 (1920-1959)	62,2	52,1
	<b>Релативна влажност ваздуха (RH)</b>		
Просечна годишња релативна влажност ваздуха (RH)	71 %	69,1 %	67,3 %
	<b>Падавине</b>		
Просечна годишња количина падавина	661,9 mm	684,3	698,9
Просечан бр. дана са количином падавина > 0,1 mm	-	139,1	138,2
Просечан број дана са количином падавина > 10 mm	-	20,5	21,7
Просечан број дана са снежним покривачем	44,3	42,7	30,9
	<b>Инсолација</b>		
Просечно годишње трајање сунца (h)	-	2025,1	2020,3
Ср. број ведрих дана (облачност < 2/8)	69,9 (1921-1945)	78,0	73,3
Ср. број облачних дана (облачност > 6/8)	186,1 (1921-1945)	103,8	97,3
Број дана са маглom	36,6 (1921-1945)	21,7	25,8

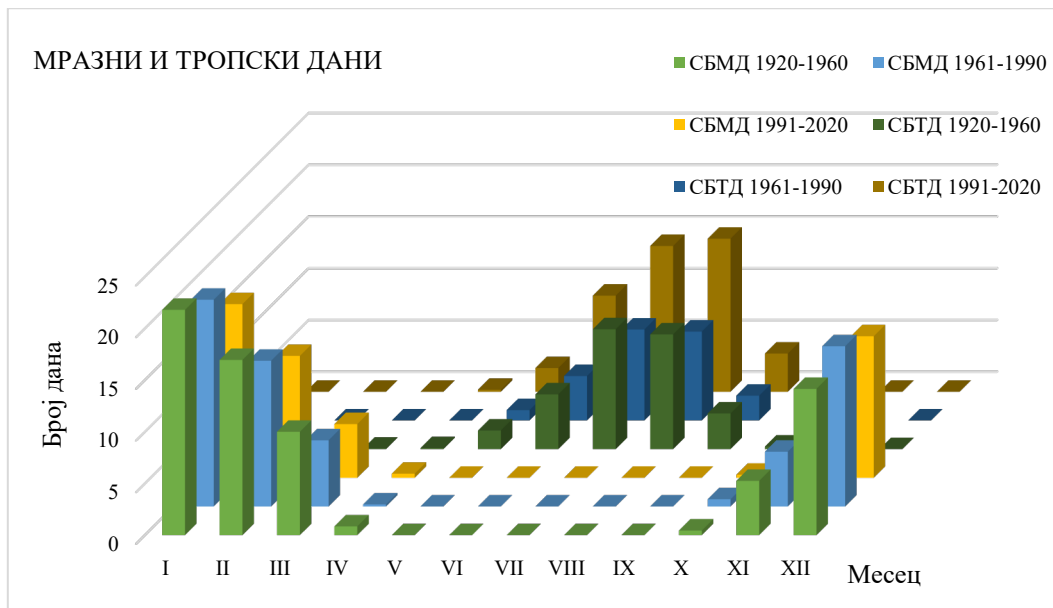


**Температура ваздуха**, као најважнији климатски фактор за распадање камена, изражена је средњом годишњом температуром ваздуха као репрезентативном вредношћу за одређени временски период уз напомену да је то веома варијабилни фактор који се мења на годишњем нивоу. Посматрајући стогодишњи климатски период праћења температуре ваздуха, а према средњим вредностима показатеља, уочава се уједначени тренд у сва три субпериода уз благи пораст средње годишње температуре генерално за око 2 °С. Заједничка карактеристика сва три климатска субпериода јесте да је најхладнији месец јануар, са амплитудом средње минималне месечне температуре од -2,3 °С, док је најтоплији месец јул са трендом пораста средње максималне месечне температуре за око 4 °С. Праћењем тренда промена по месецима може се уочити да средње максималне и минималне температуре, односно опсег њихових амплитудних вредности, имају значајно мању месечну варијабилност од средњих месечних вредности за период 1888-1959. у односу на друга два климатска субпериода (Сл. 13). Потребно је истаћи да су средње месечне температуре варијабилне по годинама услед чега се не може добити реална слика промена температура ваздуха током година. Ипак, генерална карактеристика је да су зимски месеци варијабилнији од летњих услед продирања хладних и топлих ваздушних маса у појединим годинама (Ракићевић, 1960).

За разумевање процеса физичког распадања камена, важни температурни показатељи јесу број мразних и тропских дана (Табела 1). Подаци о броју мразних дана указују да се појава мрза јавља у чак седам месеци. У појединим месецима број мразних дана износи више од половине дана у месецу. Ова појава условљава интензивне циклусе мржњења и одмрзавања и неповољно утиче на камен. Посматрајући период 1888-2020. године приметно је да број мразних дана опада док број тропских дана не показује линеарни тренд. Он је био највећи у јулу за прва два субпериода, да би у периоду 1991-2020. средњи број тропских дана амплитуду достигао у августу месецу (Сл. 14).

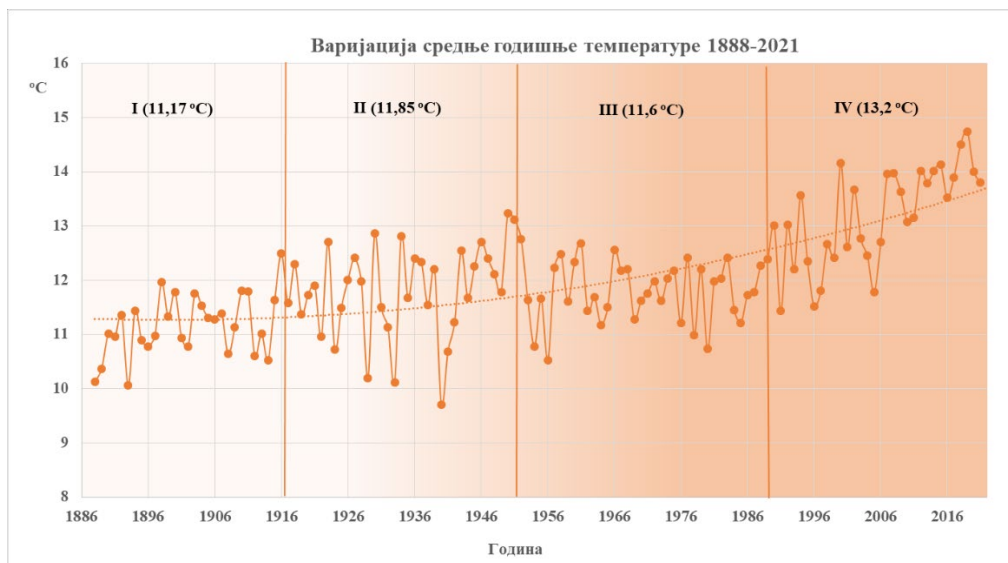


Слика 13. Варијабилност параметара температуре ваздуха на месечном нивоу за субпериод 1888-1959 (Ракићевић, 1960), за 1961-1990 (Hidmet.gov.rs. 2023a) и за 1991-2020 (Hidmet.gov.rs. 2023b); Легенда: СМТ – средња месечна температура; СМакТ – средња максимална температура; СМинТ – средња минимална температура; АМакТ – апсолутна максимална температура; АМинТ – апсолутна минимална температура.



Слика 14. Распоред средњег броја мразних и тропских дана на месечном нивоу за субпериод 1888-1959 (Ракићевић, 1960), за 1961-1990 (Hidmet.gov.rs. 2023a) и за 1991-2020 (Hidmet.gov.rs. 2023b); Легенда: СБМД – средњи број мразних дана; СБТД – средњи број тропских дана;

Тренд опадања укупног броја мразних дана током зима са све мање снега, односно пораст укупног броја тропских дана, са све чешћим дугим и топлим летима, резултат су свеукупних климатских промена које се одвијају током последњих 130 година. Подаци системских мерења температуре ваздуха Београда указују на отопљавања уз могућност јасног разликовања четири различита тренда у динамици кретања средњих годишњих температура ваздуха (Сл. 15).



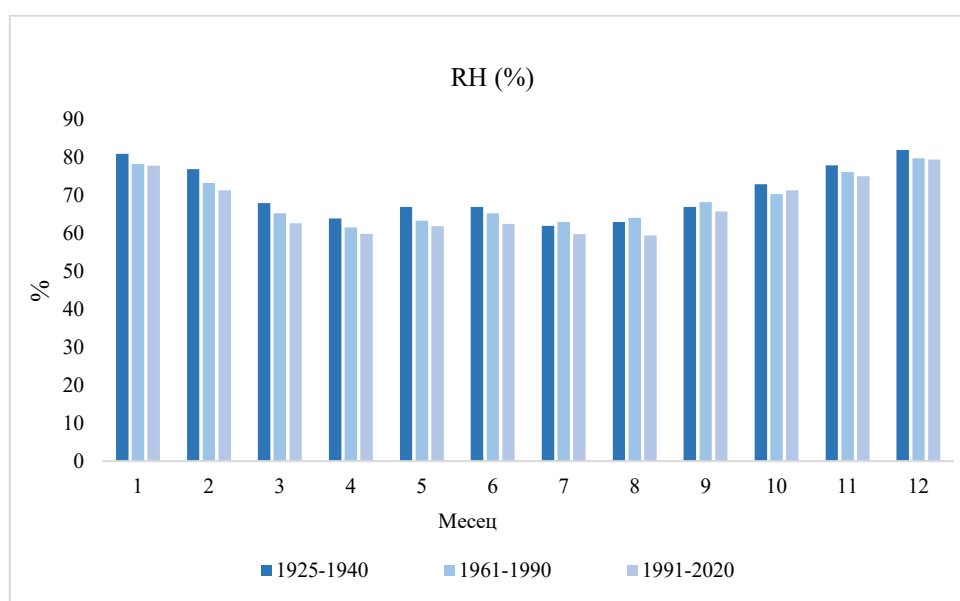
Слика 15. Варијације средње годишње температуре ваздуха у Београду за период 1888-2021. и тренд кретања температура (извор: [http://www.meteorologos.rs/wp-content/uploads/2020/02/BEOGRAD\\_1750-2019\\_Srednje-mesecne-i-godisnje-temperature.pdf](http://www.meteorologos.rs/wp-content/uploads/2020/02/BEOGRAD_1750-2019_Srednje-mesecne-i-godisnje-temperature.pdf))

Први временски период од 1888-1917. године карактеришу релативно ниске температуре са средњом годишњом температуром ваздуха од 11,17 °C и релативно уским опсегом варирања од 10 до 12 °C (Rakićević, 1994). У наредних 35 година средња годишња температура се повећава на 11,85 °C са разликом амплитудних вредности од 3,4 °C и максимумом средње годишње температуре од 13,1 °C достигнутом у 1951. години. Трећи сегмент (1952-1989) се карактерише стагнацијом у порасту температуре (средња вредност годишње температуре је 11,6 °C) и релативно малим опсегом варирања од 2 °C. Последње три деценије обележава тренд континуираног пораста температуре са средњом годишњом температуром од 13,2 °C,

максимумом од 14,7 °C достигнутом 2019. године и минимумом који одговара средњој вредности претходних сто година (11,5 °C), односно разликом амплитудних вредности која поново достиже опсег од 3,2 °C.

Температура ваздуха није директан кључни покретач распадања камена, али у садејству са другим климатским факторима иницира интензивне процесе деградације камена као што су напрезање и диференцијално ширење. Ипак, од највећег значаја је директан утицај температуре на промену релативне влажности ваздуха. Релативна влажност ваздуха утиче на степен засићења воде/влаге у порама камена, а тиме и на циклусе растварања-кристализације на пример соли, леда, или пак само циклично влажење сушење камена.

**Релативна влажност ваздуха (RH)** је фактор који директно утиче на апсорпцију влаге у камен. То је степен засићености ваздуха воденом паром и обрнуто је пропорционалан температури ваздуха. Релативна влажност ваздуха у Београду већа је у зимским месецима у односу на суви летњи период (Rakićević, 1960), а варијације средње месечне RH за мерене климатске периоде су приказани на слици 16.



Слика 16. Варијације средње релативне влажности ваздуха у Београду за субпериод 1924-1940 (Rakićević, 1960), за 1961-1990 (Hidmet.gov.rs. 2023a) и за 1991-2020 (Hidmet.gov.rs. 2023b)

Приметан је пад вредности влажности ваздуха за сваки месец, посматрано у односу на три издвојена периода (1924-1940, 1961-1990 и 1991-2020). Овакав тренд је у складу са повећањем просечних вредности температуре ваздуха.

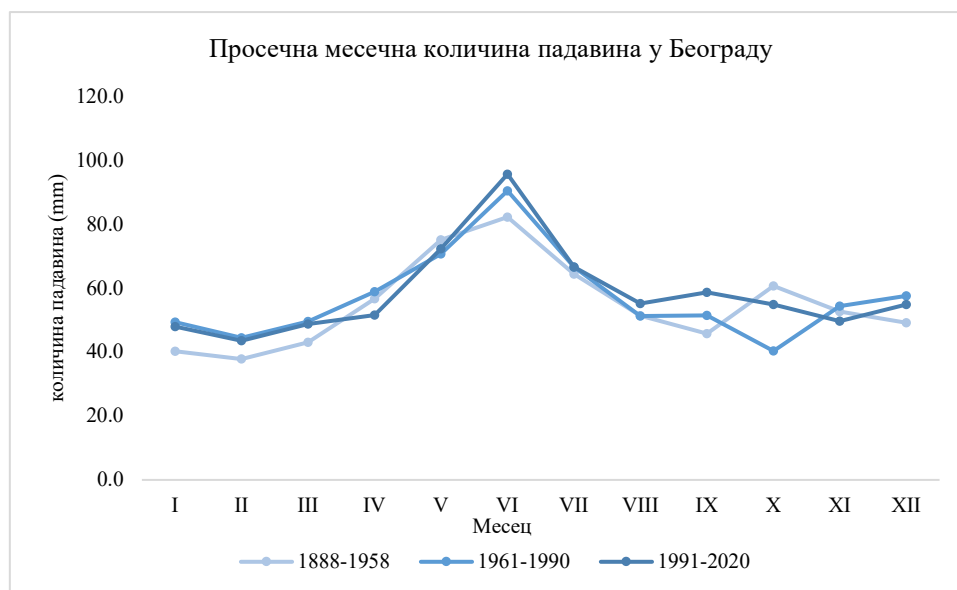
### Количина падавина

У Београду је максимална количина падавина у јуну и мају, а најмања у фебруару за сва три посматрана периода (Сл. 17). Влажан атлантски ваздух са северозапада условљава да су мај и јун најкишњији месеци са честим локалним пљусковима и грмљавином (Unkašević, 1994). Крај лета се одликује краћим или дужим сушним периодима, док се позно *Михољско лето* јавља крајем септембра и почетком октобра (Unkašević, 1994). Посматрано по периодима, уочава се повећање просечне количине падавина (Табела 1). Количина падавина значајно утиче на деградацију камена, а уско је повезана са температуром ваздуха и мразним данима када се својства воде и влаге у ваздуху удружују са другим важним факторима распадања камена.

За београдску климу карактеристична је кошава – југоисточни ветар који најчешће дува током јесени и зиме. Топла кошава фенског карактера има јужни смер, док је хладна кошава бурског карактера долази из источног смера и може достићи орканску брзину од 30 m/s. У јуну и јулу најчешће се јављају ветрови из западног правца, док се током пролећа и јесени осећа фенски



ефекат који условљава пораст температуре (Unkašević, 1994).



Слика 17. Варијабилност количине падавина на месечном нивоу за субпериод 1888-1958 (Rakićević, 1960), за 1961-1990 (Hidmet.gov.rs. 2023a) и за 1991-2020 (Hidmet.gov.rs. 2023б)

## Аерозагађење

Београд је урбана агломерација чији је развој утицао на промене квалитета ваздуха, а самим тим и на интензитет утицаја загађивача ваздуха на споменике културе од камена. Према доступним подацима Републичког хидрометеоролошког завода Србије (деталјан мониторинг од 1978. године), садржај главних загађујућих материја ( $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$ ) је до 1991. године био изузетно висок због емисија из термоелектрана и индустријских постројења која се налазе у окружењу Београда (ХИП-Азотара и ХИП-Петрохемија у Панчеву и Фабрика нерђајућег челика Железара у Смедереву) (Unkašević, 1994). Иако је последњих деценија значајно смањен садржај  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$ , садржај концентрације  $\text{PM}_{10}$  честица, који се у Београду мери од 2010. године, је често изнад дозвољених граничних вредности, тако да Београд и даље често карактерише висока позиција на листи најзагађенијих градова у свету (Табела 3). Висока концентрација  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  такође доприноси загађењу ваздуха у Београду. Загађење ваздуха из мобилних извора постало је један од најдоминантнијих проблема у престоници због мале пропусне моћи ужег градског језгра и старости возила. Истраживања спроведена током 2003. године на најпрометнијим раскрсницама у Београду су указала да прође више од 6000 возила на сат и да је у центру града свакодневно присутно 200.000 аутомобила (Vidaković, 2013). Средње годишње вредности концентрација угљен-моноксида, азота, азот-диоксида, олова и сумпор-диоксида који потичу из издувних гасова аутомобила су изнад дозвољених вредности (Gburčik i dr., 2002). Поред поменутог извора, значајни емитери и даље присутни су топлане у близини Београда и локалне котларнице које користе угаљ или тешка лож уља и сагоревањем емитују додатне количине угљен-диоксида, сумпор-диоксида и чађи. Овако високе концентрације аерозагађења у Београду свакако доприносе честој појави киселих киша, које могу да делују растварачки на минерале камена а такође могу да резултују депоновањем оловних и угљеничних честица уз формирање „црних кора“.

Упоредном анализом климатских фактора зоне у којој се налази каменолом Тешића мајдан и зоне у којој се налазе анализирани објекти, уочава се разлика као последица микроклиме урбаног градског језгра (Табела 4). Већа вредност средње годишње температуре, средње максималне температуре, нижа вредност минималне са мањом количином падавина карактеришу микроклиму споменика Мало степениште.

Табела 3. Квалитет ваздуха у Београду у периоду 2010-2021. године (sepa.gov.rs, 2023)

Година	Концентрација у $\mu\text{g}/\text{m}^3$										
	SO <sub>2</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2,5</sub>	NO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		CO	
	СГВ	бр. дана >ГДВ	СГВ	бр. дана >ГДВ	СГВ	СГВ	бр. дана >ГДВ	СГВ	бр. дана >ГДВ	СГВ	макс. год.вр.
2010	15	1	37	52	/	34	3	70	12	0,89	7
2011	19	1	52	132	/	34	4	73	27	0,8	6,6
2012	17	0	48	106	/	34	3	52	33	1	5,6
2013	15	0	30	44	/	32	1	73	46	0,61	6,2
2014	14	0	29	48	/	30	0	65,7	13	0,6	3,8
2015	13	0	45	83	/	37	18	27,6	0	0,6	4,5
2016	41	1	34	52	23	46	24	49,2	0	0,5	0
2017	43	0	40	76	/	63	46	39,2	0	0,5	0
2018	28	2	37	59	33	43	19	44,7	0	0,42	0
2019	11	0	33	63	26	27	0	59,5	4	0,45	3,59
2020	11	1	33	46	30	29	1	52	0	0,39	2,84
2021	21	0	36	53	23	57	33	73	30	0,42	2,07

Легенда: СГВ – средња годишња вредност; ГДВ – гранична дозвољена вредност за: SO<sub>2</sub> >125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>10</sub> >50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; NO<sub>2</sub> >85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; O<sub>3</sub> >120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

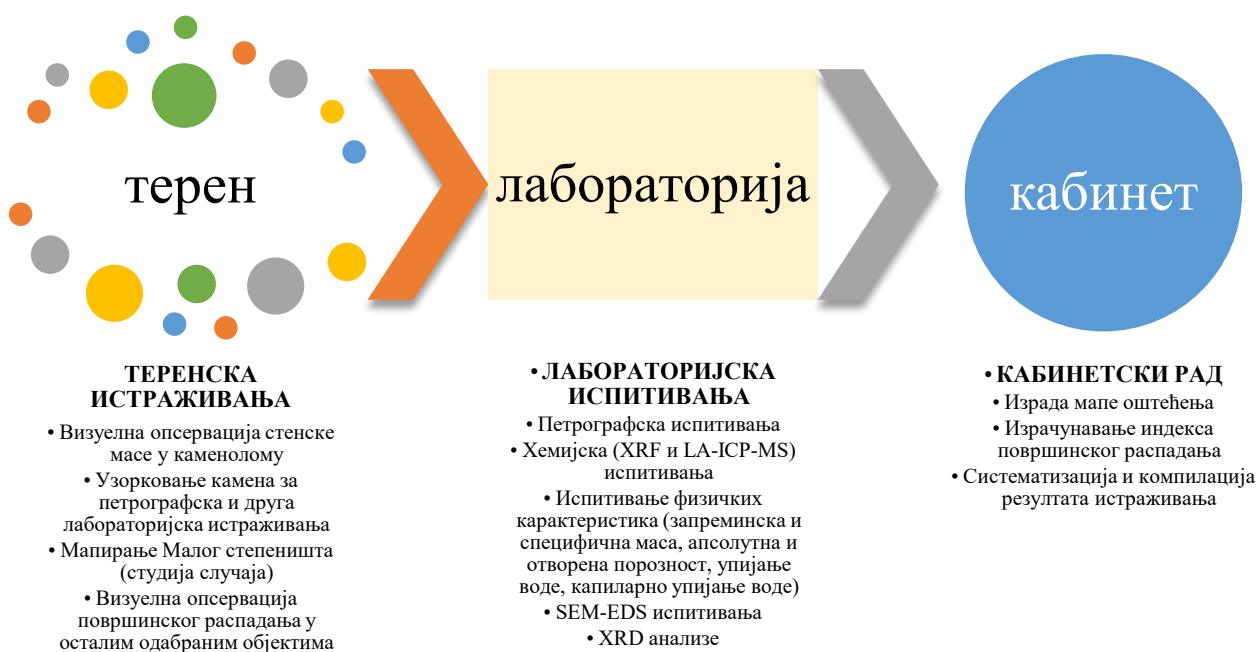
Присуство магле са карактеристиком смога као последица загађења, висок индекс лошег квалитета ваздуха и значајно повећан број дана са концентрацијом чађи преко граничне вредности имисије, јасни су показатељи повећаног загађења које изразито неповољно утиче на камен и изазива његову убрзану деградацију.

Табела 4. Упоредни подаци за зону 4 – Брдовито залеђе (каменолом Тешића мајдан) и зону 5 Центар (Мало степениште и други објекти изграђени од керсантита) (ГЗЗЗ, 2002).

	Зона 4 (Тешића мајдан)	Зона 5 (Мало степениште)
Средња годишња температура ваздуха	11.0 °C	12.3 °C
Најхладнији месец (средња месечна Т)	-2.0 до -3.0 °C	-1,3 °C
Најтоплији месец (средња месечна Т)	26.0°C	27.2 °C
Просечна годишња количина падавина	730 mm	694 mm
Карактеристике магле	Претежно долинска	Претежно смог
Индекс квалитета ваздуха-AQI3	1.0< AQI3<1.4 средње-нездрав	1.8< AQI3<1.9 веома нездрав
Просечан број дана са концентрацијом чађи преко граничне вредности имисије - ГВИ	20< N<50	>100

## 9. МЕТОДОЛОГИЈА ИСПИТИВАЊА

Докторском дисертацијом је обухваћено детаљно проучавање петролошких и физичких карактеристика како керсантиа у каменолому Тешића мајдану, тако и керсантиа уграђеног у Мало степениште. Такође је извршено испитивање и алтерабилности керсантиа након деценијске изложености различитим екстринзичним факторима руралне и агресивне урбане средине. Поред детаљног проучавања врста и степена деградације свежег керсантиа у лежишту (руралној средини) и керсантиа уграђеног у одабрани споменик културе (студија случаја), извршено је и снимање стања керсантиа у другим објектима културног наслеђа како би се извршила међусобна корелација стања. Посебна пажња је посвећена утицају начина површинске обраде на његову постојаност у урбаној средини. У циљу дефинисања физичко-хемијских процеса површинског распадања керсантиа из Тешића мајдана и исте стене уграђене у градитељско наслеђе Београда примењена су сложена теренска и лабораторијска испитивања. Резултати су синтетизовани кроз кабинетски рад, а дијаграм тока истраживања од теренске визуелне опсервације, мапирања и узорковања преко различитих техника и метода испитивања графички је приказан на слици 18.



Слика 18. Примењена методологија истраживања

### 9.1. ТЕРЕНСКО ИСТРАЖИВАЊЕ У КАМЕНОЛОМУ

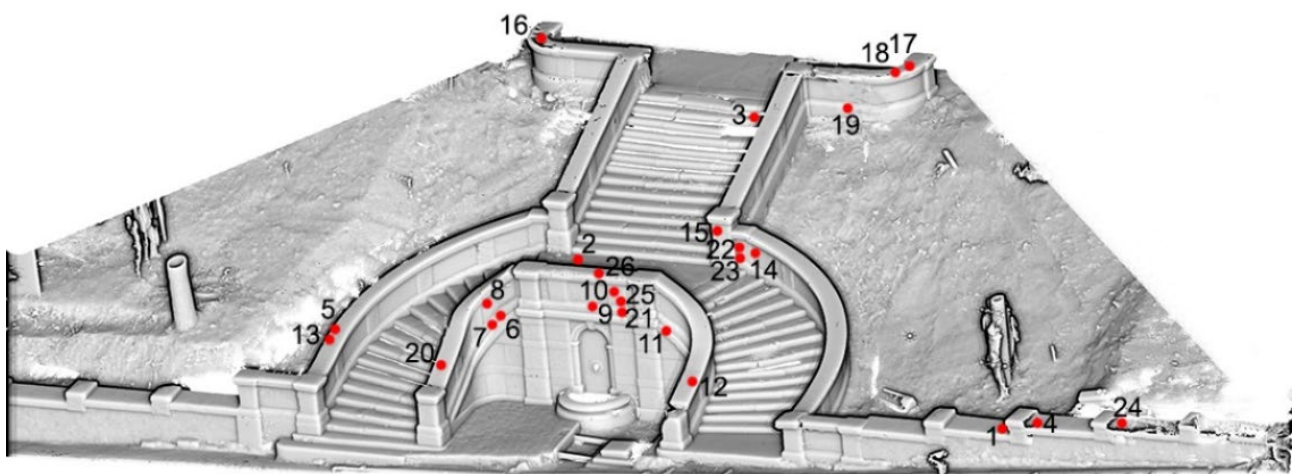
Теренска истраживања спроведена су током 2017. и 2018. године и обухватила су теренско рекогносцирање стенске масе у каменолому Тешића мајдану, и визуелну опсервацију одабраних објеката. Теренски рад у каменолому имао је за циљ уочавање различитих структурних типова керсантиа. У складу са тим извршено је узорковање стенске масе за потребе даљих лабораторијских испитивања (Сл. 19). Истовремено са тим снимљено је стање површине керсантиа и регистроване су форме површинског распадања. У каменолому је извршено узорковање укупно једанаест узорака обележених ознакама 1ТМ – 11ТМ.



Слика 19. Места узимања узорака у каменолому Тешића мајдану

## 9.2. ТЕРЕНСКО ИСТРАЖИВАЊЕ ОДАБРАНИХ ОБЈЕКТАТА

Теренско истраживање одабраних објеката обухватало је детаљну визуелну опсервацију типова површинског распадања и узорковање уграђеног камена и продуката распадања са објекта који је одабран за студију случаја (Мало степениште). Узорковање Малог степеништа као и свих осталих објеката културног наслеђа било је условљено значајем и статусом објекта. Оно је било лимитирано доступношћу лабилних делова камених елемената и површинских продуката распадања. Укупно је узето 30 узорака са објекта, од чега су четири узорка соли (ознаке 46MS, 55MS и 64aMS и 64bMS). Остали узорци представљали су површински деградирани керсантит са или без црних/обојених кора у количинама довољним само за петрографске, SEM и XRD анализе (ознаке 1MS - 26MS, Сл. 20, табела 9). Теренска истраживања Малог степеништа спроведена су у почетној фази реконструкције објекта. Погодност настала демонтажом блокова који због структуралних пукотина нису могли бити поново уграђени омогућила је добијање потребних количина узорака за лабораторијска испитивања физичких својстава (узорци обележени ознаком 24MS, 25MS и 26MS).



Слика 20. Позиције узорака на Малом степеништу (симплификован 3Д модел)

Утврђивање стања керсантита уграђеног у Мало степениште је спроведено детаљним мапирањем форми распадања током 2017. и 2018. године. Мапирање је подразумевало снимање површина појединачних блокова, класификацију и регистрацију интензитета пропадања. Резултати су графички приказани на мапама оштећења применом стандардизоване



класификационе шеме форми пропадања (Fitzner, Heinrichs and Kownatzki, 1995). Примењена методологија мапирања се базира на феноменолошко геометријским критеријумима (Fitzner and Heinrichs, 2002). Она је прилагођена испитиваном објекту тј. дефинисаним интензитетима и категоријама пропадања у складу са величином уграђених камених елемената и архитектонском вредности споменика. Примењена терминологија је обухватала Фицнерову класификациону шему форми распадања, али и терминологију за одређене форме дату у Илустрованом појмовнику форми распадања камена ИКОМОС-овог међународног научног комитета за камен (Vergès-Belmin et al., 2008). Графички приказ примењене методологије мапирања дат је у Табели 5.

Табела 5. Графички приказ примењене методологије мапирања Фицнерове класификационе шеме (Fitzner and Heinrichs, 2002)

Ниво I - Група 1 - Губитак каменог материјала						
Ниво II - главна форма	Ниво IV интензитет					
Ниво III - индивидуалне форме пропадања	Класа интензитета					
Назив	Дубина (cm)					
Дубинско распадање (W)	0	<0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-1	>1
	W <sub>0</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	W <sub>5</sub>
Услед губитка танке површинске коре-љуске (cW)						
Релефно распадање (R)	Дубина (cm)					
	0	<0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-1	>1
	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>
Заобљавање (Ro)						
Храпавост (Rr)						
Комадасто распадање (O)	Запремина (cm <sup>3</sup> )					
	0	<10	10-75	75-250	250-500	>500
	O <sub>0</sub>	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	O <sub>5</sub>
Конструкциони фактори (bO)						
Непрепознатљиви узроци (oO)						
Антропогени фактори (aO)						
Природни фактори (nO)						

Ниво I - Група 2 - Декolorација/наслаге - инкрустације						
Ниво II - главна форма	Ниво IV интензитет					
Ниво III - индивидуалне форме пропадања	Класа интензитета					
Назив	Степен промене боје					
Декolorација (D)	без	низак	висок			
	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>			
Обојење (хроматска промена боје) (Dc)						
Запрљаност (I)	Степен покривености површине					
	без	низак	средњи	висок		
	0%	0-20%	20 - 50%	>50%		
	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>		
Запрљаност честицама атмосфере (pI)						
Наслаге соли (E)	Степен покривености површине					
	без	низак	висок			
	0%	<10%	>10%			
	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>			
Исољавање (Ee)						
Биолошка колонизација (B)	Степен покривености површине					
	без	низак	висок			
	B <sub>0</sub>		B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>		
Колонизација нижим биљкама (Bi)						
Колонизација вишим биљкама (Bh)						

Наставак табеле на следећој страни

Наставак табеле са претходне стране

Кора (C)	Степен покривености површине				
	без	низак	висок		
	0%	<50%	>50%		
	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		
Тамне коре које прате морфологију камена (dkC)					
Обојене коре које прате морфологију камена (fkC)					
Комбинације индивидуалних форми распадања (D - C)	Степен покривености површине				
	без	низак	висок		
	0%	<50%	>50%		
	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>		
Прелазни облик између обојености и тамне коре која прати морфологију камена (Dc - dkC)					
Прелазни облик између обојености и обојене коре која прати морфологију камена (Dc - fkC)					

Ниво I - Група 3 - Одвајање						
Ниво II - главна форма	Ниво IV интензитет					
Ниво III - индивидуалне форме пропадања	Класа интензитета					
Назив	Маса одвојеног материјала					
Зрнаста дезинтеграција (G)	без	ниска	средња	висока		
	0%	<10%	10 - 50%	>50%		
	G <sub>0</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>		
Зрнаста дезинтеграција у грус (Gg)						
Љуспање (F)	Маса одвојеног материјала					
	без	ниска	средња	висока		
	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>		
Појединачне љуспе (eF)						
Вишеструко љуспање (mF)						
Љускање (S)	Дебљина љуске (cm)					
	0	<0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 1,5	>1,5
	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
Као последица обраде камена штоковањем (qS)						
Одвајање коре са материјалом камена (K)	Маса одвојеног материјала					
	без	ниска	средња	висока		
	0%	<10%	10 - 50%	>50%		
	K <sub>0</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>		
Одвајање тамне коре која мења површину камена (diK)						
Одвајање обојене коре која мења површину камена (fiK)						
Комбинације индивидуалних форми распадања (G - F - K)	Маса одвојеног материјала					
	без	ниска	средња	висока		
	0%	<10%	10 - 50%	>50%		
	G - F - K <sub>0</sub>	G - F - K <sub>1</sub>	G - F - K <sub>2</sub>	G - F - K <sub>3</sub>		
Зрнаста дезинтеграција у грус и одвајање тамне коре (Gg - diK)						
Зрнаста дезинтеграција у грус и одвајање обојене коре (Gg - fiK)						
Вишеструко љуспање и одвајање тамне коре (mF - diK)						
Вишеструко љуспање и одвајање обојене коре (mF - fiK)						
Зрнаста дезинтеграције и вишеструко љуспање (Gg - mF)						
Категорије оштећења	0	1	2	3	4	5

Ниво I - Група 4 - Пукотине/деформације					
Ниво II - главна форма	Ниво IV интензитет				
Ниво III - индивидуалне форме пропадања	Класа интензитета				
Назив	Број и димензије пукотина				
Пукотине (L)	без	мале		велике	
	L <sub>0</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>		
	Пукотине независне од структуре камена (vL)				



У приказаној класификационој шеми (Табела 5) сумиране су све форме распадања утврђене на 436 мапираних блокова Малог степеништа. У табели су приказани њихови интензитети (у cm и mm скали) у корелацији са категоријама оштећења. Форме распадања су груписане према хијерархијском низу у четири главна нивоа (Сл. 21).



Слика 21. Главни нивои форми распадања

Стање сваког каменог блока је осим фотодокументације обухватало графички приказ типова распадања према главним и индивидуалним формама и интензитетима распадања. У циљу синтезе степена оштећености делова објекта Малог степеништа, сви графички приказани резултати мапирања то јест интензитета распадања су синтетизовани у шест категорија оштећења и то: без оштећења (0), веома слаба оштећења (1), слаба оштећења (2), умерена оштећења (3), јака оштећења (4) и веома јака оштећења (5) (Табела 5). Такође је извршена и квантитативна евалуација категорија оштећења изражена кроз линеарни  $DI_{lin}$  (1) и прогресивни индекс распадања  $DI_{prog}$  (2). Индекси су израчунати на основу процентуалне заступљености мапираних категорија оштећења: веома слаба оштећења (B), слаба оштећења (C), умерена оштећења (D), јака оштећења (E) и веома јака оштећења (F) према следећим формулама:

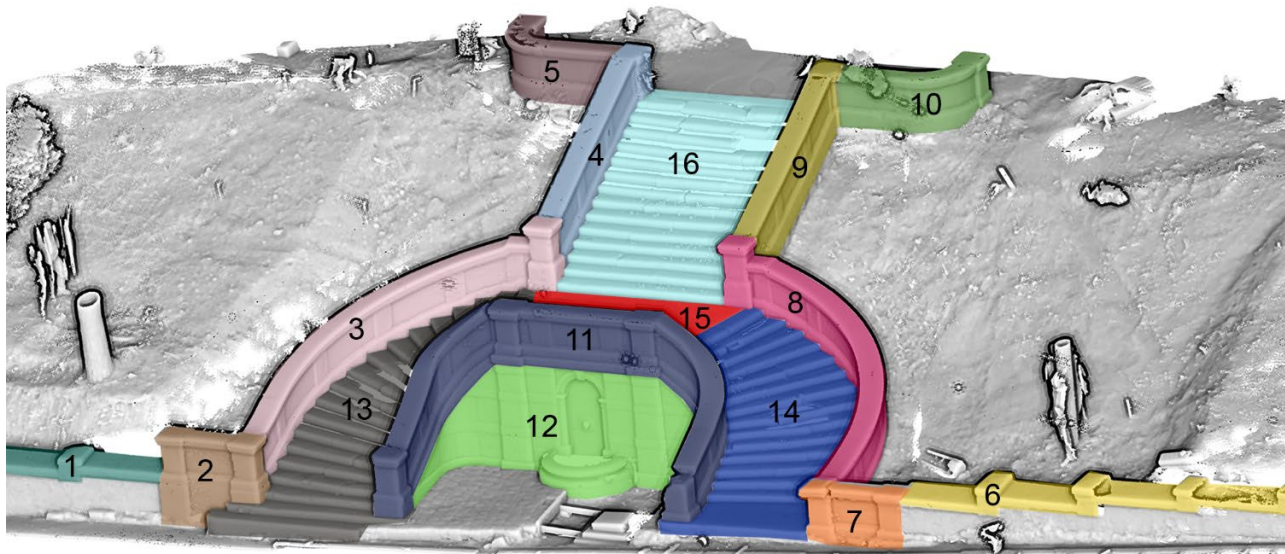
$$DI_{lin} = \frac{B + (2 \cdot C) + (3 \cdot D) + (4 \cdot E) + (5 \cdot F)}{100} \quad (1)$$

$$DI_{prog} = \sqrt{\frac{B + (4 \cdot C) + (9 \cdot D) + (16 \cdot E) + (25 \cdot F)}{100}} \quad (2)$$

Резултати индекса распадања израчунати су како за Мало степениште у целисти тако и за појединачне сегменте. Подела на сегменте је извршена у циљу јасног дефинисања механизма распадања у односу на комплексну геометријску форму степеништа (Сл. 22). Проучавани објекат је подељен на 16 сегмената и за сваки појединачни сегмент су израчунати индекси распадања. Сегменти обухватају целе блокове који су изложени једнострано, двострано или вишестрано у зависности од положаја у сегменту степеништа у ком се налазе.

Теренска истраживања осталих одабраних објеката обухватала су само визуелну опсервацију стања уграђеног керсантиа, идентификацију типова распадања без детаљног мапирања и категоризације оштећења. Она су спроведена у периоду од 2015. – 2022. године. Осим наведеног извршено је узорковање керсантиа уграђеног у споменик културе Класна лутрија за потребе петрографских испитивања (два узорка ознаке 1L и 2L), један узорак соли са површине уграђеног керсантиа (3L). Узорковање керсантиа са делова фасаде објекта Народног музеја извршено је у количинама довољним за петрографска и испитивања

физичких својстава (четири узорка ознака 5NM - 8NM).



Слика 22. Графичка подела Малог степеништа на сегменте за које су израчунати индекси распадања

### 9.3. ЛАБОРАТОРИЈСКА ИСПИТИВАЊА

Након обављених теренских истраживања и узорковања керсантита у Тешића мајдану (Сл. 23а), као и керсантита и његових продуката распадања у одабраним објектима (Сл. 23б, в), приступило се припреми узорка за лабораторијска испитивања која је обухватала формирање опитних тела, спрашивање узорка и израду петрографских препарата.



Слика 23. Макроскопски изглед узорка за лабораторијска испитивања; а) узорак керсантита 1TM за оптичка и остала лабораторијска испитивања; б) узорак површинске коре керсантита са Малог степеништа – 19MS; в) узорак соли узет са површине керсантита - 64aMS

#### 9.3.1. Оптичка испитивања

Испитивање петрографског састава керсантита обухватало је, осим макроскопске опсервације на терену, микроскопску петрографску анализу применом стандардизоване оптичке методе испитивања на поларизационом микроскопу (SRPS EN 12407). Испитивања су имала за циљ утврђивање минералног састава и структурних карактеристика керсантита, идентификовање секундарних минерала насталих алтерационим процесима и утврђивање продуката насталих површинским распадањем. Испитивања су спроведена у Лабораторији за петрологију Департмана за минералологију, кристалографију, петрологију и геохемију – Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду. Анализе су рађене коришћењем Zeiss микроскопа са поларизованим светлом који је био повезан са дигиталном камером Zeiss AxioCam 208 color

(Zen Core 3.5 – Software). Оптичка испитивања извршена су на 41 од укупно 43 узорка (Табела 10).

### 9.3.2. Хемијска испитивања

Хемијске анализе (макро и микро елемената) одабраних узорака керсантита из каменолома (узорци 5TM, 6TM, 7TM и 11TM) и површински распаднутих узорака са Малог степеништа (узорци 4MS, 6MS, 9MS, 19MS, 20MS и 22MS) рађене су применом методе рендгенске флуоресцентне спектрометрије (XRF) и методе масене спектрометрије индуковане спрегнутом плазмом са ласерском аблацијом (LA-ICP-MS) у лабораторији Bureau Veritas Minerals Pty Ltd, у Перту у Аустралији. Одређене су концентрације садржаја следећих главних оксида: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO и микроелемената у траговима: Ag, As, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, In, La, Lu, Mn, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Re, Sb, Sc, Se, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. Граница детекције за главне оксиде је 0,01 %, односно 0,001 % за K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SO<sub>3</sub>.

### 9.3.3. Индекси површинског (хемијског) распадања

На основу резултата хемијских анализа садржаја макро елемената, то јест мобилности одређених оксида у процесима површинског распадања, у циљу квантификовања процеса хемијског распадања, израчунати су индекси површинског распадања приказани у табели 6.

Табела 6. Индекси површинског распадања

Параметар/ назив	Формула за прорачун индекса	Аутор методе
<b>Индекси површинског распадања</b>		
Ослобађање алкалија и СаО при распадању фелдспата	$ba = \frac{Na_2O + K_2O + CaO}{Al_2O_3}$	(3) Harrassowitz (1926)
Фогтов индекс распадања	$V = \frac{mol(Al_2O_3 + K_2O)}{mol(MgO + CaO + Na_2O)}$	(4) Vogt (1927)
Индекс транспорта испирања Si	$PI = \frac{(100SiO_2)}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 + FeO}$	(5) Reiche (1943)
Индекс WPI	$WPI = \frac{100(Na_2O + K_2O + CaO + MgO - H_2O)}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}$	(6) Reiche (1943)
Модификовани WPI	$MWPI = \frac{100(Na_2O + K_2O + CaO + MgO)}{Na_2O + K_2O + CaO + MgO + SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	(7) Vogel (1975)
Индекс распадања	$WP = \{(2Na_2O/0.35) + (MgO/0.9) + (2K_2O/0.25) + (CaO/0.7)\}x100$	(8) Parker (1970)
Хемијски индекс алтерације	$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) x 100$	(9) Nesbit and Young (1982)
Хемијски индекс распадања	$CIW = \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)} x 100$	(10) Harnois (1988)
Индекс алтерације плагнокласа	$PIA = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)} x 100$	(11) Fedo et al. (1995)
Индекс продуката временског распадања	$PWI = \frac{100 \times SiO_2}{(TiO_2 + Fe_2O_3 + SiO_2 + Al_2O_3)}$	(12) Fedo et al. (1995)

Као што се из табеле 6. може видети индекси површинског распадања се базирају на различитим односима главних оксида. Модели израчунавања индекса, дати од поменутих аутора, концептуално мобилност елемената третирају на различите начине. Сходно томе,

њихове квантитативне вредности су у различитим опсезима, са такође различитим трендом (позитивним или негативним) линеарног кретања у односу на пораст интензитета површинског распадања:

- Индекс  $ba$  као индикатор распадања фелдспата, рефлектује ослобађање алкалија и калцијума у односу на алуминијум; смањење вредности коефицијента  $ba$  указује на већи степен распадања (Јовић, 2000);
- Фогтов индекс  $V$  указује на степен резидуалног карактера стене; калијум третира као имобилну компоненту, а повећање вредности индекса указује на већи степен пропадања (Јовић, 2000);
- Индекс  $PI$  одражава испирање силиције током процеса распадања и представља однос силиције и слабо мобилних елемената. Ниска вредност овог индекса указује на повећање степена распадања стене;
- Индекс  $WPI$  указује на стабилност стене према процесу распадања и представља однос мигративних оксида према суми главних оксида; величина индекса је обрнуто пропорционална стабилности стене тј. вредности индекса опадају са повећањем интензитета распадања (Јовић, 2000);
- Фогелов индекс  $MWPI$ , настао модификацијом  $WPI$  индекса, изузима  $H_2O$ ,  $FeO$  и  $TiO_2$ , док  $K_2O$ , као и претходни индекс, третира као мобилну компоненту (Vogel, 1975); индекс опада са порастом интензитета површинског распадања;
- Индекс распадања  $WP$  познатији у литератури као Паркеров индекс, одражава степен површинског распадања свеже стене и њену осетљивост на даље распадање; основа овог индекса је базирана на јачини везе најмобилнијих елемената стене (оксида алкалних и земноалкалних елемената) са кисеоником; величина индекса је обрнуто пропорционална степену површинског распадања (Parker, 1970) и представља врло добар индикатор раног стадијума распадања (Colman, 1982);
- Хемијски индекс алтерације  $CIA$ , прати прогресивну промену плагиокласа и  $K$ -фелдспата као доминантних минерала у магматским стенама (Nesbitt and Young, 1984) и њихов преображај у глиновите минерале (Nagarajan et al., 2015; Tunçay and Dengiz, 2016); осим оксида  $Na$  и  $Ca$ , индекс узима у обзир и садржај оксида калијума као мобилне компоненте; повећања вредности индекса указују на повећан степен распадања а предност овог индекса лежи у чињеници да све свеже стене, од габра до гранита, имају  $CIA$  вредности око 50 (Fedo et al., 1995); Високе вредности  $CIA$  указују на осиромашење мобилних катјона  $Ca$ ,  $Na$ ,  $K$  током површинског распадања, у односу на стабилне елементе као што су  $Al$ ,  $Ti$  (Nesbitt and Young, 1982); На основу вредности  $CIA$  индекса, степен површинског распадања се класификује на следеће класе (Nagarajan et al., 2015; Singh et al., 2005; Tunçay and Dengiz, 2016).:
  - 50-60 – веома слабо распадање
  - 60-70 – слабо распадање
  - 70-80 – умерено распадање
  - 80-90 – јако распадање
  - 90-100 – екстремно јако распадање.
- Индекс распадања  $CIW$  се базира на претпоставци да се  $Na$  и  $Ca$  испирају, док се имобилни  $Al$  обогаћује при распадању (Harnois, 1988). Повећања вредности индекса указују на повећан степен распадања, међутим, тумачење резултата захтева опрезност јер израчунате вредности могу бити високе код стена богатих  $K$ -фелдспатом без обзира да ли су свеже или подлегле процесу површинског распадања (Fedo et al., 1995);

- Индекс алтерације плагиокласа (PIA), настао модификацијом CIA индекса, упућује на степен деградације плагиокласа (Tunçay and Dengiz, 2016); за свеже стене вредности индекса су око 50, односно близу 100 за минерале глина као што су илит, каолинит и др. (Fedо et al., 1995);
- Индекс продуката временског распадања (PWI) опада са повећавањем степена распадања.
- Сви горе поменути индекси распадања нису апсолутни показатељи одређеног геолошког система, али се сматрају поузданим индикатором површинског распадања (Fedо et al., 1995).

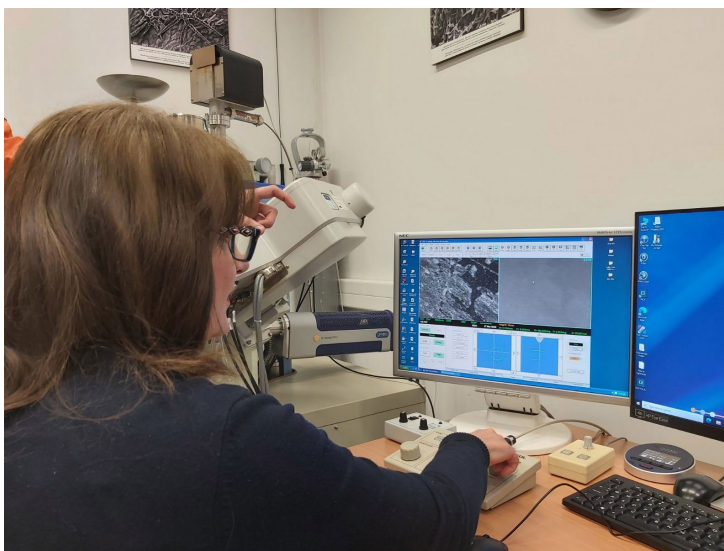
#### 9.3.4. Рендгенска испитивања

Минералне фазе репрезентативних узорака соли (46MS, 64MS и 3L) и узорака површинских кора узетих са објекта Мало степениште (8MS, 9MS и 55MS) су одређене рендгенском дифракцијом праха (XRPD). Фазни састав одабраних узорака одређен је помоћу методе рендгенске дифракције на поликристалном материјалу (праху). Подаци су прикупљени на собној температури на дифрактометру за прах Rigaku SmartLab са Браг-Брентано геометријом. Коришћено је рендгенско зрачење са бакарне аноде. Радни напон на цеви је био 40 kV, док је јачина струје била 30 mA. Узорци су испитани у опсегу  $4-60^\circ 2\theta$ , коришћен је корак од  $0,01^\circ 2\theta$ , а брзина снимања износила је  $20^\circ/\text{min}$  (за узорке 46 и 55),  $5^\circ/\text{min}$  (за узорак 8) и  $2^\circ/\text{min}$  (за узорке 64а и 9). Присутне кристалне фазе идентификоване су упоређивањем добијених положаја дифракционих максимума, односно израчунатих вредности међупљосних растојања  $d$  за све рефлексије  $hkl$  и одговарајућих вредности релативних интензитета  $I/I_{\text{max}}$  са литературним подацима и ICDD (The International Centre for Diffraction Data) стандардима. Добијени подаци обрађени су помоћу програма Rigaku PDXL 2, верзија 2.8.4.0. (Rigaku, 2007), а за идентификацију фаза коришћена је PDF-2 2016 база података (Gates-Rector & Blanton, 2019). Коришћене су картице следећих минерала: минерал из групе плагиокласа (Powder Diffraction File # 01-089-6424), минерал из групе лискуна (00-058-2035), минерал из групе хлорита (00-060-0324), минерал из групе К-фелдспата (01-086-0438), гипс (01-074-7326), минерал из групе пироксена (01-088-0859), тенардит (00-036-0397) и халит (01-075-0306). Како би се утврдило присуство вермикулита или других минерала глине, узорак 9MS је анализиран као оријентисани узорак рендгенском дифракцијом праха и то као нетретиран, након засићења паром етилен гликола и загреван на  $400^\circ\text{C}$  током 1 h.

#### 9.3.5. Скенирајућа електронска микроскопија (SEM-EDS)

Морфологија и хемијски састав минералних фаза присутних у солима и површинским корама керсантита су идентификовани коришћењем скенирајућег електронског микроскопа (SEM) типа JEOL 6610LV који је повезан са енергетско - дисперзивним спектрометром (EDS) у Лабораторији за SEM на Универзитету у Београду - Рударско-геолошком факултету (Сл. 24). Анализирани су узорци соли 1sTM, 3sTM, 5sTM и 6sTM (каменолом Тешића мајдан), 46MS, 55MS, 64aMS, 64bMS (Мало степениште) и 3L (Класна лутрија), узорци површинских кора са објекта Мало степениште 2MS, 4MS, 5MS, 6MS, 8MS, 9MS, 10MS, 11MS, 12MS, 13MS, 14MS (Табела 9). Такође је извршена анализа морфологије различито обрађених површина керсантита (полирани, резани, четкани и штоковани) на узорцима 4TM и 5TM. Морфологија површине керсантита изложеног вишедеценијском временском пропадању са објекта Мало степениште анализирана је на узорку 25MS. У циљу проводности сви испитивани узорци су прекривени угљеником или златом на напаривачу типа BALTEC-SCD-005 уређају за распршивање, а испитивања су вршена у условима високог вакуума са напонским убрзањем зрака од 20 kV.





Слика 24. Скенирајући електронски микроскоп у Лабораторији за SEM на Универзитету у Београду - Рударско-геолошком факултету

### 9.3.6. Испитивања физичких карактеристика

У оквиру испитивања физичких параметара керсантита извршено је одређивање: привидне ( $\rho_b$ ) и стварне запреминске масе ( $\rho_r$ ), отворене ( $P_o$ ) и укупне порозности ( $P_t$ ), упијања воде ( $A_b$ ) и коефицијента капиларне апсорпције воде ( $C$ ). Испитивања су вршена методологијом документованом хармонизованим националним стандардима (SRPS EN). Испитивања физичких својстава су извршена на узорцима: 1TM, 4aTM, 4bTM, 5TM, 8TM, 9TM и 10TM (каменолом Тешића мајдан), узорцима: 24MS, 25MS и 26MS (Мало степениште) и узорцима 5NM – 8NM (Народни музеј). За сва испитивања формирана су опитна тела облика коцке, димензија  $50 \pm 5$  mm (Сл. 25) или неправилног облика у зависности од доступне количине узоркованог материјала.



Слика 25. Изглед опитних тела за лабораторијска испитивања физичких својстава

### 9.3.7. Одређивање привидне и стварне запреминске масе камена, отворене и укупне порозности - SRPS EN 1936:2006

Одређивање **привидне запреминске масе**: узорци осушени до константне масе и измерени ( $M_d$ ) су потопљени у воду. Након  $24 \pm 2$  сата zasiћења мерена је маса узорка потопљеног у води ( $M_h$ ) и површински сувог узорка ( $M_s$ ), а привидна запреминска маса је израчуната према формули:

$$\rho_b = \rho_{rh} \cdot \left( \frac{M_d}{M_s - M_h} \right) \quad (13)$$

$\rho_b$  – привидна запреминска маса узорка ( $Mg/m^3$ );

$\rho_{rh}$  – стварна запреминска маса воде ( $Mg/m^3$ );

$M_d$  – маса узорка осушеног до константне масе (g);

$M_s$  – маса водом засићеног, површински сувог узорка (g);

$M_h$  – маса узорка потопљеног у воду (g).

**Отворена порозност** је однос запремине отворених и међусобно повезаних пора и укупне запремине камена. Стога се она израчунава током мерења привидне запреминске масе применом следеће формуле:

$$P_o = 100 \cdot \left( 1 - \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \right) \quad (14)$$

$P_o$  – отворена порозност камена (%);

$M_d$  – маса узорка осушеног до константне масе (g);

$M_s$  – маса водом засићеног, површински сувог узорка (g);

$M_h$  – маса узорка потопљеног у воду (g).

Одређивање **стварне запреминске масе**: након спрашивања и просејавања уситњеног материјала на сити 0,063 mm издвојено је око 60 g узорка за добијање шест опитних тела (једно опитно тело = 10 g). У пикнометар до пола напуњен дестилованом водом додато је 10 g узорка (Сл. 26а). Лаганим протресањем пикнометра, а потом 30 минутним третманом у ултразвучном купатилу, одстрањени су мехурићи ваздуха. После 24 часа мировања, пикнометри са узорцима су допуњени дестилованом водом до врха и измерена је маса  $M_1$  (Сл. 26б). Последња фаза испитивања је обухватала пражњење и испирање пикнометара, поновно пуњење дестилованом водом до врха и мерење масе пикнометра са водом ( $M_2$ ) (Сл. 26в).



Слика 26. Фазе испитивања стварне запреминске масе: а) пикнометар испуњен дисперзијом; б) пикнометар испуњен дисперзијом након 24 h мировања; в) пикнометар испуњен дестилованом водом

Израчунавање стварне запреминске масе је вршено према следећој формули:

$$\rho_r = \rho_{rh} \cdot \left( \frac{M_e}{M_2 + M_e - M_1} \right) \quad (15)$$

$\rho_r$  – стварна запреминска маса узорка ( $Mg/m^3$ );

$\rho_{rh}$  – стварна запреминска маса воде ( $Mg/m^3$ );

$M_e$  – маса узорка (g);

$M_1$  – маса пикнометра испуњеног дисперзијом (g);

$M_2$  – маса пикнометра испуњеног дестилованом водом (g).

**Укупна порозност** камена се израчунава емпиријски након одређивања привидне и стварне запреминске масе према следећој формули:

$$P_t = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \quad (16)$$

$P_t$  – укупна порозност камена (%);

$\rho_b$  – привидна запреминска маса узорка ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ );

$\rho_r$  – стварна запреминска маса узорка ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ).

Резултати добијени одређивањем привидне запреминске масе и укупне порозности коришћени су за категоризацију камена према наведеним својствима (Табела 7).

Табела 7. Категоризације камена према вредностима привидне запреминске масе и укупне порозности (Bilbija i Matović, 2009)

Категоризација камена према вредностима запреминске масе			Категоризација камена према укупној запремини пора	
Група	Категорија	$\rho_b$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Категорија камена	$P_t$ (%)
Веома ниске	изразито лаган	мање од 1,0	Компактан	<1
Ниске	лаган	1,0 – 1,5	Мало порозан	1 – 2,5
Средње	средње тежак	1,5 – 2,5	Умерено порозан	2,5 – 5
Високе	тежак	2,5 – 3,0	Знатно порозан	5 – 10
Веома високе	веома тежак	већа од 3,0	Веома порозан	10 – 20
			Екстремно порозан	>20

### 9.3.8. Одређивање упијања воде камена при атмосферском притиску – метода имерзије - SRPS EN 13755:2009

Након сушења опитних тела до константне масе ( $M_d$ ) иста су постављена у контејнер на одстојању од најмање 15 mm од суседног узорка. Имерзија узорка је вршена у више фаза: додавањем воде до половине висине узорка ( $t_0$ ) (Сл. 27); додавањем воде до  $\frac{3}{4}$  висине узорка након 60 минута; потпуно потапање узорка у воду након додатних 60 минута. Након 48 h узорци су мерени и поново враћани у воду. Комплетно zasiћење је постигнуто после 72 h од почетног времена ( $t_0$ ) и тада је мерена достигнута константна маса ( $M_s$ ).



Слика 27. Испитивање упијања воде узорка керсантита

Испитивање је вршено на шест опитних тела и упијање воде је изражено као средња вредност израчуната на основу формуле:

$$A_b = 100 \cdot \left(\frac{M_s - M_d}{M_d}\right) [\%] \quad (17)$$

$A_b$  – упијање воде камена при атмосферском притиску (%);

$M_s$  – маса водом засићеног узорка (g);

$M_d$  – маса сувог узорка (g).

Табела 8. Класификација камена према упијању воде (Вилбија и Матовић, 2009)

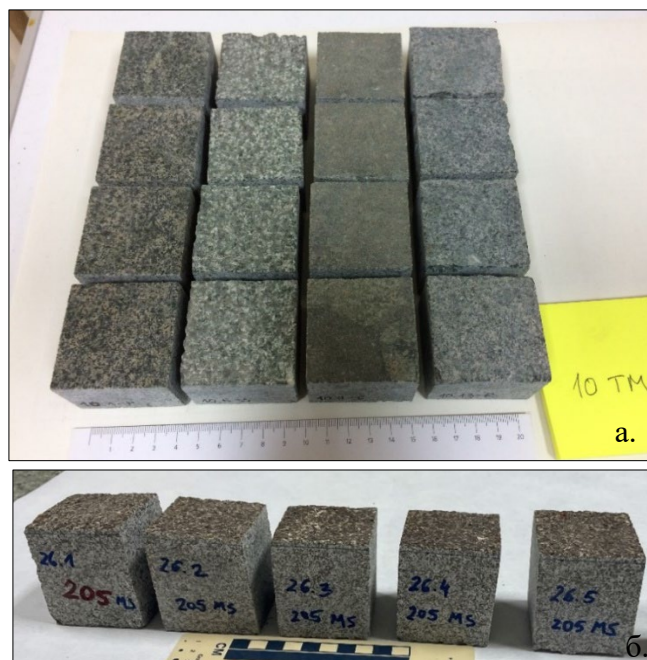
Класификација камена према упијању воде	
Категорија	A <sub>b</sub> (% масе)
Врло мало	мање од 0,5
Мало	0,5 – 1,0
Умерено	1,0 – 2,5
Осетно	2,5 – 5,0
Велико	5,0 – 15,0
Врло велико	15,0 – 30,0
Изузетно велико	веће од 30,0

### 9.3.9. Одређивање капиларног упијања воде камена - SRPS EN 1925:2009

Испитивање капиларног упијања воде рађено је на узорцима керсантита из каменолома (1ТМ, 4аТМ, 4бТМ, 5ТМ, 8ТМ, 9ТМ, 10ТМ). Од узорака су формирана опитна тела облика коцке 50 ± 5 mm на којима је по једна видна површина обрађена различитим типовима површинске обраде камена – полирањем, штоковањем, резањем и четкањем (Сл. 28а). Обрађена површина је истовремено била контактна површина са водом приликом извођења опита мерења капиларног упијања воде.

Осим поменутих узорака испитивање је извршено и на површински деградираним узорцима/опитним телима са Малог степеништа чије су контактне површине оригинално обрађене штоковањем (узорци 24 MS, 25 MS и 26 MS) (Сл. 28б).

Коефицијент капиларне апсорпције воде (С) представља однос масе апсорбоване воде по јединици површине у квадратном корену времена. Испитивање се одвија кроз фазе (Сл. 29): опитна тела са прецизно измереним димензијама контактних површина се суше до константне масе ( $m_d$ ) и постављају у посуду на ослонце тако да су контактном површином урођени у воду до висине од 3±1 mm.



Слика 28. Изглед опитних тела са различито обрађеним контактним површинама; а) изглед опитних тела узорка 10ТМ; б) изглед опитних тела узорка 26MS са оригиналном штокованом површином

Варирање масе опитних тела ( $m_i$ ) се мери у временским интервалима од 5, 10, 15, 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 и 4320 минута.



Коефицијент капиларног упијања воде (C) је израчунат према следећој формули:

$$C = \frac{m_i - m_d}{A\sqrt{t_i}} \quad (18)$$

$m_d$  – маса сувог узорка (g);

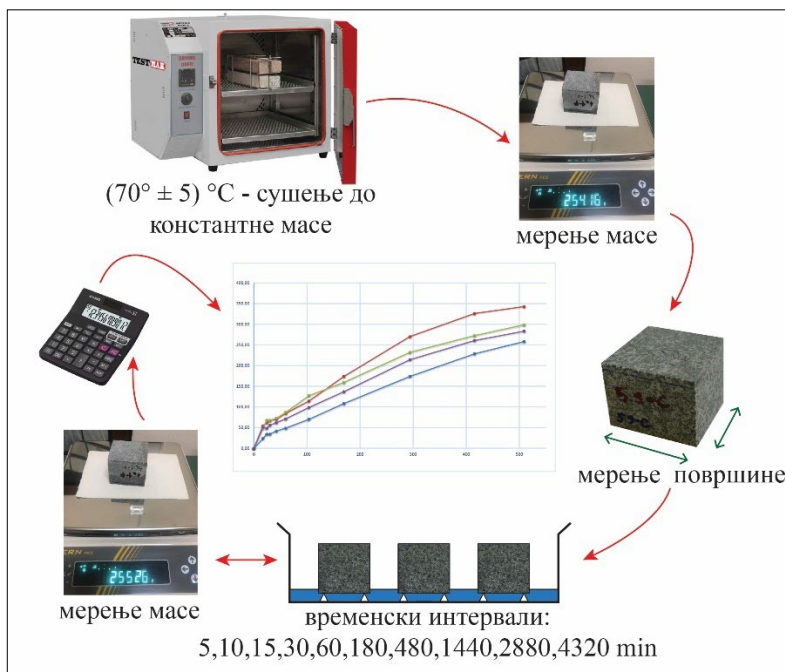
$m_i$  – узастановне масе узорка током тестирања (g);

$m_{24}$  – маса узорка у интервалу 24 h (g);

A – површина стране узорка уроњеног у воду ( $m^2$ );

$t_i$  – време протекло од почетка теста до момента мерења узастановних маса  $m_i$  (s);

C – коефицијент капиларног упијања воде ( $g/m^2t^{0,5}$ ).



Слика 29. Шема испитивања капиларног упијања воде (модификовано *Çelik and Sert, 2021*)

Осим квантитативног изражавања резултата капиларног упијања воде кроз коефицијент C, резултати су у раду приказани и графички – кривама капиларног упијања добијеним као функција односа промене масе опитног тела у задатом времену.

На основу резултата коефицијента капиларног упијања воде извршена је категоризација керсантита (Табела 9).

Табела 9. Класификација камена према коефицијенту капиларног упијања воде (*Snethlage, 2005*)

C ( $kg/m^2h^{0,5}$ )	Категорија
<0,5	Слаба апсорпција
0,5-3,0	Умерена апсорпција
>3,0	Висока апсорпција



Сумарни приказ свих испитиваних узорака и примењених метода испитивања приказан је у Табели 10.

Табела 10. Табеларни приказ извршених анализа на узорцима

узорак	Врста анализа									
	Оптика	XRF и LA-ICP-MS	XRD	SEM-EDS	$\rho_b$	$\rho_r$	$P_o$	$P_t$	$A_b$	C
1 TM										
2 TM										
3 TM										
4 TM										
5 TM										
6 TM										
7 TM										
8 TM										
9 TM										
10 TM										
11 TM										
1sTM, 3sTM, 5sTM, 6sTM										
1 MS										
2 MS										
3 MS										
4 MS										
5 MS										
6 MS										
7 MS										
8 MS										
9 MS										
10 MS										
11 MS										
12 MS										
13 MS										
14 MS										
15 MS										
16 MS										
17 MS										
18 MS										
19 MS										
20 MS										
21 MS										
22 MS										
23 MS										
24 MS, 25 MS, 26 MS										
46, 55, 64a, 64b MS										
1L										
2L										
3L										
5 NM										
6 NM										
7 NM										
8 NM										

Ознака: TM – каменолом; MS – Мало степениште; L – Класна лутрија; NM – Народни музеј

Узорци из каменолома	Узорци соли	Урађена анализа
----------------------	-------------	-----------------

XRPD – рендгенска дифракција праха  
SEM-EDS – скенирајућа електронска микроскопија са енергетско - дисперзивном спектрометријом  
XRF- рендгенска флуоресцентна спектрометрија  
LA-ICP-MS – метода масене спектрометрије индуковане спрегнутом плазмом са ласерском аблацијом

$\rho_b$  – привидна запреминска маса  
 $\rho_r$  – стварна запреминска маса  
 $P_o$  – отворена порозност  
 $P_t$  – укупна порозност  
 $A_b$  – упијање воде при атмосферском притиску  
C – капиларно упијање воде

## 10. МОРФОЛОШКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА КЕРСАНТИТА У КАМЕНОЛОМУ

Стенска маса керсантиа Тешића мајдана, изложена вишедеценијском агресивном деловању атмосферилија, подлеже физичко-хемијским процесима површинског распадања који резултирају морфолошки различитим формама деградације. Као најистакнутији резултат деловања тих процеса јесте зона површинског распадања развијена у кровини стенске масе укупне дебљине око 5 m. У овој зони распадања керсантит је бројним пукотинама фрагментиран, а боја стене је од маркантно зелене прешла у жутобраон до смеђу боју као резултат интензивних процеса хемијског распадања.

На откривеним површинама компактног дела стенске масе керсантиа у Тешића мајдану (Сл.30а), извршена је визуелна опсервација форми површинског распадања присутних на откривеним вертикалним и косим површинама стенске масе. Форме распадања су регистроване у складу са Фицнеровом номенклатуром (Fitzner, Heinrichs and Kownatzki 1995), без нотирања интензитета, у сврху корелисања са формама распадања исте стене уграђене у објекте културног наслеђа.

На површинама керсантиа регистроване су све четири групе форми распадања: губитак каменог материјала, деколорација/наслаге, одвајање и пукотине.

**Губитак каменог материјала** манифестује се у форми иверастог до комадастог распадања (Сл. 30в) и дубинског распадања („слојевитог“ одвајања) као последица одвајања кора и љуски различитих димензија и дебљине (Сл. 30б).



Слика 30. а) Тешића мајдан, општи изглед са положајем регистрованих форми прве групе распадања; б) губитак каменог материјала; в) иверасто до комадасто распадање



Друга група оштећења, **деколорација и наслаге**, представља најзаступљеније форме на видним површинама стенске масе. Манифестују се у виду: обојења, задрљаности честицама атмосфере, исољавањем, као и присуством тамних, светлих и обојених кора. Декolorација се испољава хроматском променом примарне зелене боје стене у жутобраон до смеђу или тамносиву боју (Сл. 31). Тамносива, скоро црна тракаста хроматска промена површине керсантита, карактеристична за вертикалне и стрме одсеке, смеђује се са тракама које у великој мери задржавају оригиналну боју керсантита, а које су последица кретања (сливања) атмосферске воде (Сл. 30а и 33). Жутобраон и окерасте површине су много чешће и присутне су готово на већини хоризонталних или вертикалних површина заштићених од директног деловања атмосферске воде. Оне изазивају јак хроматски ефекат и контраст у односу на зелено сиву боју свеже стене (Сл. 31а), а њихов интензитет боје зависи од степена заклоњености површине стенске масе. У централном ка јужном делу стенске масе присутне су тамне наслаге (Сл. 31г) настале као последица спирања околног земљишта као и појава биолошке колонизације (Сл. 31б). Она је присутна у виду развоја виших, жбунастих биљака у пукотинским системима ободних и централних делова каменолома (Сл. 30а). Локално се на косим површинама стенске масе уочава и развој нижих биљака, лишјајева и маховине (Сл. 31б).

Појава соли карактеристична је за заштићене површине керсантита у северном делу каменолома. Морфологија депонованих наслага соли варира од белих наслага, до наслага жутобраон боје као последице пигментисања оксидима гвожђа. Наслаге соли се јављају у виду ефлоресценције и субефлоресценције. Док је ефлоресценција јасно маркирана белим „паучинастим“, слабо везаним наслагама соли депонованим по површини керсантита, или компактним бубрежастим агрегатима (Сл. 31в, г), субефлоресценција је присутна у зонама интензивног одвајања површинских делова керсантита.



Слика 31. Декolorација/наслаге: а) површинска декolorација и боја свеже стене; б) биолошка колонизација (лишјајеви, маховине и више коренасте биљке; в) наслаге соли и светле коре са појавом одвајања и љуспања – различита дебљина, боја и компактност наслага; г) морфологија депоновања соли – светле, обојене и тамне површине, депоновање у зони пукотина

Трећа група форми распадања у каменолому је заступљена у облицима: **зрнасте дезинтеграције, љуспања, љускања и одвајања светлих, тамних и обојених кора**. Љуспање се јавља на површинама на којима долази до почетка одвајања кора и наслага соли (Сл. 32а). Зрнаста дезинтеграција јавља се на местима већ постојећих оштећења, пукотина,



одвојених кора (Сл. 32б, г). Љуске могу бити различите дебљине и услед њиховог одвајања долази до већег губитка површинских алтерисаних слојева стене (Сл. 32в).



Слика 32. Форме треће групе распадања; а) вишеструко љуспање; б) одвајање обојених кора; в) љускање; г) одвајање светлих кора и љуспање

**Пукотине** (сингенетског и епигентског порекла) узрокују фрагментирање стенске масе у блокове различитих димензија или доводе до потпуног одвајања и губитка стенског материјала (Сл. 33). Јављају се у виду пукотина метарских димензија пружања са зјапом mm-cm димензија или у виду локалних пукотина и прслина cm-dm димензија.



Слика 33. Паралелне пукотине које доводе до одвајања стенске масе



## 11. ФОРМЕ ВРЕМЕНСКОГ ПРОПАДАЊА КЕРСАНТИТА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ

Мапирање оштећења на Малом степеништу обухватило је видљиве површине 436 блокова камена. Стање је снимљено пре радова 2018. године, а допуњено након откопавања. Регистрована оштећења су класификована у четири главне групе форми распадања:

1. Губитак каменог материјала,
2. Деколорација/наслаге-инкрустације,
3. Одвајање каменог материјала,
4. Пукотине/деформације.



Слика 34. Различити облици оштећења уочени на елементима од керсантита: а) дубинско распадање праћено љуспањем и зрнастом дезинтеграцијом; б) рељефно заобљавање профилисаних делова оградe и комадасто распадање степеница; в) патина богата гвожђем на рукохватима; г) заобљене ивице степеница и одвајање црне коре састављене од прашице, гипса, угљеника (порозних) и олова (компактних) сфероидних честица; д) интензивно љуспање површине камена; е) приказ дубине затрпане зоне са наслагама соли на граници и очуваним профилима у доњем делу и оригиналном штокованом примарном површином (ОШП); ж) камене елементи обложени слојевима асфалта; з) контактна зона (означена солима) између уклопљених делова каменних блокова и делова изложених атмосферским утицајима; и) ефлоресценција (исољавање) на оштећеној каменој површини; ј) остатак површинске коре и браонкасте коре обогаћене гвожђем



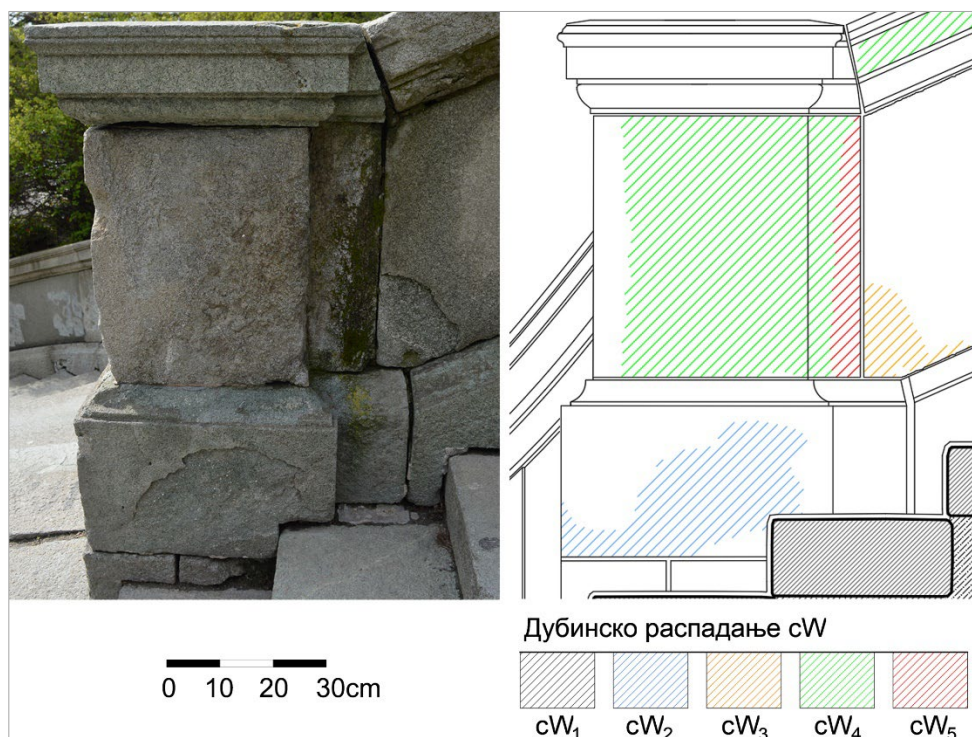
Мапирање је указало да се на свим блоковима керсантита појављује истовремено више форми распадања. Неке од њих, делујући удружено, довеле су до високог степена деградације и оштећења која захтевају хитне мере у рестаураторским поступцима. Специфична ситуација у којој је један део објекта био затрпан (Сл. 34е, ж) резултирала је бољом очуванашћу површина које су се налазиле испод нивоа терена (Сл. 34ђ), што је такође регистровано методом мапирања.

## 11.1. ГЛАВНЕ ГРУПЕ ФОРМИ РАСПАДАЊА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ

### 11.1.1. Губитак каменог материјала

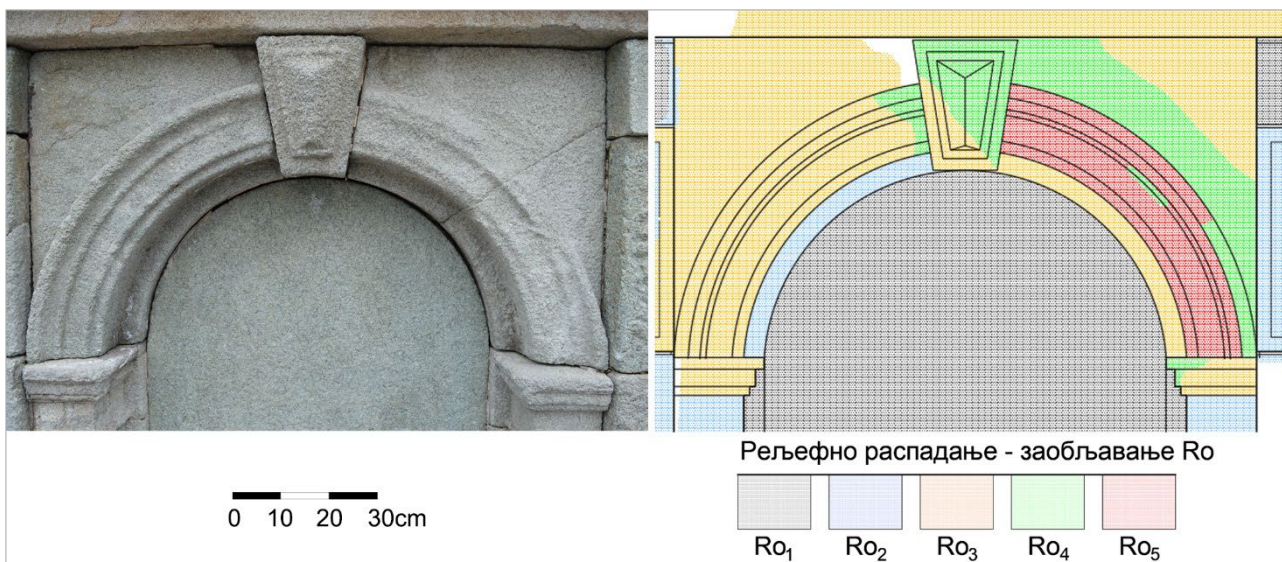
У првој групи - губитак каменог материјала, доминантне форме су дубинско распадање (сW) на деловима оградe степеништа и рукохватима, рељефно распадање у виду заобљавања (Ro) свих ивица на профилисаним елементима базе оградe и храпављење (Rr) које се доминантно јавља на степеницима, као и комадасто распадање услед конструкционих/статичких фактора (bO), непрепознатљивих узрока (oO), антропогених (aO) и природних фактора (nO) (симболи форми оштећења – Табела 5).

**Дубинско распадање** јавља се на местима где долази до губитка површинске коре-љуске. На Малом степеништу које највећим делом карактерише површинска обрада штоковањем, појава дубинског распадања је уочљива на великом броју камених елемената. Интензитет распадања је различит и креће се од cW1-5 (Сл. 35, Сл. 38а-в). Распадање неких елемената досеже дубину до 10 cm, што резултује комплетним губитком облика каменог блока (Сл. 34а). Скоро све штоковане вертикалне површине које су изложене атмосферским утицајима карактерише висок интензитет пропадања, одсуство трагова оригиналне обраде или ретко очуване зоне (Сл. 34б-д). Дубинско распадање стога представља један од најкарактеристичнијих облика пропадања на овом споменику и дефинише његов данашњи изглед.



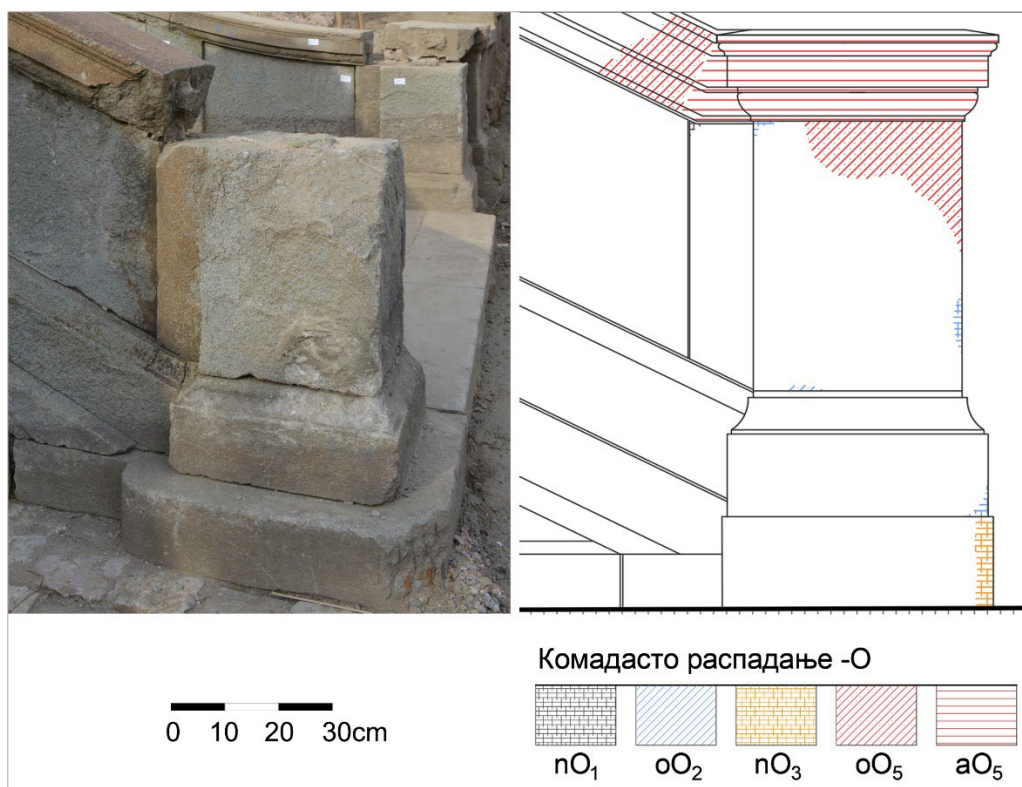
Слика 35. Дубинско распадање: фотографија и графички приказ мапирања

**Рељефно распадање** јавља се у виду заобљавања ивица или у виду храпавости површине (Сл. 36). Јавља се у распону интензитета од Ro-Rr1-5 (Сл. 38а-в). Заобљавање је карактеристично на свим ивицама бази степеника као и на профилисаним деловима руковата и елемената базе оградe. Храпавост је карактеристична за хоризонталне површине подеста и степеника и за профилисане елементе.



Слика 36. Релјефно распадање: фотографија и графички приказ мапирања

**Комадасто распадање** је регистровано на елементима рукохвата (cm димензије) и у виду недостатка целих делова степеника у скали од неколико десетина dm (Сл. 34б, Сл. 38а-г). Комадасто распадање као последица конструкционих фактора карактеристично је за газиста која су била постављена директно на терену без одговарајућих конструктивних потпорних елемената. Услед спирања терена долазило је до њиховог измештања са оригиналних позиција и појаве клизања што је условило појаву напрснућа и одвајање читавих комада. За нека комадаста оштећења на деловима степеништа није могуће поуздано утврдити узрок настанка појаве. Антропогени фактори који су довели до комадастог распадања односе се на последице ратних дејстава (ударе гелера) али и на одношење појединих делова степеништа као што је капа на стубу (Сл. 37).



Слика 37. Комадасто распадање: фотографија и графички приказ мапирања



Природни фактори који су доводили до појаве комадастих оштећења везују се за неправилности у морфологији терена које су довеле до одвајања и губитка делова камених блокова.

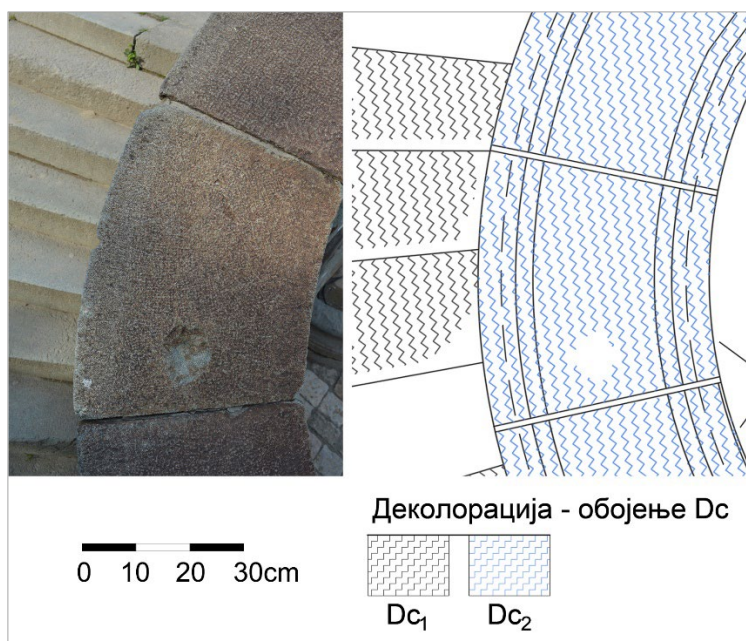


Слика 38. Прва група оштећења-губитак каменог материјала: а) дубинско распадање у различитим интензитетима, рељефно и комадасто распадање на примеру оградe и степеништа; б) пример дубинског и комадастог распадања на стубу и рељефног распадања на бази оградe; в) примери различитих типова распадања на степеницима; г) различите индивидуалне форме комадастог распадања (услед непрепознатљивих и услед антропогених фактора)

### 11.1.2. Деколорација/наслаге-инкрустације

Другу групу оштећења чине деколорација у виду обојења-хроматске промене боје (Dc), запрљаност пре свега честицама атмосфере (pI), наслаге соли у виду исољавања на површини камена (Ee), биолошка колонизација нижим (Vi) и вишим биљкама (Vh), присуство тамних (dkC) и обојених (fkC) кора као и комбинације индивидуалних форми распадања у виду прелазног облика између обојености и тамне коре која прати морфологију камена (Dc-dkC) и прелазног облика између обојености и обојене коре која прати морфологију камена (Dc-fkC).

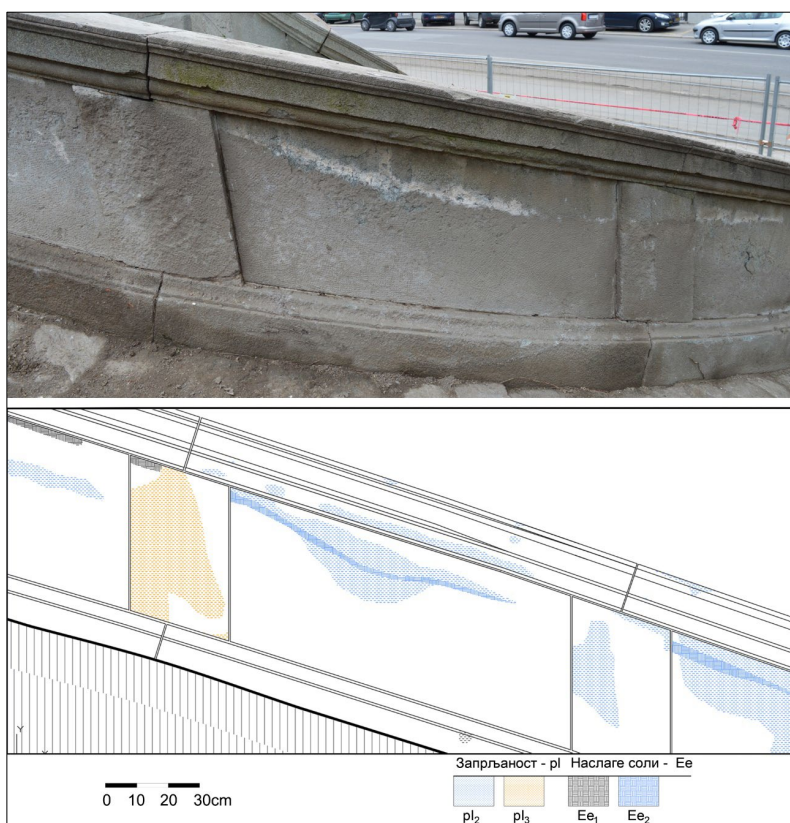
**Деколорација** у виду **обојења** представља најчешћу форму деградације друге групе. Она је у Илустрованом појмовнику форми распадања камена ИКОМОС-овог међународног научног комитета за камен названа патина обогаћена гвожђем. Доминантан облик је обојење-хроматска промена примарне боје од сиво-зелене до браон-црвене или појава патине богате гвожђем до зарђале коре која прати морфологију камена и јавља се на свим површинама рукохвата централног дела споменика (Сл. 34в, Сл. 39, Сл. 43а) и на вертикалним површинама камених елемената (Сл. 34ј).



Слика 39. Деколорација/обојење: фотографија и графички приказ мапирања

**Запрљаност** честицама атмосфере јавља се на свим изложеним површинама, посебно на деловима степеништа који су заклоњени од спирања кишом (Сл. 43б) и онима који се налазе непосредно уз земљани насип (Сл. 40), као што су делови ограде уз улицу. На њима долази и до стварања наслага земље као последица спирања терена.

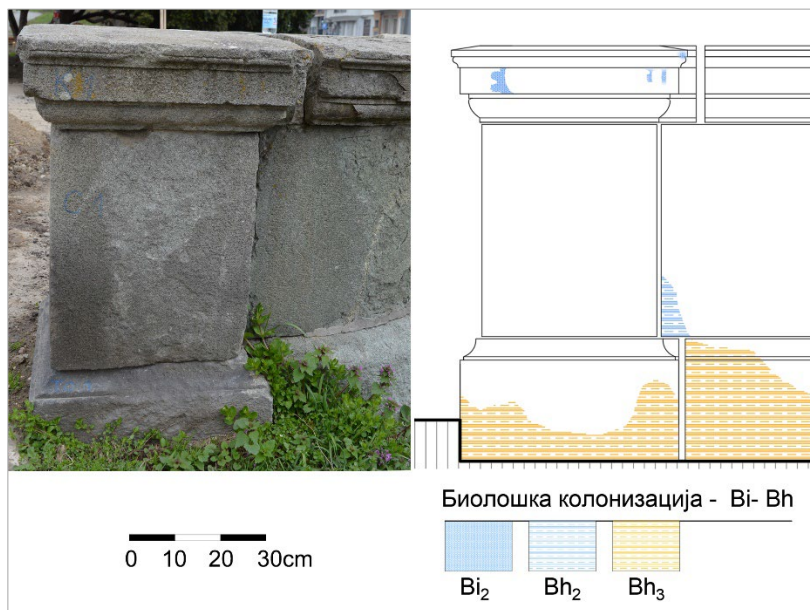
**Насlage соли** су регистроване на површинама камених блокова који се налазе у интензивној фази деградације (Сл. 34з, Сл. 43б) и онима који су били делимично затрпани (Сл. 15), док је појава соли испод површине камена регистрована на унутрашњој страни кора или љуски након њиховог одвајања (узорак MS 8, Сл. 34ј).



Слика 40. Запрљаност и насlage соли: фотографија и графички приказ мапирања

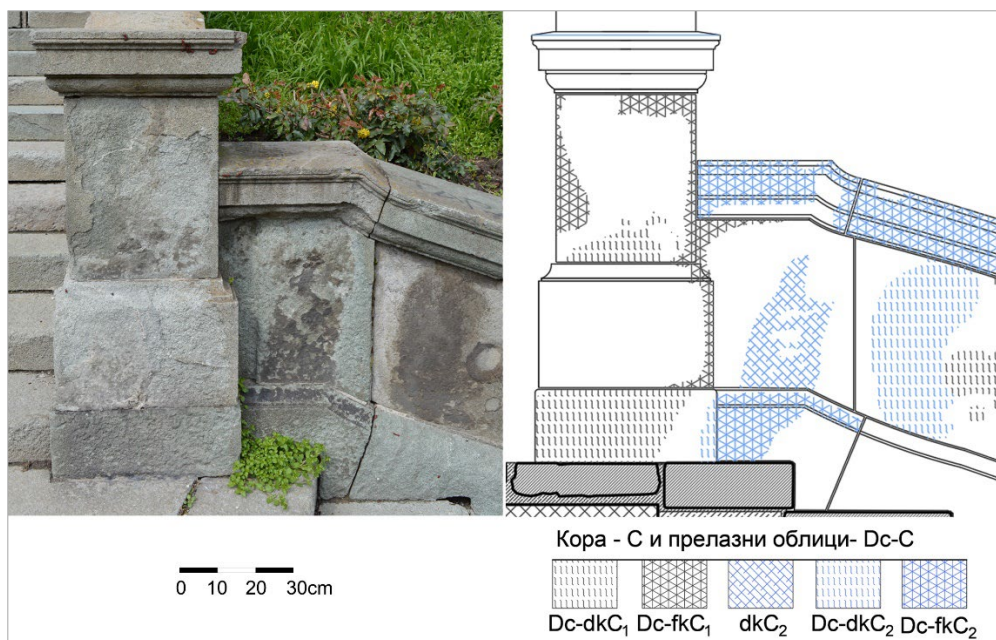


**Биолошка колонизација** присутна је у виду колонизације нижим биљкама (Сл. 43д) и колонизације вишим биљкама (Сл. 41). Колонизација вишим биљкама јавља се у просторима деградираних спојница између камених елемената (Сл. 43е). На неким деловима ограде због снаге раста корена дошло је до физичког померања блокова (Сл. 43ђ).



Слика 41. Биолошка колонизација: фотографија и графички приказ мапирања

**Коре** се на Малом степеништу јављају у виду **тамних кора** (Сл. 42, 43в) које прате морфологију камена и **обојених кора** које прате морфологију камена. Тамне коре су створане таложењем нечистоћа и атмосферског загађења на површини камена. Јављају се у облику слабо везаних наслага или компактних до набубрелих црних кора, због присуства порозних угљеничних или компактних оловних честица (Сл. 34г). Њихова адхезија са подлогом варира од веома причвршћених до набубрелих које су склоне одвајању.



Слика 42. Коре: фотографија и графички приказ мапирања

У другој групи оштећења јављају се и комбинације индивидуалних форми распадања, и то прелазни облик између обојености и тамне коре (Dc-dkC) и прелазни облик између обојености и обојене коре (Dc-fkC) (Сл. 42, Сл. 43г).





Слика 43. Друга група оштећења-деколорација/наслаге: а) обојење на горњој површини рукохвата; б) исољавање и запрљаност; в) тамна кора; г) прелазни облик између обојености и обојене коре; д) биолошка колонизација нижим биљкама; њ) биолошка колонизација вишим биљкама, корен који расте у спојници; е) биолошка колонизација вишим биљкама на степеништу

### 11.1.3. Одвајање каменог материјала

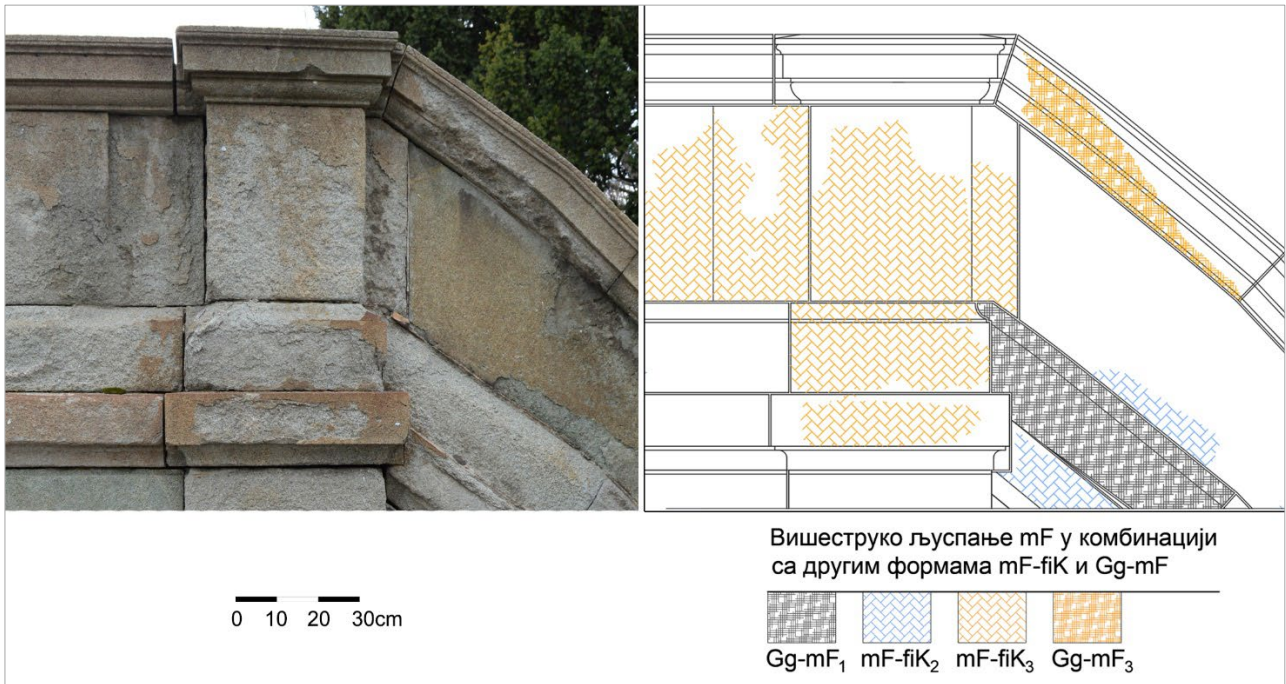
Најчешћи облици треће групе оштећења су зрнаста дезинтеграција (Gg), љуспање (појединачне љуспе (eF) и вишеструко љуспање (mF)), љускање као последица обраде штоковањем (qS) (Сл. 34а, б, д, и). Други присутни облици су одвајања тамне (diK) или обојене (fiK) коре са материјалом камена као и комбиновани облици индивидуалних форми распадања: зрнаста дезинтеграција у грус и одвајање тамне коре (Gg-diK), зрнаста дезинтеграција у грус и одвајање обојене коре (Gg-fiK), вишеструко љуспање и одвајање тамне коре (mF-diK), вишеструко љуспање и одвајање обојене коре (mF-fiK) и комбинација зрнасте дезинтеграције и вишеструког љуспања (Gg-mF). Сви поменути облици углавном прате дубинско и рељефно распадање као и све површине са одвојеном кором. Јављају се у различитим интензитетима на свим вертикалним површинама камених блокова и на горњим површинама рукохвата.

**Зрнаста дезинтеграција** се јавља као пратећа последица прве групе распадања, најчешће на местима дубинског распадања (Сл. 48а). Приликом деградационог процеса долази до одвајања некомпактних зрна и значајног губитка каменог материјала (Сл. 44). Интензитет се карактерише као низак, средњи и висок од Gg<sub>1-3</sub>.



Слика 44. Зрнаста дезинтеgrација: фотографија и графички приказ мапирања

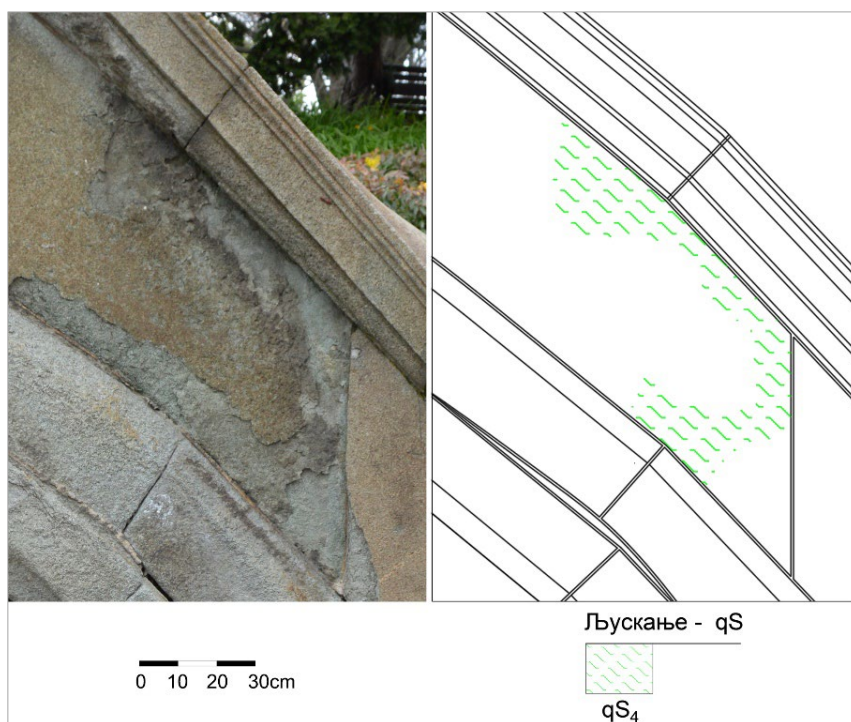
**Љуспање** се ређе јавља у виду појединачних ситних љуспи, а чешће у облику вишеструког љуспања (Сл. 45, Сл. 48в). Јавља се као пратећи облик дубинског распадања до интензитета F<sub>1-3</sub>.



Слика 45. Љуспање: фотографија и графички приказ мапирања

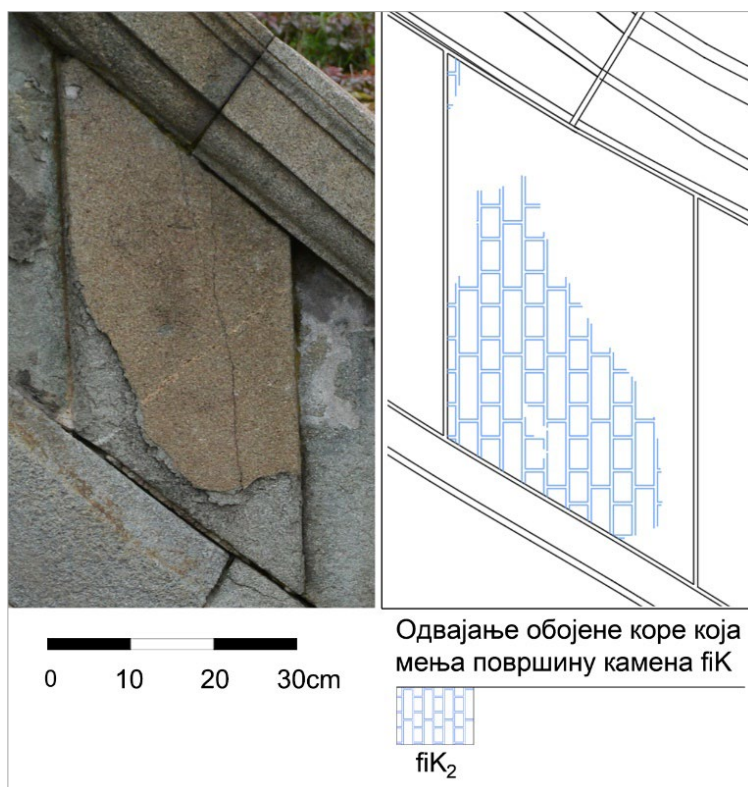
**Љускање** представља одвајање већих плочастих камених делова паралелно површини камена. На Малом степеништу јавља се као последица површинске обраде штоковањем. Присутно је на многим вертикалним (Сл. 46) и неким косим и хоризонталним површинама (Сл. 48б). Интензитет је одређен дебелином љуске у cm скали у распону од qS<sub>1-5</sub> (Табела 5), где је 1 < 0,1 cm, 2 од 0,1-0,3 cm, 3 од 0,3-0,5 cm, 4 од 0,5-1,5 cm и 5 > 1,5 cm.



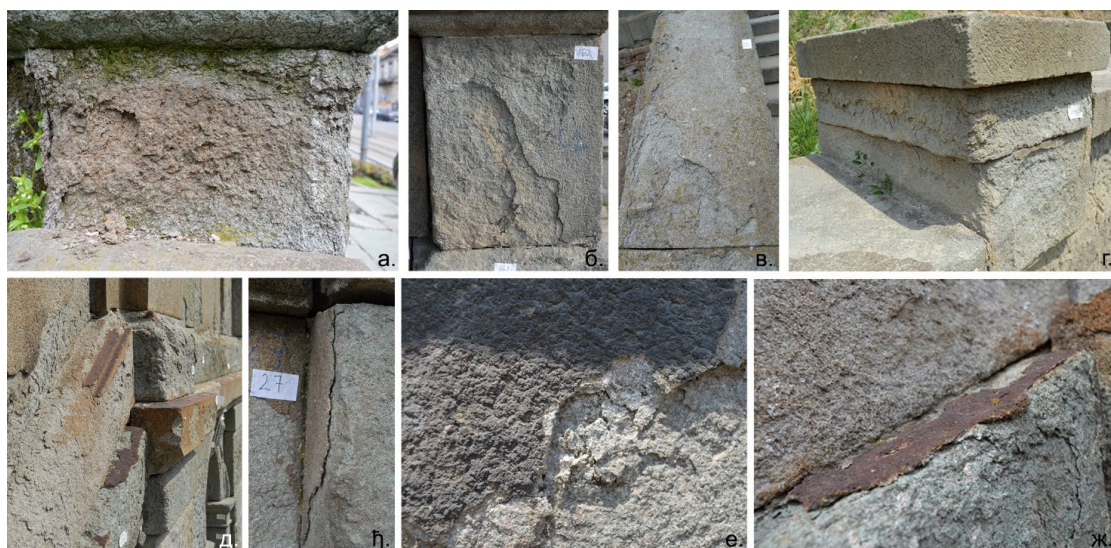


Слика 46. Лускање: фотографија и графички приказ мапирања

**Одвајање коре** са каменом материјалом јавља се и на позицијама на којима је формирана тамна и обојена кора (Сл. 47, Сл. 48ђ). Видљива је на ободним зонама на којима је претходно дошло до потпуног губитка делова коре. Интензитет је дефинисан као низак, средњи и висок у зависности од процентуалне заступљености захваћене површине у односу на укупну видљиву површину блока, па је  $K_1$  низак степен до 10%,  $K_2$  средњи степен од 10-50%, и  $K_3$  висок степен преко 50% површине.



Слика 47. Дубинско распадање: фотографија и графички приказ мапирања

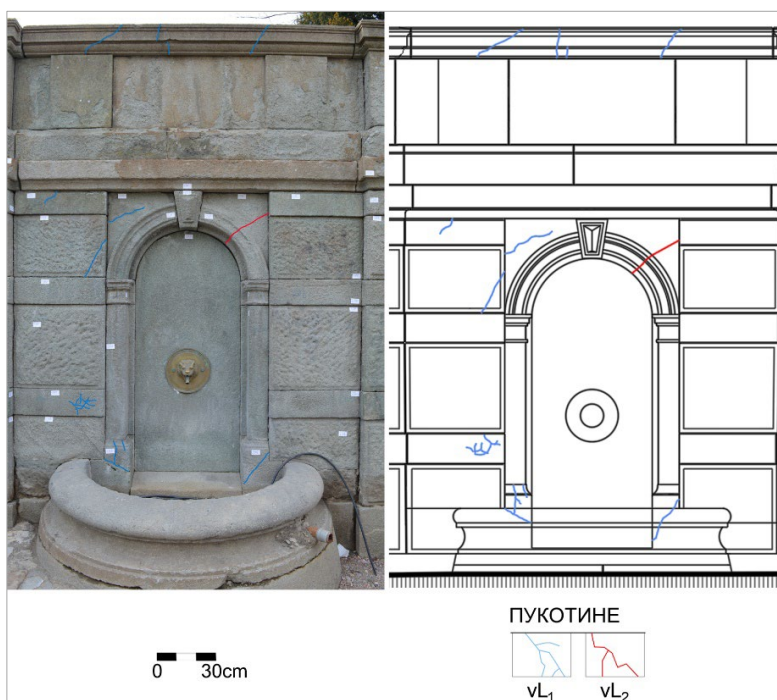


Слика 48. Трећа група оштећења-одвајање каменог материјала: а) зрнаста дезинтеграција; б) љускање на вертикалној површини стуба; в) љускање на рукохвату; г) пример вишеструког љускања и зрнасте дезинтеграције; д) вишеструко љускање, одвајање обојене коре; е) одвајање обојене коре на вертикалној површини елемента; е) комбинација вишеструког љускања и одвајања тамне коре; ж) комбинација вишеструког љускања и одвајања обојене коре

Карактеристика треће групе оштећења керсантиа на објекту Мало степениште су **комбинације индивидуалних форми распадања** присутне на каменим блоковима. Удружено се појављује зрнаста дезинтеграција, љускање и одвајање коре (Сл. 48г, д, е, ж). Интензитет комбинованих форми је окарактерисан као низак, средњи и висок у зависности од процентуалне заступљености површине те је низак степен до 10%, средњи степен од 10-50% и висок степен преко 50% површине.

#### 11.1.4. Пукотине

**Пукотине** су регистроване на рукохватима (Сл. 50б), покривним капама (Сл. 50г) и степеницима, где њихово присуство доводи до прекида целовитости блока. Јављају се и на блоковима који учествују у грађењу прочеља са чесмом (Сл. 49, Сл. 50в) и на кориту чесме (Сл. 50а) из конструктивних разлога.



Слика 49. Пукотине: фотографија и графички приказ мапирања





Слика 50. Четврта група оштећења-пукотине: а) мрежа пукотина на бази корита; б) пукотина на рукохвату; в) дијагонална пукотина на блоку у централном фронту са чесмом; г) пукотина целог блока покривне капе

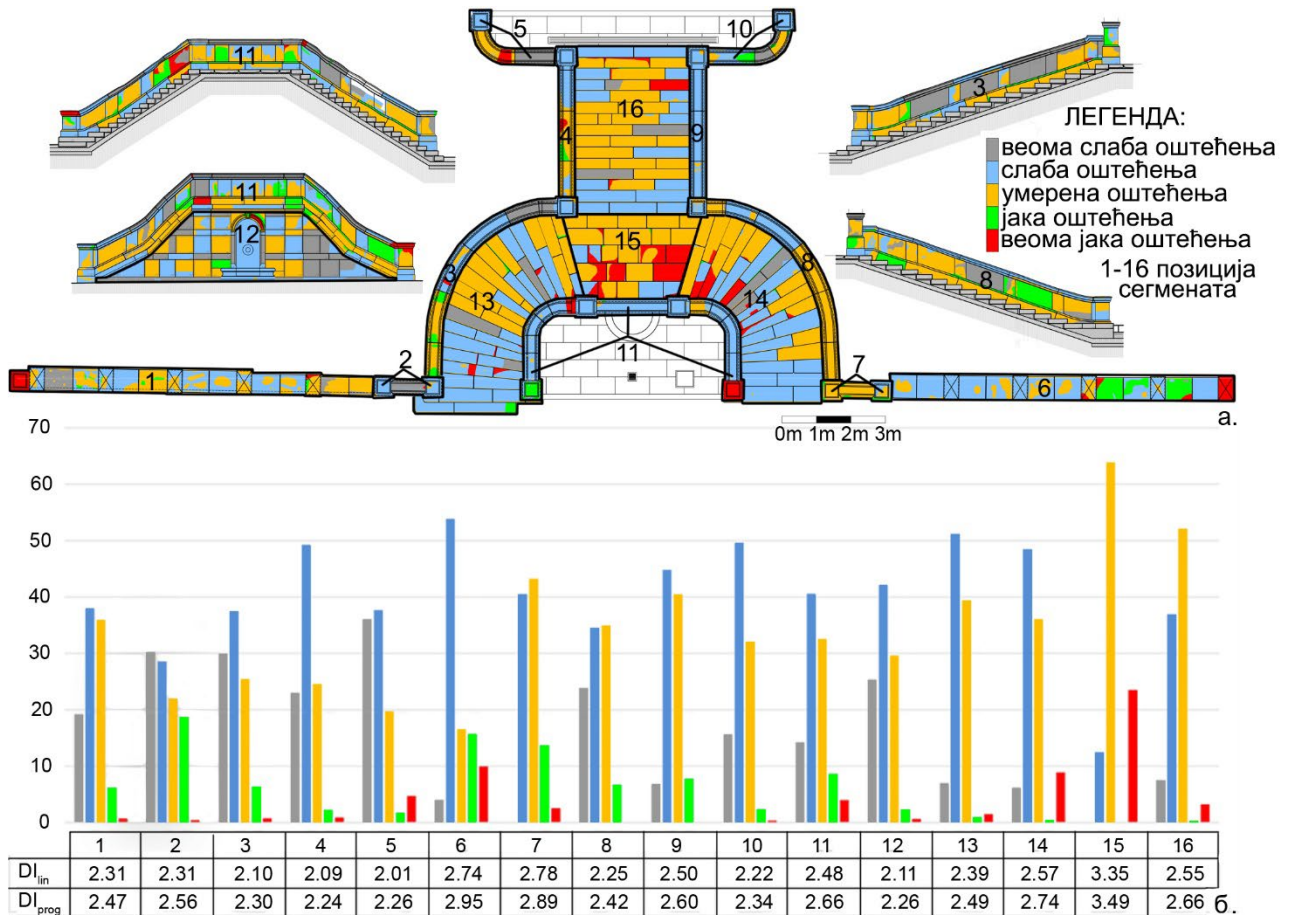
## 11.2. СТАЊЕ КАМЕНИХ БЛОКОВА КЕРСАНТИТА ИСПОД ЗЕМЉЕ

Приликом мапирања форми деградације на каменим елементима које је извршено након уклањања земљаног насипа дебљине око 70 cm и асфалтног слоја у зони тротоара, регистровано је да су делови степеништа који су били под земљом значајно боље очувани и да у току мапирања нису регистровани интензивни облици оштећења (Сл. 34е, ж). Вертикални камени елементи оградe са интензивно деградираном видљивом површином (изложеном атмосферским падавинама), редовно имају потпуно очуване наспрамне површине које су биле прекривене земљом. На таквим површинама су регистроване неоштећене профилисане ивице и трагови штоковања-површинске обраде чекићем (Сл. 34ђ–ж). Границу између дела каменог блока испод земље и дела изложеног атмосфери, по правилу обележава разлика у боји стене (Сл. 34е, ж) или наслагe соли (пример гипса у узорку 46MS, Сл. 34д). Површине камених елемената, откривене након скидања асфалтног слоја, такође су значајно очуване, али је уочена зависност степена очуваности у односу на дубину затрпавања (Сл. 34е, ж). Фотографије показују да нагиб терена условљава дубину облагања камених блокова максимално око 60 cm у зони угаоног стуба. Делови камених блокова који су били најдубље под земљом сачували су оригиналне карактеристике (ивице, површинску обраду). Крећући се ка плићим зонама, уочена је деградација површине у виду љускања и љуспања (зона која је била прекривена мешавином шљунка и асфалта). Изложена зона камена је без очуване завршне површине, у фази интензивног зрнастог распадања и вишеструког љуспања (Сл. 34ж).

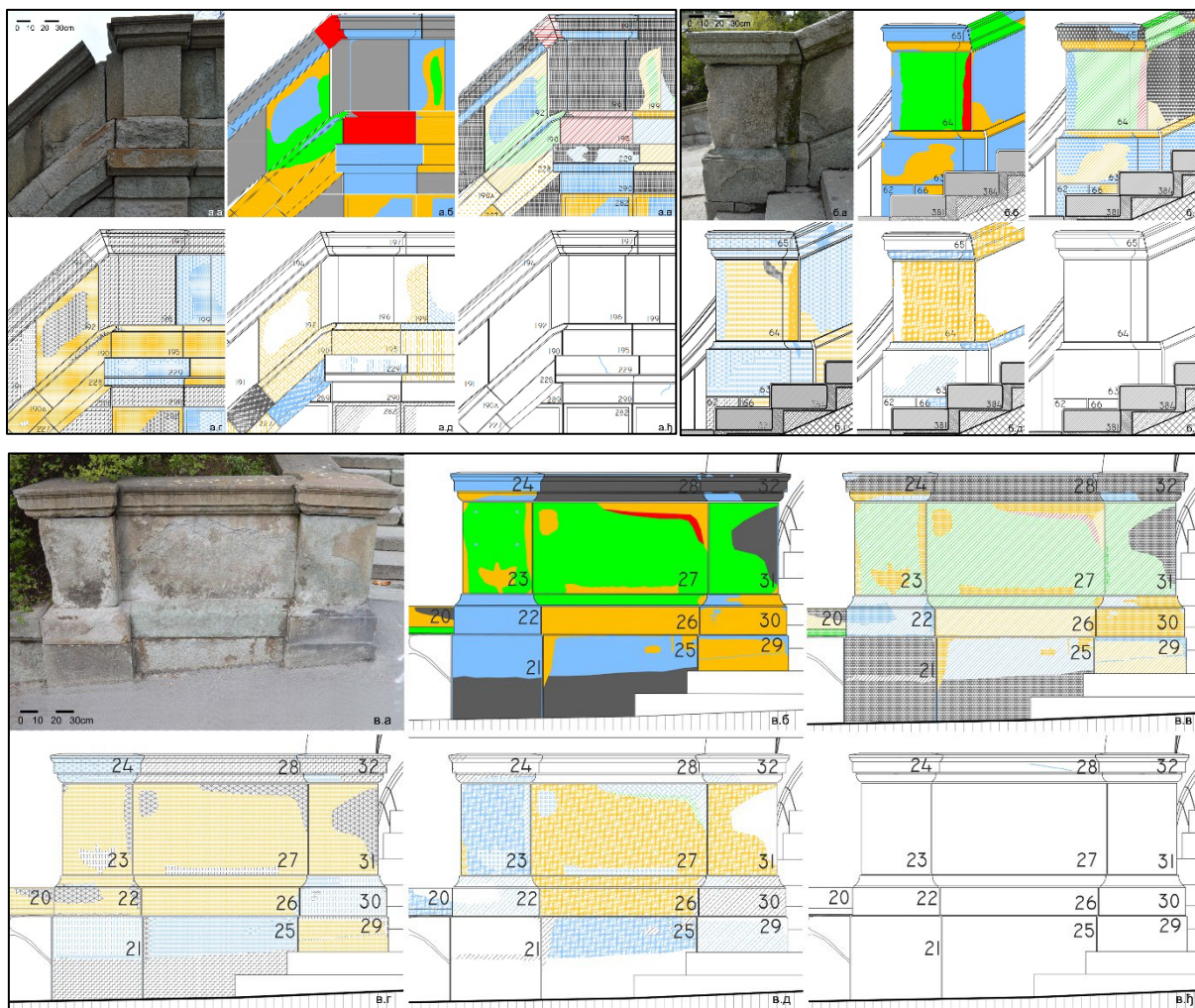


### 11.3. КАТЕГОРИЈЕ ОШТЕЋЕЊА КЕРСАНТИТА НА МАЛОМ СТЕПЕНИШТУ

Интеграција свих нивоа оштећења сваке групе на сваком појединачном блоку обележена током мапирања извршена је како би се суперпонирали интензитети и обједињено представили на мапама категорија оштећења (Сл. 52). Најинвазивније оштећење сваког појединачног блока из сваке од четири групе је представљено на финалном графичком прилогу (Сл. 51а) предодређеном бојом повезаном са категоријом оштећења: 1.сиво-веома слаба оштећења, 2.плаво-слаба оштећења, 3.жуто-умерена оштећења, 4.зелено-јака оштећења и 5.црвено-веома јака оштећења.



Слика 51. Категорије оштећења споменика Мало степениште; а) архитектонски цртежи степеништа и ограде са мапирањем категорија оштећења на дефинисаним сегментима; б) хистограм категорија оштећења израчунат за 16 сегмената и табеларни приказ линеарног  $DI_{lin}$ , и прогресивног  $DI_{prog}$  индекса распадања



Слика 52. Приказ примера појединих делова објекта са графички приказаним обједињеним и појединачним групама оштећења: а) део централне лучне оградне а.а) фотографија стања а.б) приказ сумираних категорија оштећења а.в) мапа прве групе оштећења-губитак каменог материјала а.г) мапа друге групе оштећења-деколорација/наслаге а.д) мапа треће групе оштећења-одвајање а.е) мапа четврте групе оштећења-пукотине б) стуб оградне на подесту б.а) фотографија стања б.б) приказ сумираних категорија оштећења б.в) мапа прве групе оштећења-губитак каменог материјала б.г) мапа друге групе оштећења-деколорација/наслаге б.д) мапа треће групе оштећења-одвајање б.е) мапа четврте групе оштећења-пукотине в) леви доњи део оградне в.а) фотографија стања в.б) приказ сумираних категорија оштећења в.в) мапа прве групе оштећења-губитак каменог материјала в.г) мапа друге групе оштећења-деколорација/наслаге в.д) мапа треће групе оштећења-одвајање в.е) мапа четврте групе оштећења-пукотине

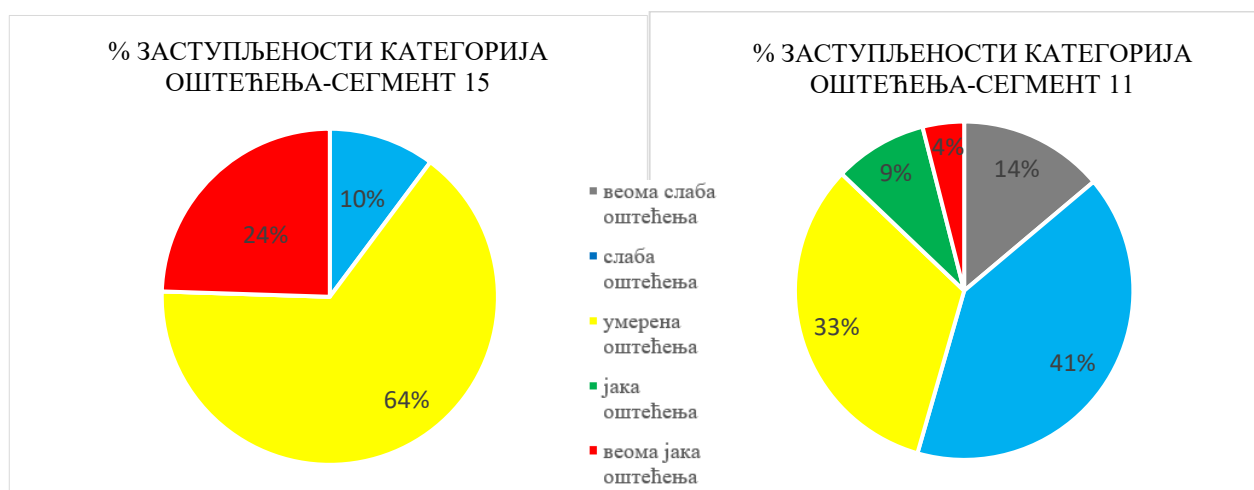
Категорије оштећења рачунате су појединачно за сваки блок у оквиру 16 сегмената на које је степениште подељено. У Табели 11. представљен је приказ сумираних категорија за појединачне сегменте у процентима.

Највећа заступљеност категорије 5-веома јаких оштећења регистрована је на сегменту 15-подесту, на ком 24% површине блокова има овај интензитет оштећења (Сл. 53). Категорија веома јаких оштећења указује на блокове који при реконструкцији сигурно морају бити замењени (у целости или парцијално). Следећи сегмент по вредности веома јаких оштећења је 6-десни доњи део оградног зида са 10% и број 14-доњи десни крак степеништа са 9%. Оштећења у категорији 4-јака оштећења представљају такође велики ризик за камене блокове на којима ће бити потребне радикалне интервенције. Интервенције могу бити делимична или парцијална замена, надоградња конструктивних сегмената и други рестаураторски поступци. Највећи проценат јаких оштећења је на сегменту 2-леви доњи део оградне на коме је израчунато 19% у овој категорији. Следе га сегменти 6-десни доњи део оградног зида са 16% и сегмент 7-десни доњи део оградне са 14%.

Табела 11. Процентуална заступљеност оштећења по сегментима и категоријама оштећења

КАТЕГОРИЈЕ ОШТЕЋЕЊА ПО СЕГМЕНТИМА		1	2	3	4	5
1	Леви доњи део оградног зида	19	38	36	6	1
2	Леви доњи део ограде	30	29	22	19	0
3	Доњи леви сегмент ограде до подеста	30	37	25	6	1
4	Горњи леви сегмент ограде поред степеништа од подеста до врха	23	49	25	2	1
5	Горњи леви сегмент ограде изнад степеништа (на врху)	36	38	20	2	5
6	Десни доњи део оградног зида	4	54	17	16	10
7	Десни доњи део ограде	0	41	43	14	3
8	Десни доњи део ограде до подеста	24	34	35	7	0
9	Горњи десни део ограде	7	45	40	8	0
10	Горњи десни део изнад ограде	16	50	32	2	0
11	Централна лучна ограда степеништа	14	41	33	9	4
12	Фасада са чесмом	25	42	30	2	1
13	Доњи леви крак степеништа	8	51	39	1	1
14	Доњи десни крак степеништа	6	48	36	0	9
15	Подест	0	12	64	0	24
16	Горњи крак степеништа	8	37	52	0	3
	ПРОСЕЧНО ЗА СВЕ СЕГМЕНТЕ	16	40	34	6	4

Категорија 3-умерена оштећења изражена је у великим процентима на свим сегментима објекта. Она указује на неопходност рестаураторских интервенција као што су консолидација, репарација, заштита. У најмањем проценту од 17% регистрована је на сегменту 6-десни доњи део оградног зида који има значајна оштећења и у категоријама 4 и 5. Највећи проценат је израчунат на сегменту 15-подесту, 64%. Категорија 2-слаба оштећења, просечно је најзаступљенија категорија на објекту. Она подразумева неопходност мањих интервенција у смислу чишћења и по потреби консолидације. Просечна вредност процената за све сегменте у овој категорији је 40%, док појединачно највећи удео је израчунат на сегменту 6- десни доњи део оградног зида са 54%. Категорија 1-веома слаба оштећења подразумева интервенције у виду чишћења. Просечно на свим сегментима је заступљена 16%.

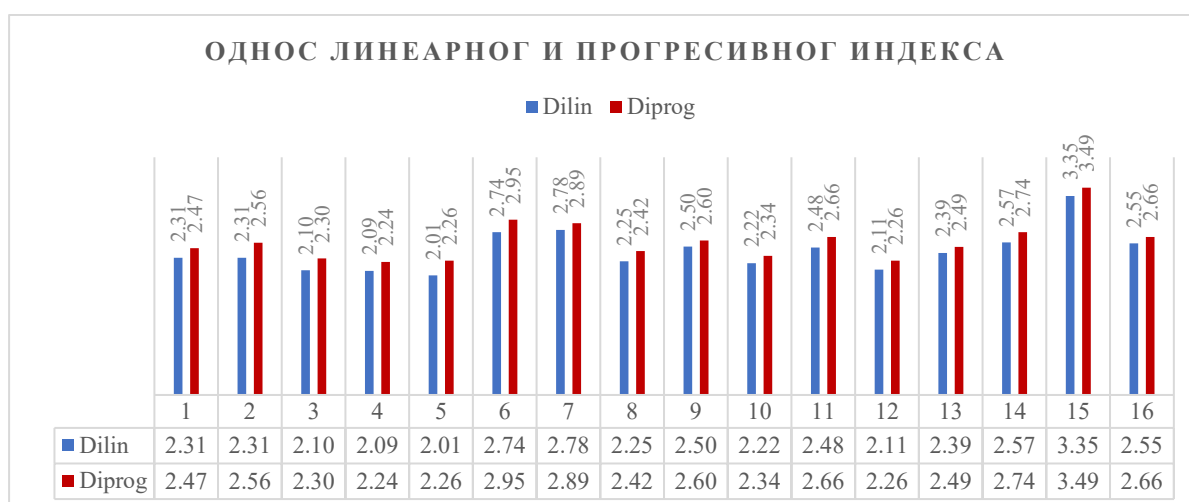


Слика 53. Графички приказ процентуалне заступљености различитих категорија оштећења на примеру сегментата 11 и 15



## 11.4. ИНДЕКСИ ОШТЕЋЕЊА

Корелација интензитета форми распадања (процент оштећене површине, дубина оштећења у односу на првобитну површину и димензије свих појединачних блокова) утврђених категорија оштећења (Сл. 51а) коришћена је за израчунавање линеарног и прогресивног индекса оштећења за 16 појединачних сегмената (Сл. 51б, Сл. 54). Посматрајући споменик, највећи проценат оштећења је у категорији слабих (40%) и умерених (34%) оштећења, али високе средње вредности индекса распадања ( $DI_{lin} = 2.42$ ,  $DI_{prog} = 2.58$ ) указују на висок степен угрожености споменика. Анализом појединачних сегмената регистрована су тешка и веома тешка оштећења у распону од 4–6% уз приметно одступање сегмената бр. 15 и 6 где је укупна заступљеност елемената 16% у категорији јаких и 34% веома јаких оштећења. Најбоље очувани део споменика је сегмент бр. 5 на којем су оштећења површине камена класификована као врло слаба (36%) и слаба (38%). Посматрано по сегментима, појединачне вредности  $DI_{lin}$  и  $DI_{prog}$  индекса (Сл. 51б) јасно указују на утицај геометрије споменика на интензитет оштећења, посебно на десном делу ограде. Највеће вредности индекса ( $DI_{lin} = 3,35$ ,  $DI_{prog} = 3,49$ ) регистроване су на подесту (сегмент 15, Сл. 51а) пошто је то површина споменика са најдужим задржавањем воде, док су најниже вредности забележене на сегментима 4 и 5 који представљају делове ограде у горњем левом делу споменика (Сл. 51а).



Слика 54. Графички приказ односа линеарног  $DI_{lin}$  и прогресивног  $DI_{prog}$  индекса распадања на 16 сегмената Малог степеништа

Након израчунавања индекса оштећења израчуната је њихова разлика која указује на брзину и прогресивност површинског распадања. Уочава се да је разлика индекса независна од њихових вредности и да сегмент са највећом вредношћу линеарног и прогресивног индекса није и сегмент са њиховом највећом разликом (Сл. 54, Табела 12). Највећа разлика је израчуната за сегмент 5 који има најмање вредности линеарног индекса. Разлика вредности индекса указује на чињеницу да су на сегментима на којима су регистроване највеће вредности индекса процеси површинског распадања керсантита у поодмаклој фази, и о њиховом стању већ сведоче високе вредности индекса, док су на сегментима са почетним малим вредностима индекса њихове разлике велике што указује на брзину и прогресивност промена.

Табела 12. Разлика између прогресивног и линеарног индекса оштећења по сегментима

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\frac{DI_{prog}-DI_{lin}}{DI_{lin}}$	0,16	0,25	0,20	0,15	0,25	0,21	0,11	0,17	0,10	0,12	0,18	0,15	0,10	0,17	0,14	0,11

## 12. ФОРМЕ ОШТЕЋЕЊА НА ОСТАЛИМ ИСПИТИВАНИМ ОБЈЕКТИМА

### 12.1. СПОМЕНИК ЂУРИ ЈАКШИЋУ

Споменик са постаментом од керсантита је више од 126 година изложен деловању атмосферичких и различитих антропогених утицаја што за последицу има појаву различитих форми деградације камена из све четири главне групе оштећења (Сл. 55). Макроскопском опсервацијом споменика констатоване су следеће групе оштећења: губитак каменог материјала (дубинско распадање, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере, птичјим изметом, микробиолошке колоније, присуство виших биљака, коре), одвајање (зрнаста дезинтеграција у грус и љуспање) и пукотине независне од структуре камена.



Слика 55. Изглед појединачних страна споменика Ђури Јакшићу

Прва група оштећења - **губитак каменог материјала** манифестује се у облицима дубинског, рељефног и комадастог распадања. **Дубинско распадање** је ниског интензитета, максимално до друге категорије оштећења (до дубине 0,3 cm; cW<sub>2</sub>) и регистровано је само на профилисаним елементима шире покривне плоче капитета, испод бисте на северној страни споменика. Јавља се на местима где су се наслаге и коре одвојиле од површине камена и обухвата до 2 % целокупне површине споменика (Сл. 56а, б). **Рељефно распадање** се јавља у виду заобљавања површина претходно оштећених дубинским распадањем, где је присутно у категорији оштећења до 0,1 cm дубине (R<sub>01</sub>), међутим његова појава је преобликовала рељефе споменика. Најоштећенији део споменика су испупчени рељефи у облику лире. Док је рељеф на јужној страни готово потпуно изгубио свој првобитни изглед, на рељефу на северној страни могу се и даље препознати неки декоративни елементи (волуте, профили).

Интензитет рељефног заобљавања на јужној страни споменика узроковао је губитак каменог материјала, у највећем делу до 1 cm по дубини (R<sub>04</sub>), док је у доњем сегменту лире регистрован губитак материјала више од 1 cm по дубини (категирија оштећења R<sub>05</sub>) што је резултирало потпуним губитком примарних профилисаних елемената (стопе постамента лире, стилизоване кобилице, акротерије; Сл. 56г). На јужној страни споменика, рељеф лире је сачувао примарну форму, чак и примарне површине (волуте, елемент акантусовог листа), те регистровани губитак материјала није већи од 5 mm (R<sub>02-3</sub>; Сл. 56в). Положај и оријентација лире на споменику значајно су утицали на интензитет и категорију оштећења што се јасно сагледава на слици 56е. Осим рељефног распадања које је произвело заобљавање површина, на споменику је регистровано и рељефно распадање угаоног дела венца, категорије оштећења до 1 cm (R<sub>04</sub>; Сл. 56ђ). Од присутних форми распадања из прве групе оштећења, присутно је **комадасто распадање**, најчешће као последица антропогених утицаја (позиција споменика у јавном парку). Комадасто распадање је регистровано на источној страни споменика, у



делимично правилној призматичној форми са губитком каменог материјала максималне укупне запремине до  $500 \text{ cm}^3$  (интензитет  $aO_4$ ; Сл. 56е), док је на хоризонталним површинама споменика и сасвим ретко њиховим ивичним деловима регистрована појава губитка компактних делова максималног интензитета  $aO_2$  (десни део Сл. 56е).



Слика 56. Форме распадања прве групе оштећења – губитак каменог материјала на споменику Ђури Јакишићу; а) дубинско распадање на северној страни споменика; б) дубинско распадање на источној страни споменика; в) рељефно распадање лире на северној страни споменика; г) рељефно распадање лире на северној страни споменика; д) упоредни приказ рељефа лира у профилу; њ) рељефно распадање - заобљавање угаоног дела

У другој групи оштећења - **деколорација/наслаге** доминантни облици су **запрљаност**, као последица нагомилавања прашине и других честица из атмосфере ( $pI$ ), запрљаност птичјим изметом на хоризонталним површинама врха стуба око бронзане бисте ( $gI$ ) (Сл. 55), формирање црних кора ( $diC$ ), биолошка колонизација у облику микробиолошке колонизације (маховином) ( $Vi$ ) и појава виших биљака укоревених у спојницама ( $Bh$ ). **Запрљаност** честицама атмосфере се у највећем интензитету појављује на капителу где наслаге покривају 20 % - 50 % површине ( $pI_2$ ; Сл. 57а).

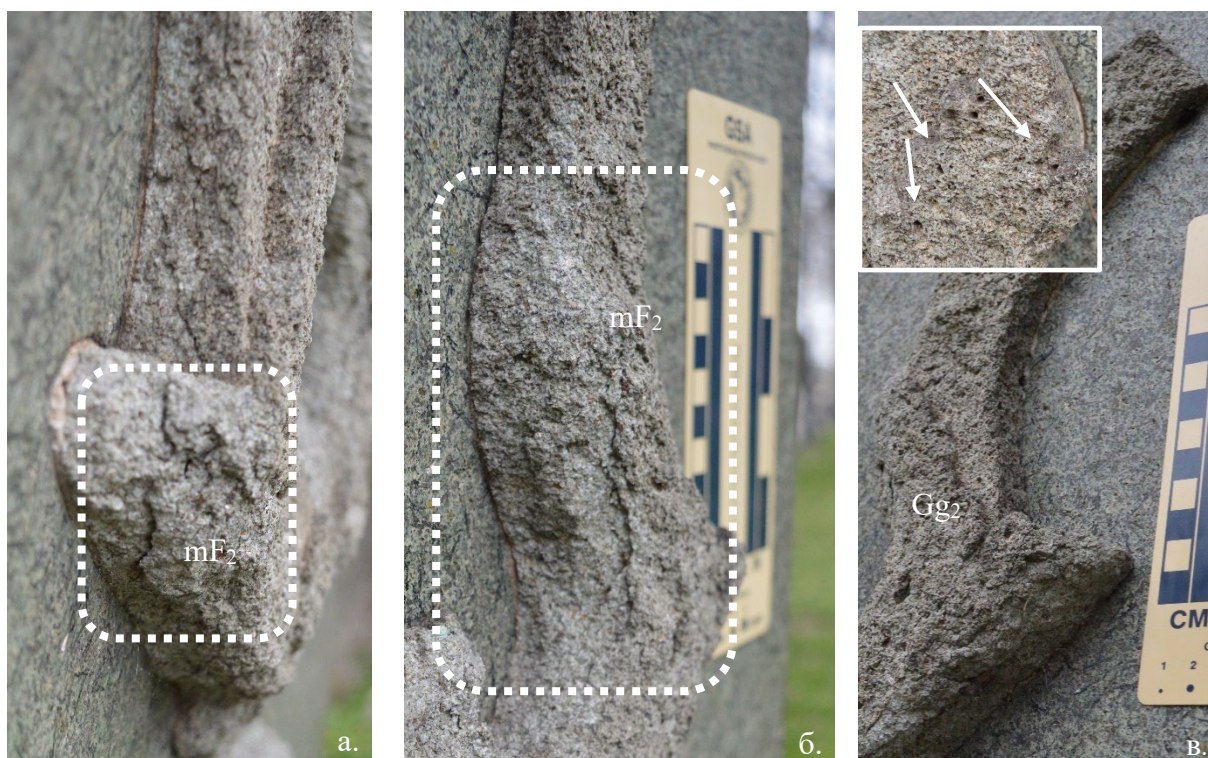




Слика 57. Форме распадања друге групе оштећења – деколорација/наслаге на споменику Бури Јакшићу; а) задрљаност услед наслага нечистоћа из атмосфере; б-г) микробиолошка колонизација; д) биолошка колонизација вишим биљкама и птичији измет; ж) црна кора развијена на доњим, заклоњеним и хоризонталним горњим површинама капитета; е) детаљ црне коре



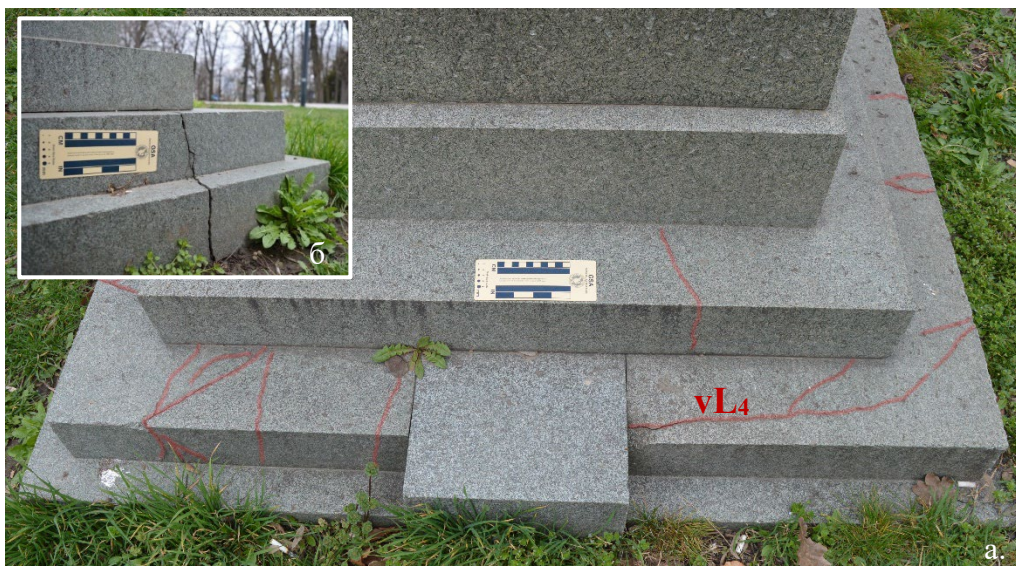
Манифестује се у виду зона тамносиве боје исталожених честица чађи и прашине, и сачуваних на површинама где није било директног спирања водом. На северној страни споменика, као и на хоризонталним горњим површинама капитела карактеристична је појава **микробиолошке колонизације** развијене дуж трагова кретања и/или дужег задржавања воде. Јавља се у виду зеленог корастог биофилма који покрива површину камена у интензитету ( $V_{1-3}$ ) (Сл. 57а, г). Дебљина филма не прелази 1mm, али компактност и прионљивост указују на инкорпорираност развијеног биодиверзитета, у субстрат уз стварање резистентне хидрофобне облоге („ефекат кишобрана“, Сл. 57г). Осим микробиолошке колонизације, регистрована је и појава **више биљке** на спојници између два блока базе споменика ( $Vh_1$ ) (Сл. 57д) као и остаци птичијег измета. На хоризонталним, доњим површинама подгледа капитела уочљиве су зоне на којима је дошло до формирања **црних кора** (Сл. 57в). На предметним деловима блока, црне коре се јављају у уским, дугачким тракама. Морфолошки су то чврсте, компактне коре дебљине од 1-2 mm ( $diC_2$ ) и чврсто пријањају за површину камена. Спорадично се уочава њихово љуспасто одвајање (Сл. 57е). Трећа група оштећења - **одвајање**, манифестује се у виду љуспасте дезинтеграције ( $mF$ ) и веома ретке зрнасте дезинтеграције ( $Gg$ ). На местима претходних оштећења услед дубинског распадања или заобљавања долази до **формирања љуспи** ниског и средњег интензитета ( $mF_{1-2}$ ). Формирање и одвајање љуспи најизраженије је на рељефним формама лира (Сл. 58а, б). Такође је регистровано и у зонама испод капитела, дуж спојница, али ниског интензитета без одвајања и последичног губитка каменог материјала. **Зрнаста дезинтеграција** је присутна само на површини лира и то у форми губитка минералних конституената што резултира неравном, храпавом површином са бројним шупљинама (Сл. 58в). Маса одвојеног материјала је ниска до средња ( $Gg_{1-2}$ ).



Слика 58. Форме распадања треће групе оштећења – одвајање; а-б) љуспање рељефа на лири; в) зрнаста дезинтеграција и губитак минералних конституената и последично заостале шупљине (деталј слике)

Четврта група форми распадања јесу **пукотине**. На споменику се налазе у облику пукотина независних од структуре камена ( $vL$ ), доминантно насталих услед статичких утицаја и вишедеценијског слегања и спирања терена. Пукотине су најзаступљеније на блоковима у бази споменика. Неке су значајно проширене и омогућавају продирање и нежељени утицај воде и леда на унутрашњу структуру блокова. У зависности од броја, положаја, дужине и ширине, пукотине на споменику су у распону интензитета  $vL_{1-4}$ , где пукотине највећег интензитета могу довести до комадастог одвајања већих делова блокова (Сл. 59).





Слика 59. Пукотине на постаменту а) Диспозиција пукотина на постаменту на западној страни споменика; а) пукотине на северној страни споменика

## 12.2. СПОМЕНИК ЈОВАНУ СКЕРЛИЋУ

Споменик се у простору парка налази 56 година (Сл. 60). Изложен је деловању атмосферичке и различитих антропогених утицаја који су довели до појаве различитих форми деградације камена из све четири главне групе оштећења. Макроскопском опсервацијом споменика констатоване су следеће групе оштећења: губитак каменог материјала (дубинско распадање, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере, птичјим изметом, микробиолошке колоније, коре), одвајање (зрнаста дезинтеграција и љускање) и пукотине зависне од структуре камена.



Западна страна



Јужна страна



Северна страна



Источна страна

Слика 60. Изглед појединачних страна споменика Јовану Скерлићу

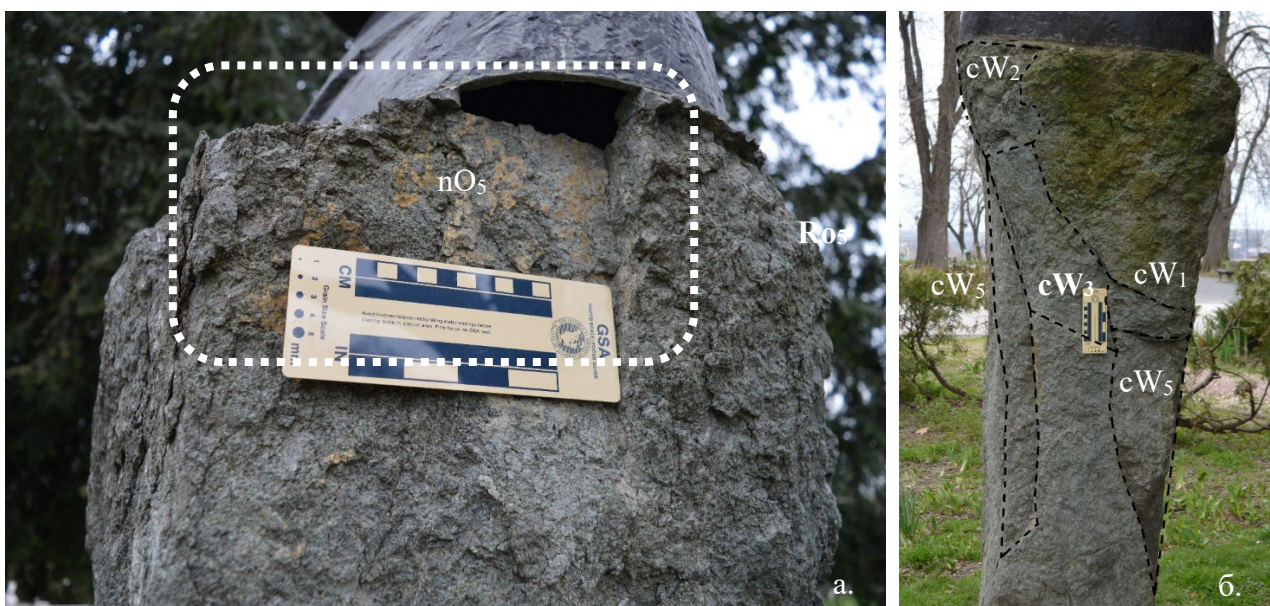
Прва група оштећења - **губитак каменог материјала** манифестује се у облицима дубинског, рељефног и комадастог распадања. **Дубинско распадање** је високог интензитета, до пете категорије оштећења (дубине до преко 1 cm;  $cW_{1.5}$ ) и најдоминантније регистровано је на јужној и источној страни споменика. Јавља се на местима где су се љуске одвојиле од површине камена и обухвата до 40 % целокупне површине споменика (Сл. 62б). **Рељефно распадање** се јавља у виду заобљавања површина у интензитету оштећења и преко 1 cm дубине ( $Ro_5$ ; Сл. 62а). Од присутних форми распадања из прве групе оштећења, истиче се **комадасто распадање**, најчешће као последица природних фактора пО. Комадасто распадање



је регистровано на југозападном делу врха стуба, у бази, на јужној и источној страни стуба. Последица је одвајања љуски које доводе до формирања већих нестабилних фрагмената неправилних форми, са губитком каменог материјала укупне запремине преко  $500 \text{ cm}^3$  (интензитет  $aO_5$ ; Сл. 62а). На слици 61 приказано је садашње стање упоредно са оригиналним волуменом споменика. Уочава се велики губитак каменог материјала услед свих претходно описаних форми из прве групе.



Слика 61. Одступање од оригиналног волумена споменика, укупан губитак материјала (3Д приказ)



Слика 62. Форме распадања прве групе оштећења – губитак каменог материјала на споменику Јовану Скерлићу; а) комадасто распадање и рељефно распадање-заобљавање углова; б) дубинско распадање на источној страни споменика



Друга група оштећења - **деколорација/наслаге** обухватила је на споменику Јовану Скерлићу облик **запрљаности**, као последицу нагомилавања прашине и других честица из атмосфере (pI), запрљаност птичјим изметом (gI; Сл. 61), деколорацију калцитних жица (Dc) и биолошку колонизацију у облику микробиолошке колонизације (маховинама) (Vi). **Запрљаност** честицама атмосфере се у највећем интензитету појављује у доњим зонама споменика и на хоризонталној површини врха стуба на ком је постављена биста где наслаге покривају 20 % - 50 % површине (pI<sub>2</sub>; Сл. 63а). Манифестује се у виду зона браон до тамносиве боје исталожених честица земље, чађи и прашине. **Деколорација** је присутна на видним деловима калцитних жица које су биле саставни део блока од кога је споменик израђен. Жице су оригинално беле боје која је још увек видљива на предњој, западној страни споменика, док су на другим локацијама на споменику хроматски измењене услед хемијских промена (Сл. 63б). На источној и северној страни споменика, карактеристична је појава **микробиолошке колонизације**. Јавља се у виду зеленог корастог биофилма који покрива површину камена у интензитету (Vi<sub>2-3</sub>; Сл. 63в). Дебљина филма не прелази 1mm, али компактност и прионљивост указују на инкорпорираност развијеног биодиверзитета у субстрат, уз стварање резистентне хидрофобне облоге.

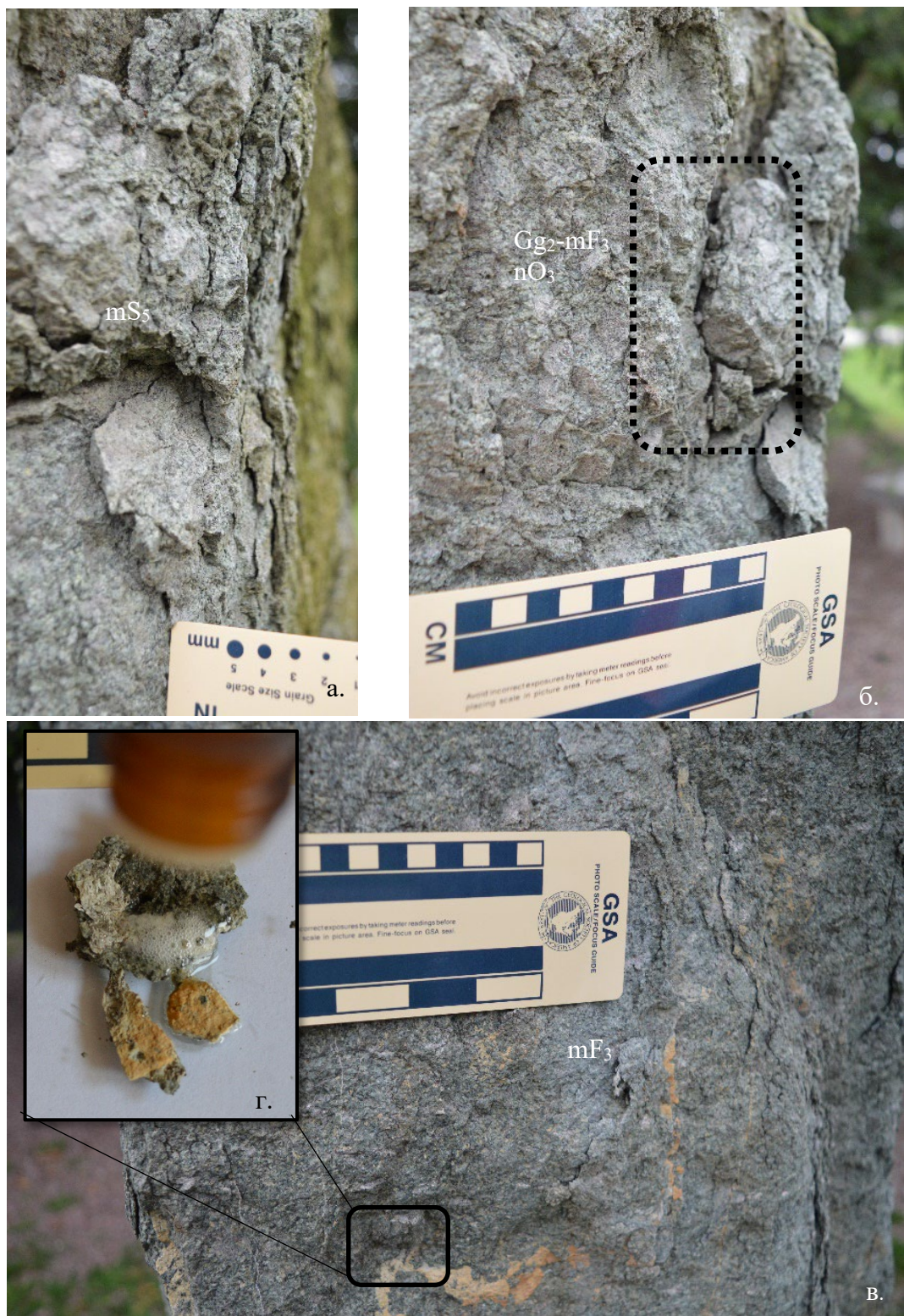


Слика 63. Форме распадања друге групе оштећења – деколорација/наслаге на споменику Јовану Скерлићу; а) запрљаност услед наслага нечистоћа; б) деколорација-хроматска промена боје калцитних жица в) микробиолошка колонизација;

Трећа група оштећења - **одвајање**, манифестује се у виду вишеструког љускања (mS), љуспања (mF) и зрнасте дезинтеграције (Gg). На местима претходних оштећења услед дубинског распадања или заобљавања долази до појаве **формирања вишеструких љуски** до високог интензитета и дебљина већих од 1,5 cm (mS<sub>3-5</sub>) и **љуспи** средњег и високог интензитета (mF<sub>2-3</sub>). Формирање и одвајање љуски најизраженије је на источној страни споменика (Сл. 64а). **Зрнаста дезинтеграција** је регистрована на површинама на којима је дошло до непосредног одвајања љуски и љуспи и то у форми губитка минералних конституената што резултира неравном, храпавом површином са бројним шупљинама (Сл. 64в). Маса одвојеног материјала је ниска до средња (Gg<sub>1-2</sub>).

Четврта група форми распадања су **пукотине**. Присутне су на споменику на позицијама делимично одвојених љуски и прате структуру камена (tL). У зависности од броја, положаја, дужине и ширине, пукотине на споменику су у распону интензитета tL<sub>1-2</sub>, (Сл. 65).





Слика 64. Форме распадања треће групе оштећења – одвајање; а) вишеструко љускање б) комбинација: зрнаста дезинтеграција и вишеструко љускање, до комадастог распадања; в) љускање г) калцитна жица – реакција са хлороводоничном киселином





Слика 65. Четврта група распадања -пукотине а) детаљ пукотина на западној страни споменика; б) детаљ пукотина на источној страни споменика

### 12.3. ЗГРАДА КЛАСНЕ ЛУТРИЈЕ (ВАСИНА УЛИЦА БР. 20)

На споменику културе, згради Класне лутрије, керсантит је употребљен за израду сокле и улазног портала на фасади, док су у ентеријеру централно, трокрако степениште и стубови у холу такође у потпуности израђени од керсантита (Сл. 66а-в). Објекат је био оштећен у бомбардовању у Првом светском рату (Сл. 66а) и због дугорочног лошег одржавања фасаде изложен је деловању атмосферичких и антропогених утицаја (вандализма, коришћења соли у зимском периоду, неадекватних интервенција на одржавању) који су довели до појаве различитих форми деградације камена из три главне групе оштећења.

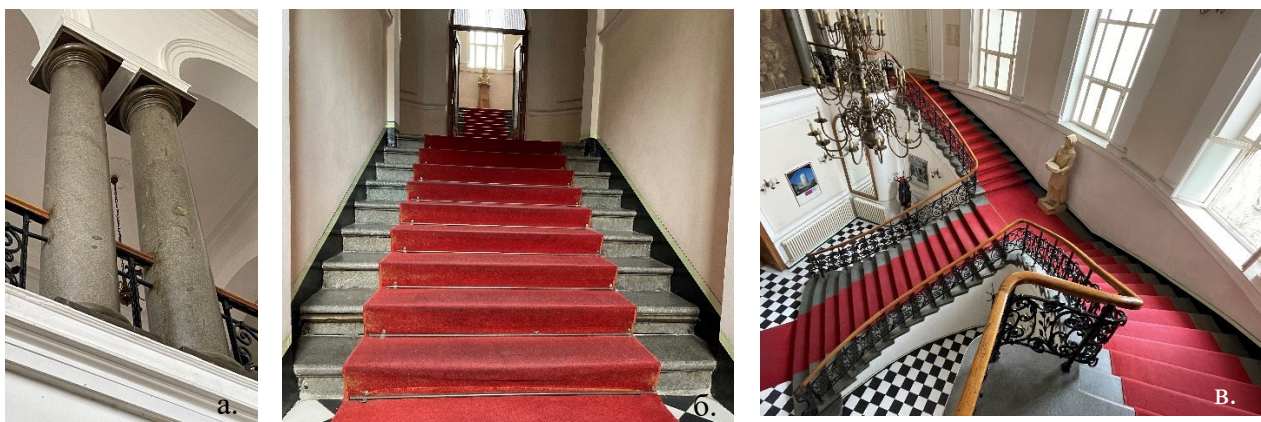


Слика 66. Споменик културе Зграда класне лутрије а) оштећења током бомбардовања 1915. године (документација Завода за заштиту споменика културе града Београда) б) Општи изглед 2023. године в) детаљ угаоне фасаде-део ризалита са декоративном улазном партијом

У ентеријеру објекта, од керсантита је изграђено степениште између улазног и централног хола, централно трокрако степениште у главном холу и стубови на спрату централног хола

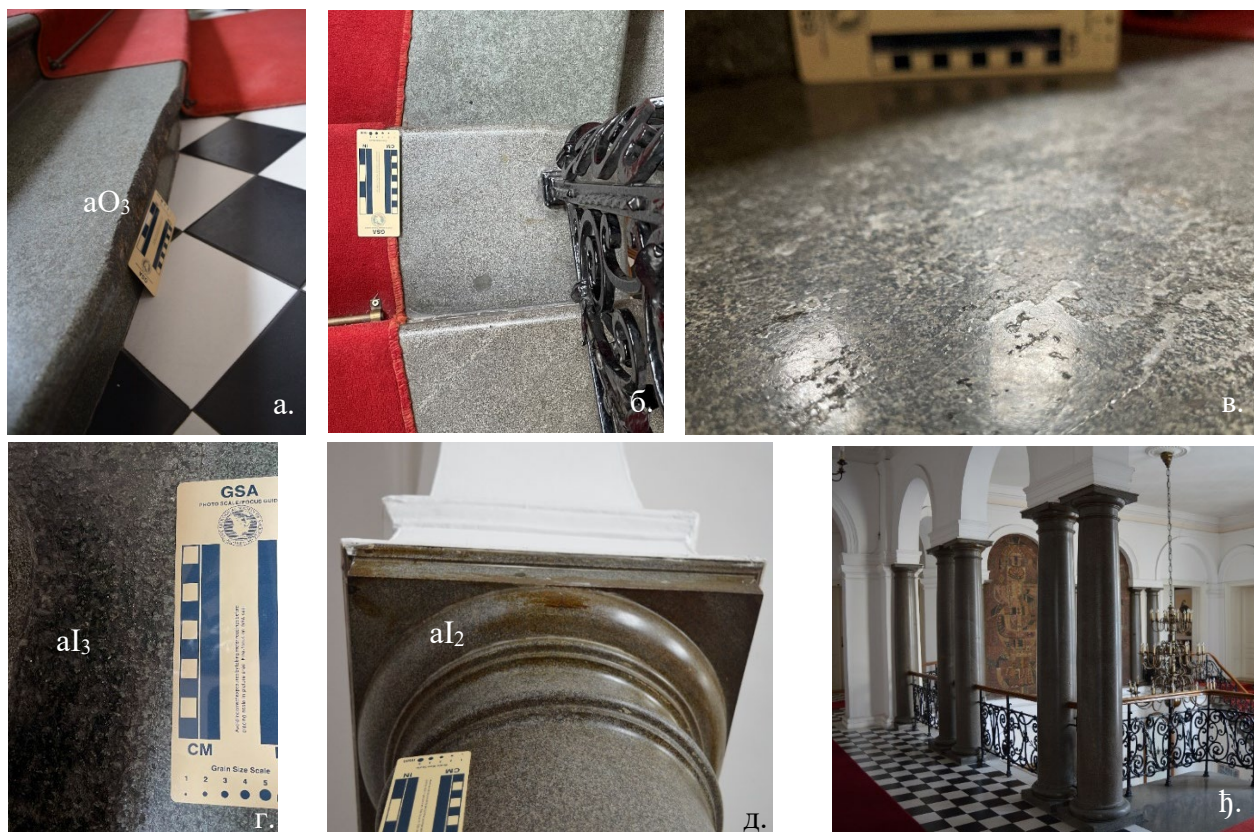


(Сл. 67). Ентеријер објекта је изузетно добро сачуван и форме деградације камена су веома мало изражене. Макроскопском опсервацијом објекта констатоване су следеће групе оштећења: губитак каменог материјала (дубинско, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере, микробиолошке колоније, коре), одвајање (зрнаста дезинтеграција и љуспање и љускање, одвајање тамне коре).



Слика 67. Сlike ентеријера објекта а) стубови од керсантита; б) степениште између улазног и централног хола; в) трокрако централно степениште од керсантита

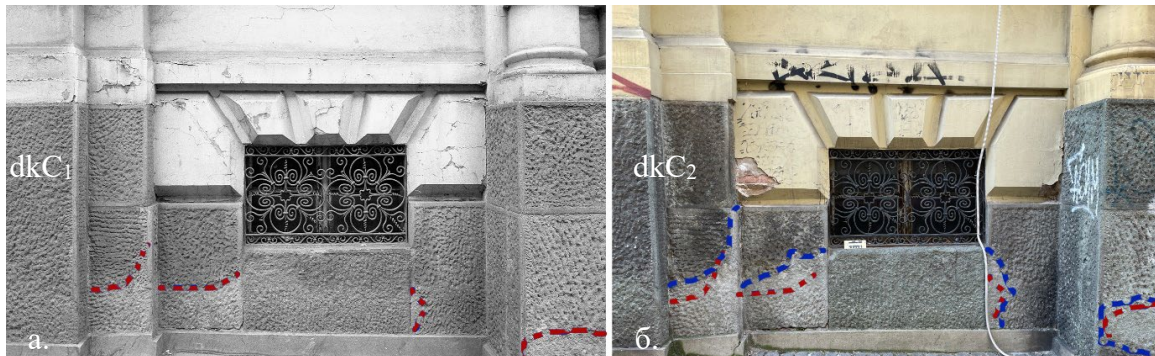
Ентеријер карактерише употреба различитих варијетета керсантита, па се тако на узастопним степеницима могу уочити, један до другог, три различита варијетета (Сл. 68б). Стубови, газишта и подесне плоче су израђени из појединачних целовитих комада, један стуб/степеник-један блок. На степеништу се уочавају трагови одржавања и коришћења различитих непознатих средстава која су оформила неку врсту филма преко степеника (Сл. 68в). Није познато, али је вероватно, да су и стубови премазивани у циљу одржавања што је посебно видљиво на деловима капитела (Сл. 68д).



Слика 68. Детаљи ентеријера објекта а) комадасто оштећење првог степеника; б) различити варијетети употребљени за изградњу степеника; в) љуспање микрофилма на степеницима; г) запрљање таложењем средства за заштиту или одржавање; д) запрљање капитела стубова; њ) ентеријер хола на спрату

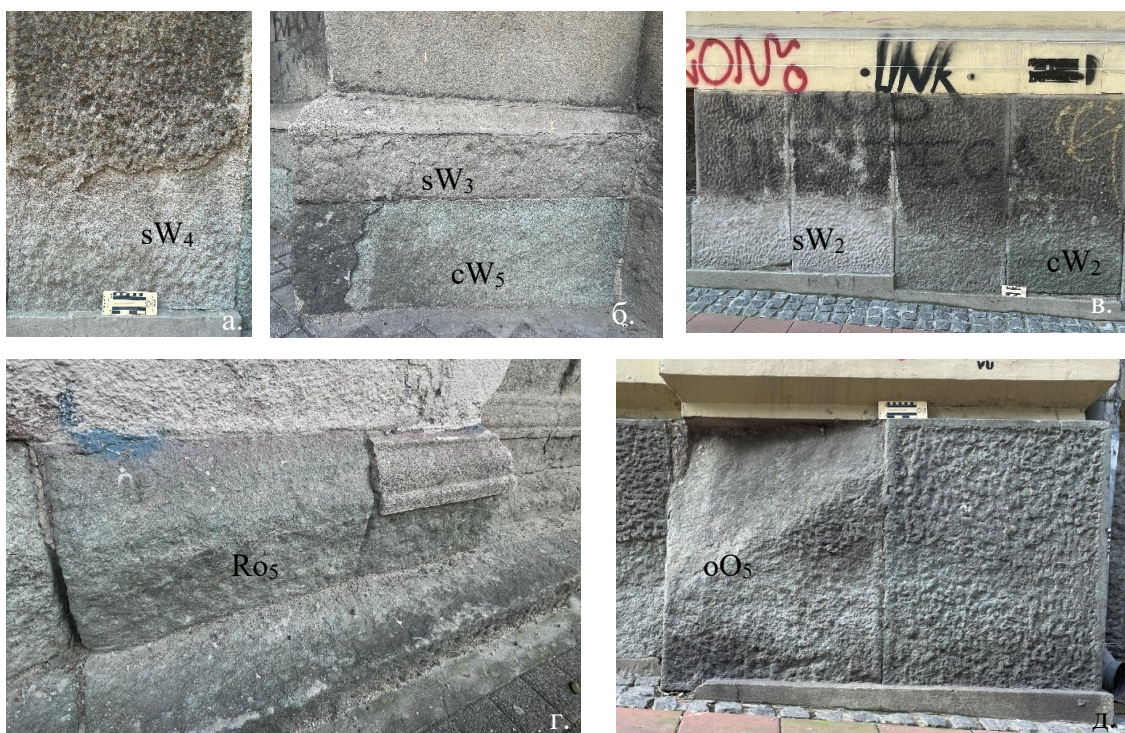


Прва група оштећења - *губитак каменог материјала*, манифестује се у облицима дубинског, рељефног и комадастог распадања. **Дубинско распадање** је високог интензитета, до пете категорије оштећења (дубине до преко 1 cm; cW<sub>1-5</sub>, sW<sub>1-5</sub>) и регистровано је у доњој зони блокова сокле на обе фасаде. Јавља се на местима где су се љуске одвојиле од површине камена (Сл. 70) и обухвата до 20 % целокупне површине сокле изграђене од камена (Сл. 70б). Упоредном анализом стања на фотографијама из 1992. године и 2023. године уочава се прогресивност ове форме распадања (Сл. 69).



Слика 69. Прогресија дубинског распадања и интензитета црних кора поређењем стања 1992. и 2023. године, детаљ прозора а) стање 1992. године; б) стање 2023. године

**Рељефно распадање** се јавља у виду заобљавања површина пре свега на испупченим елементима венца и на угаоним блоковима. Присутно је у категорији оштећења и преко 1 cm дубине (Ro<sub>5</sub>; Сл. 70а). На одређеним елементима венца видљиво је испод површина захваћених претходним рестаураторским радовима спровођеним надградњом вештачким материјалом. Од форми распадања из прве групе оштећења, присутно је и **комадасто распадање**, најчешће као последица непознатих фактора оО. У горњој зони блока уочен је недостатак фрагмента неправилне форме са губитком каменог материјала укупне запремине преко 500 cm<sup>3</sup> (интензитет аО<sub>5</sub>; Сл. 70д).



Слика 70. Прва група оштећења-губитак каменог материјала а) дубинско распадање услед одвајања љуске примарно настале површинском обрадом; б) услед одвајања црне коре на доњем блоку и услед одвајања љуске на горњем блоку; в) комбинација различитих узрока дубинског распадања на суседним блоковима; г) рељефно заобљавање профилисаних блокова венца; д) комадасто распадање услед непознатог узрока



Друга група оштећења - *деколорација/наслаге* мапирана је на споменику културе, Згради класне лутрије, само на деловима изграђеним од камена. Регистровани су облик *запрљаности*, као последица нагомилавања прашине и других честица из атмосфере (pI), *запрљаност* услед антропогеног утицаја (aI), *биолошка колонизација* нижим биљкама (Bi), *наслаге соли* (Ee), *тамне коре* које не мењају површину камена (dkC).

*Запрљаност* честицама атмосфере се у највећем интензитету појављује у доњим зонама блокова уз тротоар где наслаге покривају 10 % - 20 % површине (pI<sub>1</sub>; Сл. 71a).



Слика 71. Форме распадања друге групе оштећења – *деколорација/наслаге* на споменику културе Згради класне лутрије; а) *запрљаност* услед наслага нечистоћа из атмосфере; б) *црне коре*; в) *исољавање*; г) *запрљаност* услед антропогеног утицаја-фарбање површине камена; д) *биолошка колонизација* нижим биљкама; *ђ-е)* *запрљаност* услед антропогеног утицаја-вандализмом - *истисивањем графита*



Најизраженија форма из ове групе је запрљаност услед антропогеног утицаја која је последица вандализма, али и неадекватних интервенција у виду фарбања целих површина блокова. Изразито је великог интензитета, негде и до 100% површине ( $aI_3$ ) и утиче на општи изглед фасаде. На местима где је на блоковима нестручно интервенисано наношењем фарбе, постоје оштећења у виду постојања љуспи и зрнасте дезинтеграције, што овај тип интервенције чини веома штетним, јер при уклањању фарбе може доћи до значајног оштећења блокова. Исољавање се јавља на доњим деловима блокова испред улаза у објекат и може бити последица употребе соли за одмрзавање при ниским температурама. У доњој зони блокова дуж Улице кнегиње Љубице карактеристична је појава биолошке колонизације нижим биљкама. **Тамне коре** ( $dkC_{1-2}$ ) су присутне на 40-50 % блокова, у различитом интензитету (Сл. 71б). Трећа група оштећења - **одвајање**, манифестује се у виду љуспасте дезинтеграције ( $mF$ ), љускања ( $qS$ ), услед последица површинске обраде штоковањем, зрнасте дезинтеграције ( $Gg$ ), и одвајања тамне коре која мења површину камена ( $diK$ ). На местима претходних оштећења услед дубинског распадања или заобљавања долази до појаве **формирања вишеструких љуски** до високог интензитета и дебљина већих од 1,5 cm ( $qS_{3-5}$ ) и **љуспи** средњег и високог интензитета ( $mF_{2-3}$ ; Сл. 72а, г). **Зрнаста дезинтеграција** је регистрована на површинама на којима је дошло до непосредног одвајања љуски и љуспи и то у форми губитка минералних конституената што резултира неравном, храпавом површином са бројним шупљинама (Сл. 72б, в). Маса одвојеног материјала је ниска до средња ( $Gg_{1-2}$ ).



Слика 72. Форме распадања треће групе оштећења – одвајање: а) љускање и љуспање; б) одвајање тамне коре, зрнаста дезинтеграција и губитак минералних конституената и последично заостале шупљине; в) љускање и зрнаста дезинтеграција; г) пример блока на којем постоји љускање, љуспање, одвајање тамне коре и зрнаста дезинтеграција



#### 12.4. НАРОДНИ МУЗЕЈ У БЕОГРАДУ

Камена облога дела фасаде зграде Народног музеја изграђена је од керсантита који је хетероген у погледу петрографског састава и склопа (Сл. 73). Променљиво учешће главних и секундарних минерала као и варирање од ситно- до крупнозрнасте или офитске структуре, утицали су у значајној мери на временску трајност овог камена. Подстакнути антропогеним утицајем (избором типа завршне обраде), природни процеси физичке деградације се данас манифестују у различитим облицима на каменим елементима фасаде. Интензитет разградње је веома неуједначен и директно повезан са положајем каменог елемента у фасади, различитостима обраде видних површина и хетерогеношћу самог камена. Свеукупно физичко-хемијско деловање атмосферилија и осталих евидентних фактора (антропогено деловање), проузроковали су формирање бројних микропрслина и пукотина, које су континуирано временом водиле прогресивном интензивирању деградационих промена. Камен у сокли је у фази физичке разградње која је, од елемента до елемента, различитог интензитета. Неуједначеност у интензитету разградње последица је разлика у структурним карактеристикама и минералном саставу, али су на опште стање елемената утицали и екстринзични фактори средине у којој се камен налази. Стање елемената у кордонском венцу је неуједначено, као и у сокли.

На каменим елементима фасаде зграде Народног музеја јављају се различити облици временског пропадања керсантита.



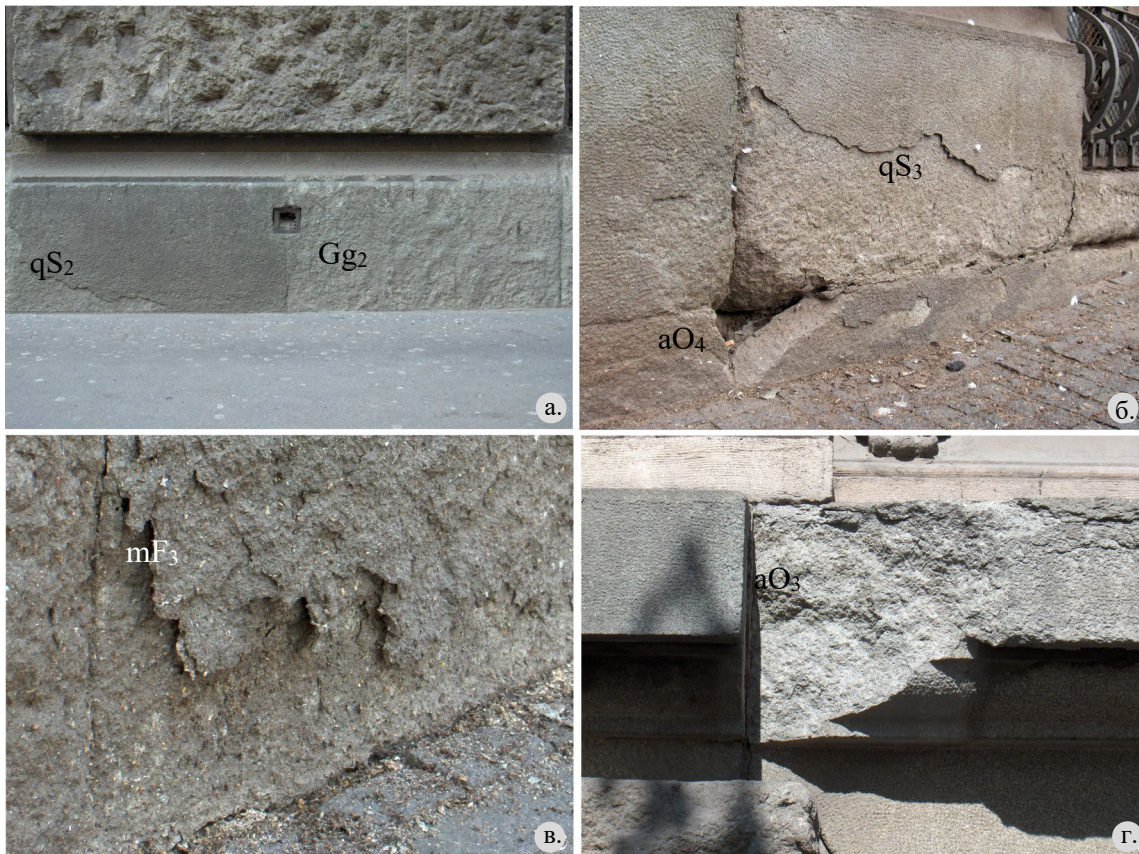
Слика 73. Општи изглед зграде Народног музеја

Визуелним прегледом стања камене облоге утврђен је различит степен физичке деструкције која се манифестује следећим групама оштећења (Сл. 74): губитак каменог материјала (дубинско, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере), одвајање (зрнаста дезинтеграција, љуспање и љускање).

Прва група оштећења - **губитак каменог материјала** манифестује се у облицима дубинског, рељефног и комадастог распадања. **Дубинско распадање** је високог интензитета, до пете категорије оштећења (дубине до преко 1 cm;  $cW_{1-5}$ ,  $sW_{1-5}$ ) и регистровано је у доњој зони блокова сокле. Јавља се на местима где су се љуске одвојиле од површине камена и обухвата до 50 % површине захваћених блокова (Сл. 74б). **Рељефно распадање** се јавља у виду заобљавања површина, пре свега на испупченим елементима венца и на угаоним блоковима. Присутно је у категорији оштећења и преко 1 cm дубине ( $Ro_5$ ; Сл. 74а). **Комадасто распадање** је најчешће последица непознатих фактора (оО). Посматрано од сокле ка кордонском венцу, интензитет распадања је највећи у најнижем, првом реду камених елемената сокле, да би потом значајно опадао са висином, што за последицу има потпуно очуване камене елементе са

буњастом површинском обрадом. У зони кордонског венца, међутим, интензитет распадања камених елемената поново достиже висок степен. У овој, највишој зони каменог дела фасаде, јавља се комадасто фрагментирање у форми одвајања мањих и већих фрагмената, што у значајној мери нарушава морфологију камених елемената венца (Сл. 74г). Недостају комади неправилне форме са губитком каменог материјала укупне запремине преко 500 cm<sup>3</sup> (интензитет aO<sub>5</sub>; Сл. 74г).

Друга група оштећења - *деколорација/наслаге*, мапирана је на споменику културе Народном музеју у облику *запрљаности*, као последица нагомилавања прашине и других честица из атмосфере (pI).



Слика 74. Форме распадања керсантита уграђеног у фасаде зграде Народног музеја: а) љускаста (лево) и зрнаста дезинтеграција; б) љускасто и комадасто распадање; в) љускаста дезинтеграција; г) комадасто фрагментирање

Трећа група оштећења - *одвајање*, манифестује се у виду љуспасте дезинтеграције (mF), љускања (gS) услед последица површинске обраде штоковањем и зрнасте дезинтеграције (Gg).

Према морфолошким карактеристикама љускасто раслојавање се одликује плочастим одвајањем површинског слоја каменог блока. Дебљина површинске љуске (коре) варира од 1-4 mm. Према интензитету раслојавања разликују се елементи са високим степеном оштећења где је површинска љуска у потпуности већ одвојена, а новоотворена површина подлеже даљем временском пропадању. Такође су присутни и камени елементи са очуваном површинском љуском, у потпуности или делимично, али која је у значајној мери физички одвојена од остатка каменог блока (Сл. 74а). Љускасто распадање је карактеристично за камене елементе са штокованом видном површином. Наведена врста површинске обраде мења природна физичка својства камена (порозност и упијање воде) што истовремено утиче и на смањење отпорности према агресивном деловању воде/влаге, соли и мрза. Наведеним обликом површинске обраде, на камену се још пре његове уградње, ствара механички ослабљени површински слој. Тако порозан слој током времена, под агресивним утицајем средине, губи кохезиону везу са остатком камена омогућавајући дуже задржавање влаге/воде у плитком подповршинском



делу. Након одвајања површинског слоја, новоотворена површина подлеже даљој љуспасто-зрнастој дезинтеграцији. Величина љуспи варира у mm-cm димензијама док се зрнаста дезинтеграција манифестује грануларним распадањем и губитком зрна величине до неколико милиметара (Сл. 74в). Јавља се на свим новоотвореним површинама, али и угаоним деловима елемената иницирајући евидентно заобљавање првобитно оштрих углова и ивица камених елемената. Интензитет наведених облика физичке разградње је променљив.

## 12.5. ГРАДСКО ПРАВОБРАНИЛАШТВО (Тиршова 3) ЗГРАДА НАЧЕЛСТВА СРЕЗА ВРАЧАРСКОГ

У изградњи објекта грађеног пре 116 година керсантит је употребљен за израду унутрашњег централног степеништа и спољашњег приступног степеништа (Сл. 75). Оваква примена керсантита у ентеријеру представља реткост и пружа могућност поређења разлика у начину пропадања камена у контролисаним константним условима и у спољашњој средини где је изложен физичко-хемијском деловању атмосферилија.

Визуелним прегледом стања степеништа утврђен је различит степен физичке деструкције на унутрашњим и спољашњим степеницима која се манифестује следећим групама оштећења: губитак каменог материјала (дубинско распадање, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере, обојење-хроматске промене, обојена кора), одвајање (зрнаста дезинтеграција и љуспање, љускање), пукотине.



Слика 75. Градско правобранилаштво: а) спољашње приступно степениште; б) унутрашње централно степениште

Прва група оштећења - губитак каменог материјала:

### 1. Спољашње степениште:

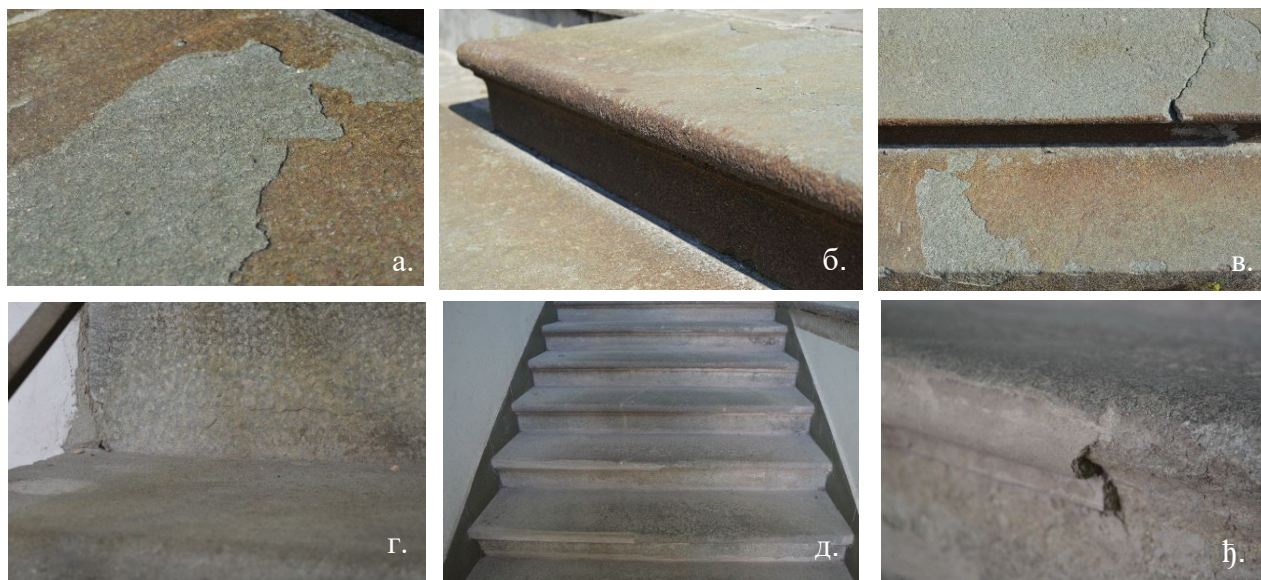
Оштећења се манифестују у облицима дубинског распадања, рељефног и комадастог распадања. Дубинско распадање је високог интензитета, до четврте категорије оштећења (дубине до 1 cm; cW<sub>1-4</sub>) и регистровано је на хоризонталним површинама базишта и на чеоним површинама степеника (Сл. 76а). Јавља се на местима где су се коре одвојиле од површине камена (Сл. 76а) и обухвата до 50 % целокупне површине степеника изграђених од камена. Рељефно распадање се јавља у виду заобљавања ивица степеника. Присутно је у категорији оштећења до дубине од 0,5 cm дубине (Ro<sub>1-3</sub>; Сл. 76б). Од присутних форми распадања из прве групе оштећења, присутно је и комадасто распадање, најчешће као последица конструкционих фактора (bO). Недостатак фрагмента неправилних форми јавља се са губитком каменог материјала укупне запремине 250- 500 cm<sup>3</sup> (интензитет aO<sub>4</sub>; Сл. 76в).

### 2. Унутрашње централно степениште:

Оштећења која се појављују на унутрашњим степеницама, иако у истим формама, јављају се у изразито слабијем интензитету него на спољашњим степеницама (Сл. 76г). Најинтензивнија су на почетном краку степеништа због највеће фреквенције кретања корисника, док интензитет оштећења опада са спратном висином. Дубинско распадање је ниског интензитета



и појава је забележена на неким деловима хоризонталних површина-газиштима и ретко на чеоним површинама степеника (Сл. 76г дубине до 1 cm; cW<sub>1-2</sub>). **Рељефно распадање** се јавља у виду заобљавања ивица степеника. Присутно је у категорији оштећења до дубине од 0,5 cm дубине (Ro<sub>1-4</sub>; Сл. 76д). **Комадасто распадање** се ретко уочава на ивичним деловимагазишта као последица конструкционих фактора и антропогеног утицаја (bO/aO). Недостатак фрагмента неправилне форме је са губитком каменог материјала укупне запремине 10- 250 cm<sup>3</sup> (интензитет aO<sub>1-3</sub>; Сл. 76ђ).



Слика 76. Прва група оштећења-губитак каменог материјала на објекту Градског правобранилаштва: а-в спољашње степениште; г-ђ унутрашње степениште; а) дубинско распадање услед одвајања љуске примарно настале површинском обрадом; б) рељефно распадање-заобљавање; в) комадасто распадање; г) дубинско распадање малог интензитета; д) рељефно заобљавање ивицегазишта степеништа; ђ) комадасто распадање на ивичним деловимагазишта

Друга група оштећења - **деколорација/наслаге**, мапирана је на објекту Градског правобранилаштва у облику **обојења** (Dc), **запрљаности** (pI), **колонизације вишим биљкама** (Vh) и **обојених кора** (fkC) које прате морфологију камена и последица су површинске обраде. Оштећења мапирана у овој групи доминантно су присутна на спољашњим степеницама испред улаза у објекат.

Обојење (Сл. 77а) и обојена кора (Сл. 77г) су у највишем степену интензитета које се оцењује као високо. Запрљаност је присутна на оба степеништа у ниском интензитету (Сл. 77б). Колонизација вишим биљкама је спорадична, зависи од годишњих доба и јавља се у спојницама између камених блокова и на тротоару (Сл. 77в).

Трећа група оштећења - **одвајање**, манифестује се у виду љуспања (mF), одвајања обојене коре која мења површину камена (fkK) и зрнасте дезинтеграције (Gg).

Љуспање се уочава на хоризонталнимгазиштима најфреквентнијег дела степеништа (mF<sub>1</sub>; Сл. 78а). Обојене коре су карактеристична појава на каменим блоковима керсантита који је био изложен утицају атмосферилија. Начин површинске обраде штоковањем изазвао је појаву њиховог одвајања у интензитету од ниског до средњег са масом одвојеног материјала од 10-50% површине (fkK<sub>1-2</sub>; Сл. 78б). Зрнаста дезинтеграција је присутна на деловима степеника на којима је дошло до примарног оштећења узрокованог љуспањем или одвајањем обојених кора. Ниског и средњег је интензитета (Gg<sub>1-2</sub>; Сл. 78а, в).



Слика 77. Форме распадања друге групе оштећења – деколорација/наслаге: а) обојење; б) запрљаност; в) колонизација вишим биљкама; г) обојена кора



Слика 78. Форме распадања треће групе оштећења – одвајање: а) љуспање; б) одвајање обојене коре која мења површину камена; в) колонизација вишим биљкама; г) зрнаста дезинтеграција и одвајање обојене коре



Четврта група форми распадања јесу **пукотине**. Присутне су на спољашњим степеницима и не прате структуру камена ( $vL$ ). У зависности од броја, положаја, дужине и ширине, пукотине на објекту су у распону интензитета  $vL_{1-2}$ , (Сл. 79).



Слика 79. Пукотине: а) пукотина на степенику; б) увеличан детаљ



## 12.6. ОСНОВНА ШКОЛА КРАЉ ПЕТАР ПРВИ

Као јавни објекат у сталној употреби, школа је редовно одржавана па су оштећења која се појављују на камену последица вишедеценијске изложености утицајима атмосферилија (Сл. 80а). Макроскопском опсервацијом објекта констатоване су следеће групе оштећења: губитак каменог материјала (дубинско распадање, рељефно и комадасто распадање), деколорација/наслаге (запрљаност честицама атмосфере, птичјим изметом, микробиолошке колоније, присуство виших биљака, коре), одвајање (зрнаста дезинтеграција у грус и љуспање) и пукотине независне од структуре камена.



Слика 80. ОШ „Краљ Петар I“: а) општи изглед; б) запрљаност изазвана антропогеним утицајем; в) форме деградације на оградном зиду; г) заобљавање и комадасто распадање на степеништу; д) комадасто распадање ивичних профила; е) дубинско распадање и љуспање; ж) заобљавање, запрљаност и дубинско распадање на оградном зиду

Прва група оштећења - **губитак каменог материјала** манифестује се у облицима дубинског распадања, рељефно и комадасто распадање. **Дубинско распадање** се јавља на вертикалним површинама услед обраде штоковањем (Сл. 80ж, е). Интензитет ове индивидуалне форме је од  $cW_{1-3}$ . Рељефно распадање - заобљавање је карактеристично на степеницима али и на профилима базе оградне (Сл. 80в, ж). Заступљено је до интензитета  $Ro_4$ . Присутно је и на

ивичним деловима степеништа као последица дугогодишње експлоатације (Сл. 80г). Комадасто распадање се јавља као последица антропогених и непрепознатљивих фактора до интензитета  $\text{bO}_2$  (Сл. 80г, д).

Друга група оштећења - *деколорација/наслаге* обухватила је облик **запрљаности**, као последицу нагомилавања прашине и других честица из атмосфере (pI; Сл. 80в), запрљаност услед антропогеног утицаја која је последица вандализма али и неадекватних интервенција у виду фарбања целих површина блокова (aIз; Сл. 80б), деколорацију (Dc; Сл. 80в), колонизацију нижим биљкама (Vi; Сл. 80д), тамне коре (dkC; Сл.80в).

Трећа група оштећења - *одвајање*, манифестује се у виду љуспања (mF), одвајања тамне коре која мења површину камена (diK) и зрнасте дезинтеграције (Gg; Сл. 80в, њ).



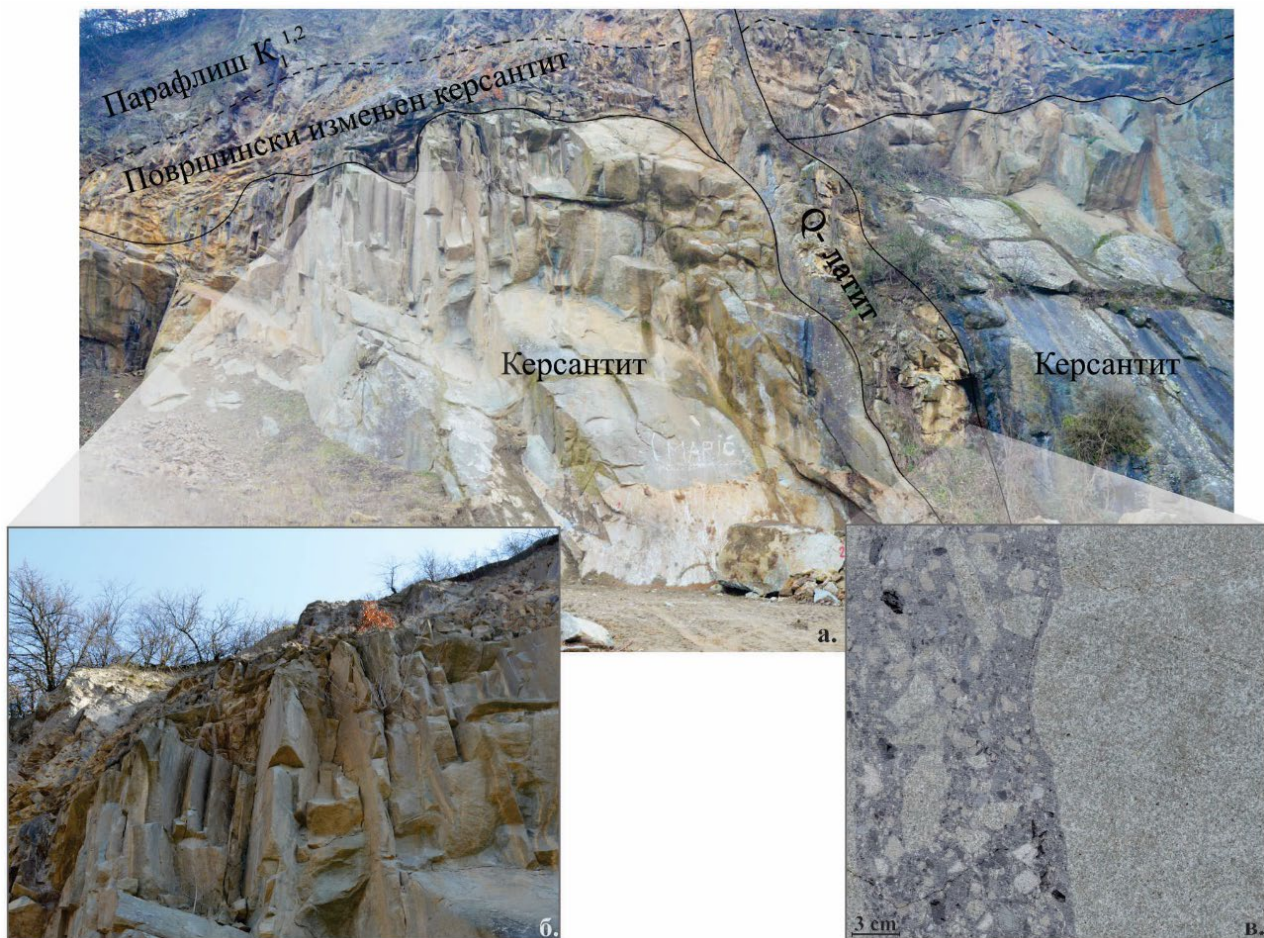
## 13. ПЕТРОГРАФСКА СВОЈСТВА КЕРСАНТИТА

### 13.1. КЕРСАНТИТ ТЕШИЋА МАЈДАНА

Каменолом Тешића мајдан карактерише се скоро вертикалним одсеком висине око 30 m, врх каменолома је на коти 186,28 m, док се подножје налази на коти 156,56 m. Откривена стенска маса је дужине око 200 m, са правцем пружања SZ – ЈИ (Сл. 81a). Северозападну границу стенске масе маркира раседна зона дуж које је дошло до измене керсантита и околних стена, док је јужна граница означена постепеним исклињавањем тела керсантита. Источна граница није доступна непосредном опажању обзиром да је терен потпуно покривен.

Стенска маса паралелопипедног лучења је системом раседа и паралелних пукотина и прслина испресецана у блокове (Сл. 81б). Јасно се уочавају три главна раседа: први, већ поменути маркира контакт са околним флишним седиментима на северозападној граници тела; други расед може се пратити целом дужином каменолома, а одваја површински измењене керсантите од релативно компактних; у трећој раседној зони је утиснута кварцлатитска жица, променљиве дебљине (у просеку око 3 m), пружања SI – ЈЗ. Са обе стране кварцлатитске жице, запажају се контактне брече тамносиве боје (Сл. 81в).

На основу степена алтерације и тектонске издробљености стенске масе, јасно се могу уочити две зоне керсантита: прву зону чине површински измењени, дезинтегрисани, распаднути, керсантити жутосмеђе до сиве боје, дебљине 3-8 m, док другу зону карактерише релативно компактна стена испод површински измењених керсантита (Сл. 81a).



Слика 81. а) Стенска маса керсантита каменолома Тешића мајдана са издвојеним зонама површински распаднутог и компактног керсантита и утиснутом кварцлатитском жицом; б) паралелопипедно лучење стенске масе и системи паралелних пукотина и прслина; в) контакт брече и керсантита



Керсантит је меланократна стена, сиве, сиво-зелене до зелене боје, масивне текстуре и хетерогених структурних карактеристика. Стенска маса је неравномерно зрнасте структуре, односно према величини зрна јасно се разликују два варијетета керсантита:

- **крупнозрни варијетет керсантита** заступљен у централном и југоисточном делу каменолома; карактерише се макроскопски уочљивим крупним лискама биотита смеђе боје, као и често присутним гнездастим нагомилањима лиски биотита величине и до 10 mm када стена задобија елементе порфиرويدне структуре. Поред лиски биотита, у овом варијетету керсантита се макроскопски уочавају зрна фелдспата, беле боје, величине до 3 mm. Поред наведених минерала спорадично се уочава и присуство зрна пироксена црне боје, значајно мањих димензија од претходна два поменута главна минерала. Положај и међусобна изукрштаност призматичних зрна фелдспата у комбинацији са лискама биотита и пироксеном, одликују керсантит и маркантно офитском структуром која у комбинацији са зеленом бојом представља важно декоративно својство овог литотипа (Сл. 82а).
- **ситнозрни варијетет керсантита** заступљен у северозападном делу каменолома, односно у ободним деловима стенске масе; карактерише се сивом до тамносивом бојом и уједначеном ситнозрнастом структуром; за разлику од претходног варијетета, лиске биотита макроскопски нису видљиве, док се бела зрна фелдспата димензија до 1 mm теже уочавају (Сл. 82б).

Границе између поменутих варијетета су поступне и често са градијацијом у величини зрна. Променљиво учешће и заступљеност главних минералних врста и варијабилна структурна веза међу минералним конституентима, чини керсантит Тешића мајдана стеном хетерогеног састава и склопа.



Слика 82. Макроскопски изглед керсантита; а) крупнозрни варијетет офитске структуре са уочљивим лискама биотита смеђе боје, зрнима плагиокласа беле до сиве боје и призматичним зрнима пироксена црне боје (узорак 7ТМ); б) ситнозрни варијетет керсантита (узорак 1ТМ)

Микроскопским испитивањем уочено је да се оба варијетета одликују присуством истих главних, акцесорних и секундарних минерала, само је њихов однос варијабилан, као и степен алтерације примарних минерала. Главни минерални састојци су плагиоклас (албит), биотит и моноклинични пироксен (аугит), акцесорни састојци су металични минерали (магнетит, пирит), апатит, циркон, и сфен, док су секундарни минерали: хлорит, калцит, пренит, минерали глина и епидот. Спорадично се јављају и реликти оливина, зрна ортокласа, док су серпентин и леукоксен као секундарни минерали варијабилно присутни.

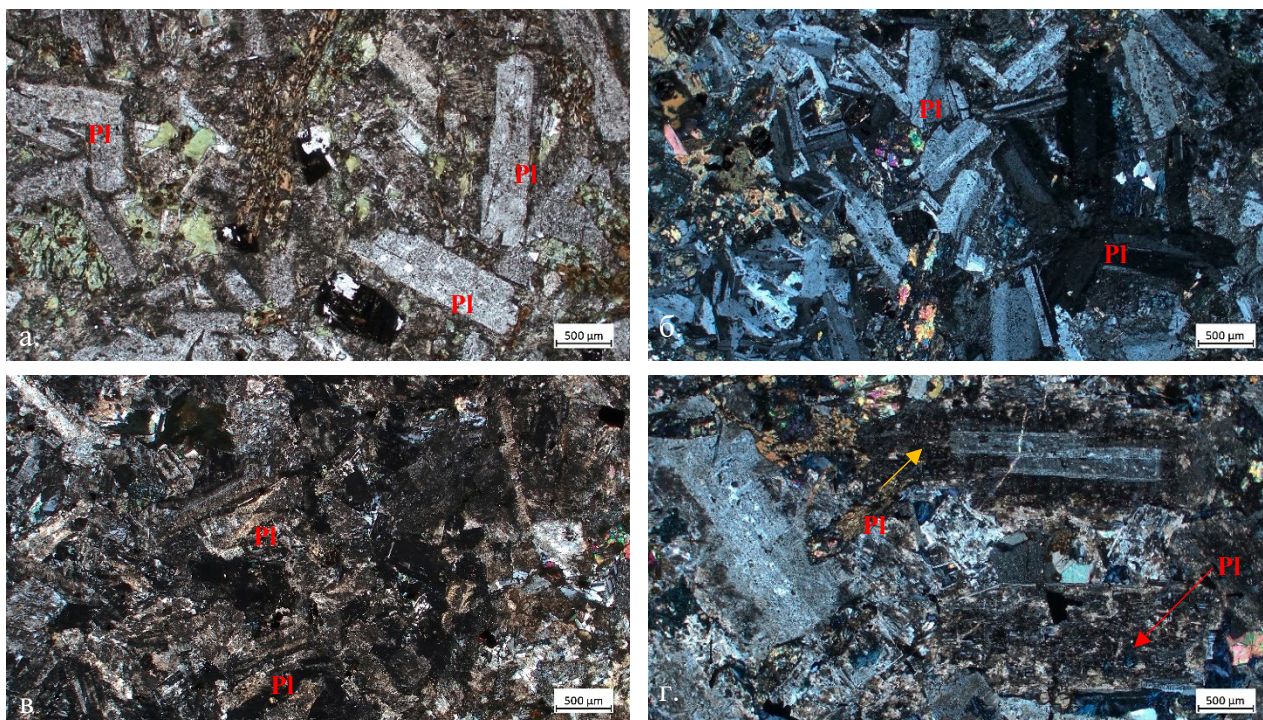
### 13.1.1. Крупнозрни варијетет керсантита

Крупнозрни варијетет керсантита је изграђен од следећих главних минерала: плагиокласа - албита, биотита, моноклиничног пироксена (аугита), и мање заступљених оливина и



ортокласа. Као акцесорни минерали јављају се металични минерали, сфен и апатит, док су секундарни минерали: хлорит, калцит, епидот, леукоксен и минерали глина.

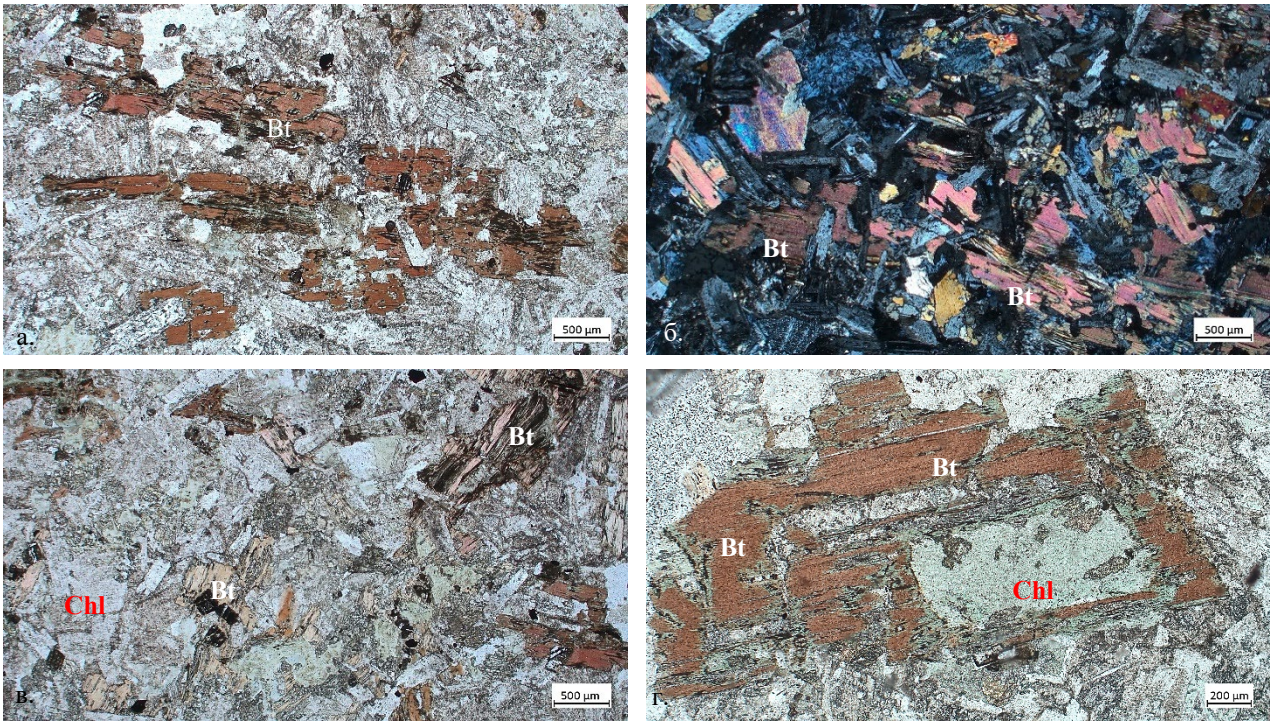
**Плагиоклас** је најзаступљенији главни минерал у стени (Сл. 83а). Јавља се у идиоморфним до хипидиоморфним, полисинтетички ближњеним приткастим зрнима албита, равномерно распоређеним у маси стене. Величина призматичних форми зрна плагиокласа варира од 0,4 x 0,1 до 1,5 x 0,5 mm. Притке плагиокласа су често изукрштане што стени даје карактер офитске структуре (Сл. 83б). Зрна плагиокласа су ретко свежа, најчешће су близне индивидуе са потпуно „замућеним“ површинама што указује на аргилитизацију у различитом степену (Сл. 83в). Зрна плагиокласа су осим глиновите алтерације, редовно захваћена и калцитизацијом у различитом степену (Сл. 83г). Она је присутна или само у почетној фази када се близне ламеле још јасно уочавају или у потпуности преображава плагиоклас, те се само по очуваној кристалној форми закључује о његовом присуству. У изградњи плагиоклас учествује са око 40 вол. % стене.



Слика 83. Микрофотографије плагиокласа у крупнозрном керсантиту: а) призматични хипидиоморфни кристали плагиокласа, узорак 5ТМ, PPL; б) офитска структура, узорак 5ТМ, XPL; в) „замућени“ аргилитисани кристали плагиокласа (PI), узорак 4аТМ, XPL; г) различити степен алтерације плагиокласа – аргилитисане ободне зоне плагиокласа (жута стрелица) и потпуно аргилитисано и калцитисано зрно плагиокласа (црвена стрелица), узорак 10ТМ, XPL; Легенда ознака: PI – плагиоклас

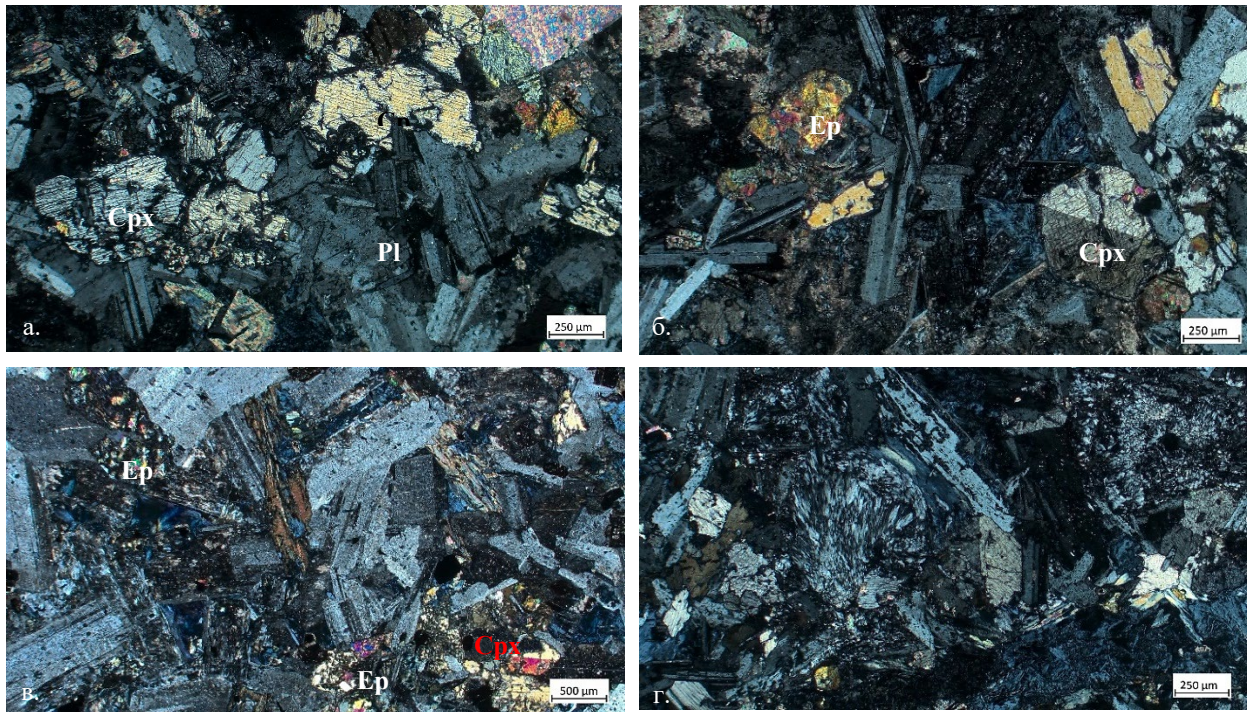
**Биотит** је најзаступљенији бојени минерал у крупнозрном керсантиту. Јавља се у форми издужених лиски, најчешће дужине око 1-2 mm (Сл. 84а), максималне дужине до 5 mm. Овај главни бојени минерал се у керсантиту појављује двојако. Присутан је у виду крупних лиски израженог полихроизма од бледо смеђе до тамно смеђе боје, и често се уочавају појкилитски уклопљени идиоморфни кристали плагиокласа и акцесорног апатита, што стени даје и елементе појкилитске структуре (Сл. 84а, б). Такође се јавља и у искрзаним, локално (тектонски) повијеним, искиданим и испраним лискама (Сл. 84в). Када се јавља у искрзаним испраним лискама, полихроизам је одсутан и редовно су присутна издвајања металичних минерала дуж равни цепљивости као и трансформација у секундарни хлорит (Сл. 84г). Карактеристика биотита јесте присутност свих фаза алтерације минерала, од почетне фазе трансформације и издвајања металичних прашкастих минерала у ивичним зонама, до крајње трансформације биотита у агрегате секундарних минерала, хлорита, епидота, калцита и металичних минерала. Биотит у стени учествује од 25 до 30 вол. %.





Слика 84. Микрофотографије биотита у крупнозрном керсантиту; а) Крупно раслојено зрно биотита, узорак 6TM, PPL; б) биотит у узорку 11TM, XPL; в) ситна испрана зрна биотита, узорак 6TM, PPL; г) интензивна хлоритизација у средишту лиске биотита, узорак 8TM, PPL; Легенда ознака: Bt – биотит; Chl - хлорит

**Моноклинични пироксен** је у поређењу са биотитом мање заступљен бојени састојак у стени. Јавља се у призматичним хипидиоморфним до идиоморфним кристалима, понекад ближњеним, бледозеленкасте боје или безбојан.



Слика 85. Микрофотографије плагиокласа и пироксена у крупнозрном керсантиту: а) хипидиоморфна алтерисана и испуцала зрна моноклиничних пироксена у узорку 8TM, XPL; б) идиоморфна до хипидиоморфна испуцала зрна моноклиничних пироксена, алтерација у епидот и калцит – узорак 8TM, XPL; в) реликти пироксена трансформисани у агрегате епидота и калцита – узорак 10TM, XPL; г) серпентинисан оливин у крупнозрном керсантиту, узорак 11TM, XPL; Легенда ознака: Pl – плагиоклас; Cpx – моноклинични пироксен; Ep - епидот



Максималне димензије зрна пироксена су 1 x 0,5 mm, најчешће 0,5 x 0,1 mm. Зрна су свежа, али редовно испуцала (Сл. 85а, б). Такође су присутна и зрна пироксена алтерисана у хлорит и ситнозрнасте агрегате епидота (Сл. 85б, в). У поређењу са биотитом, зрна пироксена се чешће јављају као потпуно свежа, или само са калцитизацијом и хлоритизацијом ободних делова зрна. У изградњи стене учествује са око 15 % вол.

**Оливин** је делимично до потпуно замењен сивим, листастим и влакнастим серпентином (Сл. 85г), па се очувани реликти овалних зрна оливина уочавају веома ретко. Секундарни серпентин може се видети и на маргинама кристала пироксена. Садржај примарног оливина је око 3 % вол. стене.

**Ортоклас** је присутан у хипидиоморфним, ретко свежим, најчешће потпуно аргилитисаним зрнима услед чега се тешко разликује од плагиокласа. Учествује у изградњи стене са мање од 3 %.

**Апатит** се јавља у форми идиоморфних, издужених, танких игличастих кристала, најчешће димензије 0,1 - 0,2 mm. Јавља се појкилитски уклопљен у кристалима плагиокласа, биотита или неправилно распоређен у маси стене (Сл. 86а).

**Акцесорни металични минерали** се јављају у зрнастим или прашкастим формама расутим у маси стене (Сл. 86б, в). Зрна металичних минерала су најчешће алотриоморфна и хипидиоморфна али су уочене и идиоморфне форме које указују на присуство пирита (Сл. 86б). Димензије зрна су најчешће од 0,2 до 0,5 mm у пречнику. Металични минерали се често јављају и у форми „сагенита“, односно имају карактеристичну сагенитску решетку (Сл. 86б), када представљају секундарне продукте по биотиту.

**Хлорит** је најзаступљенији секундарни минерал керсантита. Јавља се у лискама бледо зелене боје, без полихроизма, или као ситнољуспаст агрегат када интерферира у сиво-плавој боји. Редовно је присутан по ободу лиски или дуж равни цепљивости биотита (Сл. 86ђ) као и удружен са калцитом и епидотом као продукт алтерације пироксена (Сл. 86ж). Такође се јавља у љуспастим агрегатима или млазевима који запуњавају међупростор главних минерала (Сл. 86е). Садржај хлорита у стени варира око 3 вол. %.

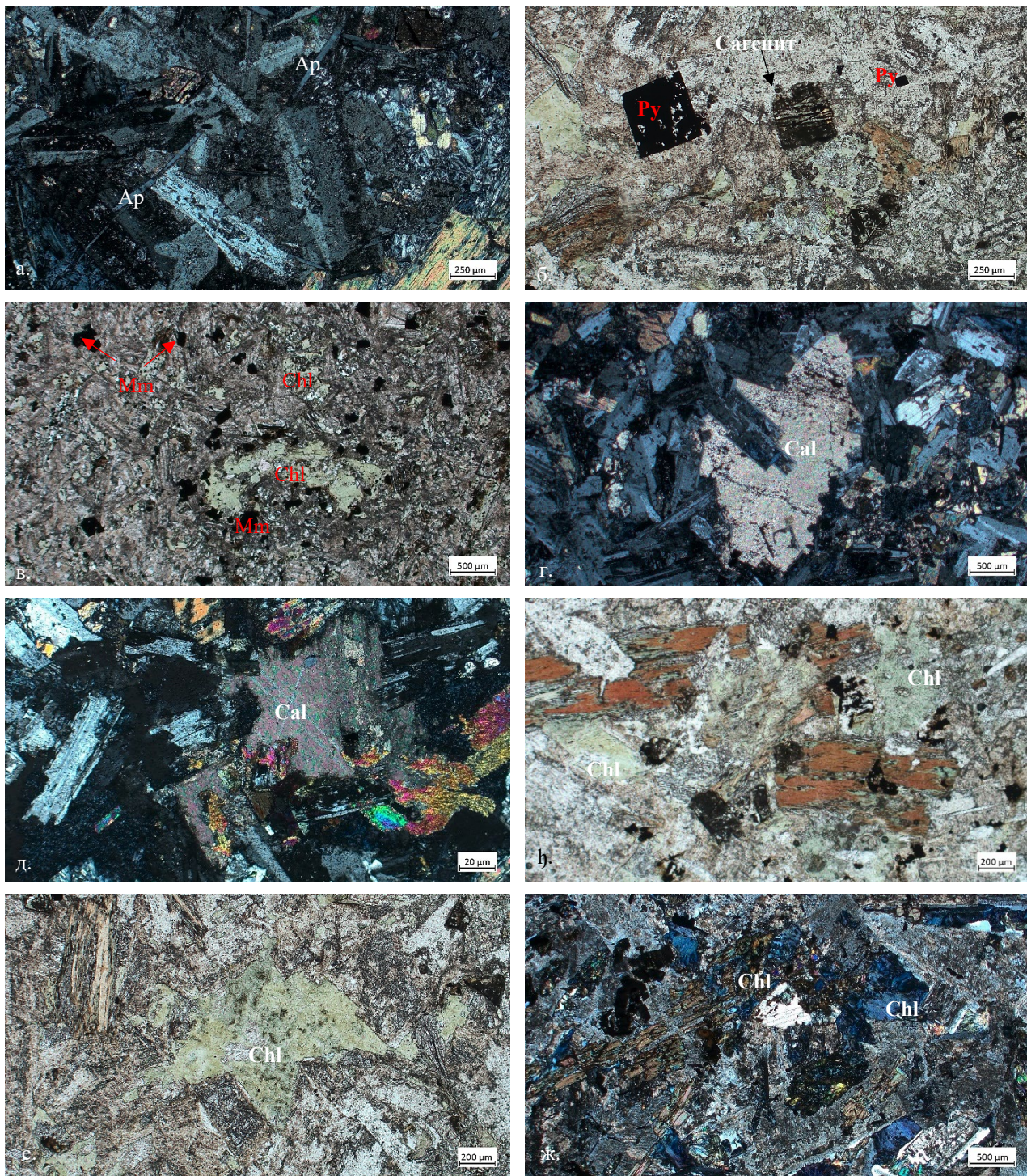
**Калцит** је уз хлорит, најдоминантнија секундарна фаза у керсантиту. Јавља се у различитим формама што указује на његово вишеструко порекло. Присутан је у зрнима варијабилних димензија, удружен са хлоритом и епидотом када је концентрисан у ободним деловима бојених минерала, или плагиокласа (Сл. 86г, д). Међутим, калцит је редовно присутан и у виду крупних кристала, са јасно уочљивом ромбодарском цепљивошћу када гради неправилна „гнезда“ у маси стене и запуњава порни простор и микропрслине у стени (Сл. 86г, д). Садржај калцита у стени варира од 5 до 8 вол. %.

**Епидот** се јавља у ксеноморфним зрнима величине око 0,2 mm у пречнику или у виду ситнозрних агрегата. Настао је алтерацијом пироксена и често је сконцентрисан у ободним зонама овог минерала (Сл. 85б, в). Садржај епидота у стени варира од 1 до 2 вол. %.

**Леукоксен** је присутан у алотриоморфним агрегатима најчешће уклопљен у биотиту и пироксену. Резултат је трансформације акцесорног сфена.

**Микроструктура** стене је офитска до делимично зрнаста. Офитску структуру карактеришу идиоморфна приткаста зрна плагиокласа, међусобно изукрштана, са бојеним главним минералима који испуњавају међупростор плагиокласа. Међутим, у појединим деловима керсантита, не може се уочити горе поменута оријентисаност зрна плагиокласа када структура губи елементе офитске и може се окарактерисати као зрнаста структура.





Слика 86. Микрофотографије: а) издужени идиоморфни кристали акцесорног апатита у узорку 8ТМ, ХРЛ; б) пирит и сагитна решетка, узорак 7ТМ, РРЛ; в) алотриоморфна зрна хлорита и металичних минерала, узорак 1ТМ, РРЛ; г) калцит уклопљен око зрна плагиокласа, узорак 8ТМ, ХРЛ; д) „гнезда“ калцита која испуњавају простор између минерала, узорак 9ТМ, ХРЛ; е) хлорит који запуњава међупростор главних минерала, узорак 7ТМ, РРЛ; ж) хлорит дуж равни цепљивости биотита, узорак 7ТМ, РРЛ; з) хлорит који запуњава међупростор главних минерала, узорак 7ТМ, РРЛ; њ) хлоритизација биотита - узорак 10ТМ, ХРЛ; Легенда ознака: Chl – хлорит; Мт – металични минерали; Cal – калцит; Ap – апатит; Py - пирит

### 13.1.2. Ситнозрни варијетет керсантита

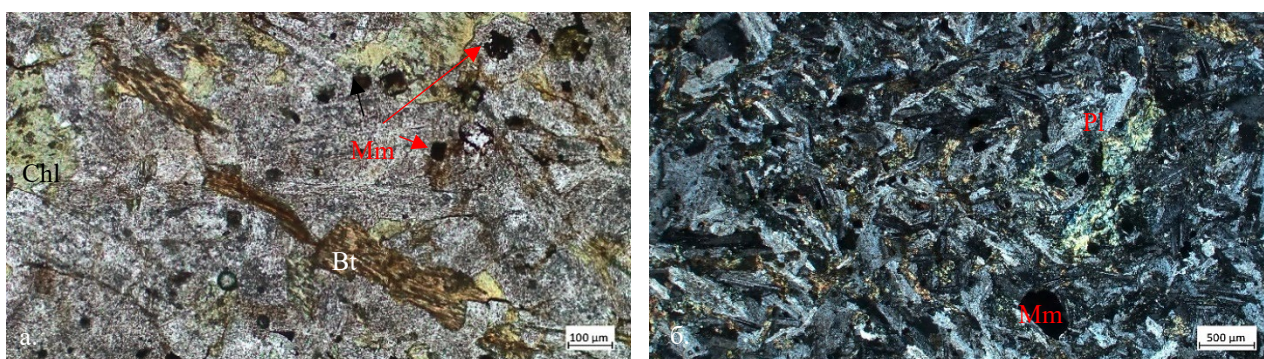
Стена је изграђена од биотита, плагиокласа, и моноклиничног пироксена као главних минерала. Акцесорни минерали су апатит и металични минерали, док су секундарни калцит, хлорит и епидот.



**Плагиокласи** се јављају у виду хипидиоморфних, издужених зрна, призматичне форме најчешће величине око 0,3 x 0,1 mm. Зрна су међусобно изукрштана док су у међупростору смештени бојени минерали градећи микроофитску структуру. Зрна плагиокласа се карактеришу полисинтетичким ближњењем, често су двојно ближњена што је тешко уочљиво услед изражене аргилитизације зрна (Сл. 87б). Садржај плагиокласа у стени је до 60 вол. %.

**Биотит** се јавља у мањој количини у односу на крупнозрни варијетет. Присутан је у лискама максималне дужине до 0,1 mm. Лиске показују слаб полихроизам у нијансама светло смеђе до смеђе боје. Лиске су углавном алтерисане, потпуно „испране“ или интензивно трансформисане у хлорит и металичне минерале. Испрани биотит карактеришу безбојне лиске са ретко сачуваном примарном бојом (Сл. 87а), док су хлоритисане лиске зелене боје, а интерферирају у нијансама плаве боје. Садржај биотита у стени је до 15 вол. %.

**Моноклинични пироксен** је подређен бојени састојак у стени. Јавља се у зрнима хипидиоморфног и алотриоморфног облика, неуједначене величине, дужине око 0,1 mm и смештен између зрна плагиокласа. Зрна су слабо испуцала, и најчешће трансформисана у агрегат хлорита, калцита и епидота. Садржај је око 15 % вол. стене.



Слика 87. Микрофотографија изгледа ситнозрног керсантита: а) испране и хлоритисане лиске биотита – узорак 2ТМ, PPL; б) аргилитисана зрна плагиокласа – узорак 2 ТМ, XPL; Легенда ознака: Pl – плагиоклас; Chl – хлорит; Bt – биотит; Mm – металични минерали

**Апатит** је присутан у издуженим, танким кристалима, дужине око 0,2 mm, најчешће уклопљен у биотиту.

**Металични минерали** се јављају у изометричним до правилним формама које указују на могуће присуство пирита. Величина зрна је максимално до 0,1 mm или се појављују као прашкасте форме расуте у маси стене (Сл. 87а, б).

Садржај акцесорних фаза не прелази 3 вол. % стене.

**Хлорит** се јавља као секундарни састојак настао на рачун биотита. Осим поменутог начина појављивања, присутан је и у алотриоморфном облику када испуњава међупростор главних кристала који граде офитску решетку (Сл. 87а).

**Калцит** је продукт алтерације плагиокласа и делом бојених минерала, али је присутан и у виду накнадно принетог неокалцита који испуњава шупљине и пукотине у стени.

**Микроструктура** стене је микроофитска.

Генерално, заједничка карактеристика свих испитиваних узорака керсантита јесте интензивна алтерација примарних минерала која се манифестује следећим процесима: албитизацијом примарних плагиокласа, хлоритизацијом и епидотизацијом биотита и пироксена и свеукупном калцитизацијом.



### 13.2. ПЕТРОГРАФСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ КЕРСАНТИТА УГРАЂЕНОГ У ИСПИТИВАНЕ ОБЈЕКТЕ

Макроскопском опсервацијом фасада односно камених елемената/блокова одабраних објеката констатовано је да су сви изграђени од крупнозрног варијетета керсантита. За разлику од овог варијетета у каменолому Тешића мајдан где је боја хомогена и уједначена, на испитиваним објектима боја керсантита, као веома важно декоративно својство, условљена је, како врстом површинске обраде, тако и степеном површинског распадања (Сл. 88). Хомогена, примарна зелена боја керсантита очувана је само на елементима са полираним површинама и спорадично се запажа на јако деградираним каменим блоковима (Сл. 88а, б).



Слика 88. Хетерогеност боје керсантита уграђеног у објекте: а) полирани керсантит зелене боје на споменику Ђури Јакшићу; б) блокови зеленог керсантита у сокли споменика културе Класне лутрије у Београду; в) рустична обрада површина праћена процесима површинског распадања која је условила промену боје у нијансама од светло до тамно зелене, са појавом црних кора, објект Класне лутрије; г) обојене коре на Малом степеништу; д) обојене коре на објекту правобранилаштва



Рустична обрада површина праћена процесима површинског распадања условила је промену боје у нијансама од светле до тамно зелене (Сл. 88в). Интензитет хроматске промене боје у великој мери зависи од врсте процеса деградације тако да се тамна, скоро црна боја површине керсантита, приписује депонованим честицама чађи, прашине и аеросола из ваздуха (познате као „црне коре“; горње половине блокова на Сл. 88в), док је наранцасто-црвено-браон боја површине керсантита, резултат акумулације оксида/хидроксида гвожђа, такође продукта површинског распадања (познате као „обојене коре“, Сл. 88г, д).

Обзиром да је у свим објектима уграђен крупнозрни варијетет керсантита, његов минерални састав и структурне карактеристике су јасно макроскопски видљиве, посебно на елементима у ентеријеру као и на полираним површинама (Сл. 89).



Слика 89. Макроскопски изглед уграђеног керсантита: а) степениште у објекту Класне лутрије; б) офитска структура на полираном керсантиту на споменику Ђури Јакшићу; в) гнездаста нагомилања биотита седефасте сјајности на Малом степеништу; г) неокалцитне беле жице видљиве у блоковима Малог степеништа; д) калцит са депонованим оксидима/хидроксидима гвожђа, споменик Јовану Скерлићу; њ) калцит потврђен бурном реакцијом са разблаженом хлороводоничном киселином

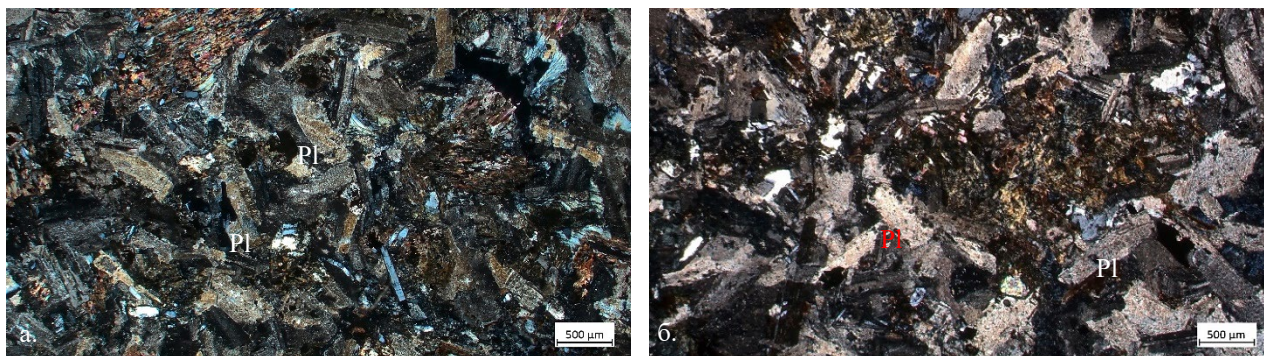


Положај и оријентација зрна фелдспата беле боје, величине до 3 mm, крупних лиски биотита смеђе до црне боје, величине и до 10 mm (Сл. 89а) и присуство пироксена црне боје мањих димензија, поред зрнасте структуре, дају керсантиту и обележје офитске структуре (Сл. 89б). Поред беле боје фелдспата, често се уочава светлозелена боја хетерогено распоређена у маси стене која вероватно потиче од присутног хлорита. За разлику од полираних површина у ентеријеру и екстеријеру, где је биотит углавном тамно смеђе боје, лиске овог минерала су на проучаваним интензивно деградираним површинама камених блокова Малог степеништа као и на другим објектима, светлосмеђе-бронзане боје, седефасте сјајности посебно изражене када се јавља у гнездастим нагомилањима (Сл. 89в). Ова хроматска промена последица је процеса површинског распадања тј. „испирања гвожђа“ из структуре поменутог минерала.

У свим испитиваним објектима уочава се испресецаност керсантита жицама беле боје (Сл. 89г). Дебљина жица је најчешће око 5 mm, ређе до 10 mm, а настале су испуњавањем пукотинских система керсантита неокалцитом. Када је поред калцита депонован и оксид/хидроксид гвожђа, жице задобијају окер-смеђу боју. Присуство калцита је потврђено бурном реакцијом са разблаженом хлороводоничном киселином (Сл. 89д, њ).

Керсантит испитиваних објеката је изграђен од следећих главних минерала: плагиокласа (албита), биотита и моноклиничног пироксена (аугита). Као акцесорни минерали јављају се металични минерали и апатит, док су секундарни минерали: хлорит, калцит, епидот, леукоксен и минерали глина.

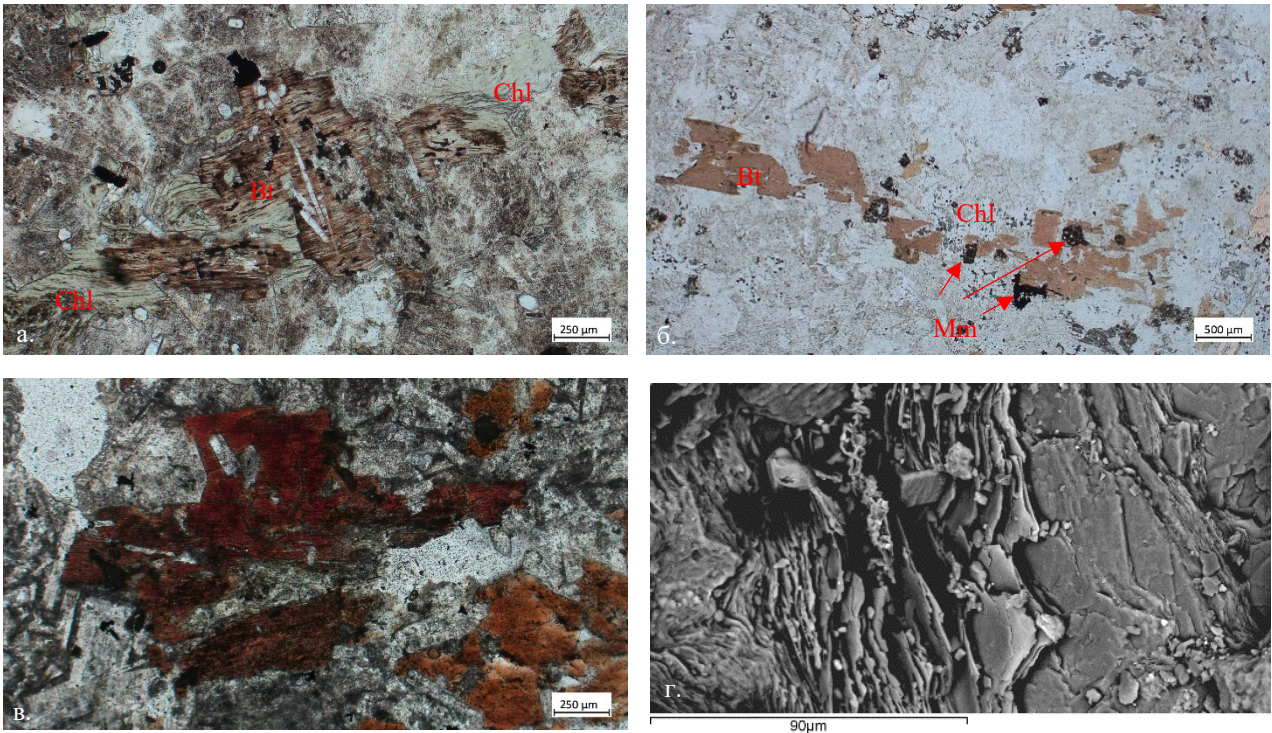
**Плагиоклас** се јавља у виду хипидиоморфних издужених призматичних зрна. Величина је варијабилна, али најчешће око 0,3 x 0,1 mm и 0,8 x 0,3 mm. Зрна плагиокласа се јављају у полисинтетички ближњеним кристалима, али су интензивним процесима алтерације зрна измењена, аргилитисана, замућена и калцитисана тако да се већина кристала може дефинисати као плагиокласи само на основу сачуване форме (Сл. 90а, б). Граде око 55 вол. % стене.



Слика 90. Микрофотографије керсантита уграђеног у објекте: а) замућени плагиокласи, узорак 2KL, XPL; б) трансформисани плагиокласи, неправилних ивица, узорак 1MS, PPL; Легенда ознака: Pl – плагиоклас

**Биотит** се јавља у лискама које су локално повијене, испуцале и дезинтегрисане. Лиске су дужине око 0,5 mm и јављају се изоловано као појединачне лиске хомогено распоређене у стени, али често граде и нагомилања која у пречнику достижу и до 5 mm. За разлику од биотита у керсантиту Тешића мајдана, лиске биотита показују нижи степен полихроизма у нијансама светлонанаранцасте до бледо смеђе боје. Ретко се јавља у свежим лискама, најчешће је испран, хлоритисан са честим нагомилањима металичних минерала у ободним зонама лиски или дуж равни цепљивости (Сл. 91а, б). Најчешће су лиске превучене скрамама оксида и хидроксида гвожђа што указује на ослобађање и мобилизацију гвожђа из биотита (Сл. 91в). Осим описаних оптичких карактеристика, на интензивно површинско распадање биотита и трансформацију у секундарне минерале, указује и морфологија лиски биотита, његово раслојавање, односно повећање растојања између појединачних лиски биотита што је доказано проучавањем на скенирајућем електронском микроскопу (Сл. 91г).





Слика 91. Микрофотографије биотита у узорцима са објекта: а) Лиска биотита, алтерисана, са видљивом трансформацијом у хлорит, узорак 2KL, PPL; б) дезинтегрисана лиска биотита, хлоритисана, са издвајањем металичних минерала на ободу, узорак 3MS, PPL; в) површина биотита превучена скрамом оксида и хидроксида гвожђа, узорак 2MS, PPL; г) SEM фотографија раслојавања – ексфолијације биотита са празним или делимично запуњеним простором између лиски, узорак 2MS; Легенда ознака: Chl – хлорит; Bt – биотит; Mm – металични минерали

**Моноклинични пироксен** се јавља у призматичним хипидиоморфним кристалима, понекад ближњеним, бледозеленкасте боје. Интерферира у жути и ружичастим бојама. Најчешће димензије зрна пироксена су 0,5 x 0,1 mm. Зрна су испуцала и вероватно првобитно трансформисана у амфибол који је потом алтерисан у хлорит и ситнозрнасте агрегате епидота, калцита и металичних минерала (Сл. 92).

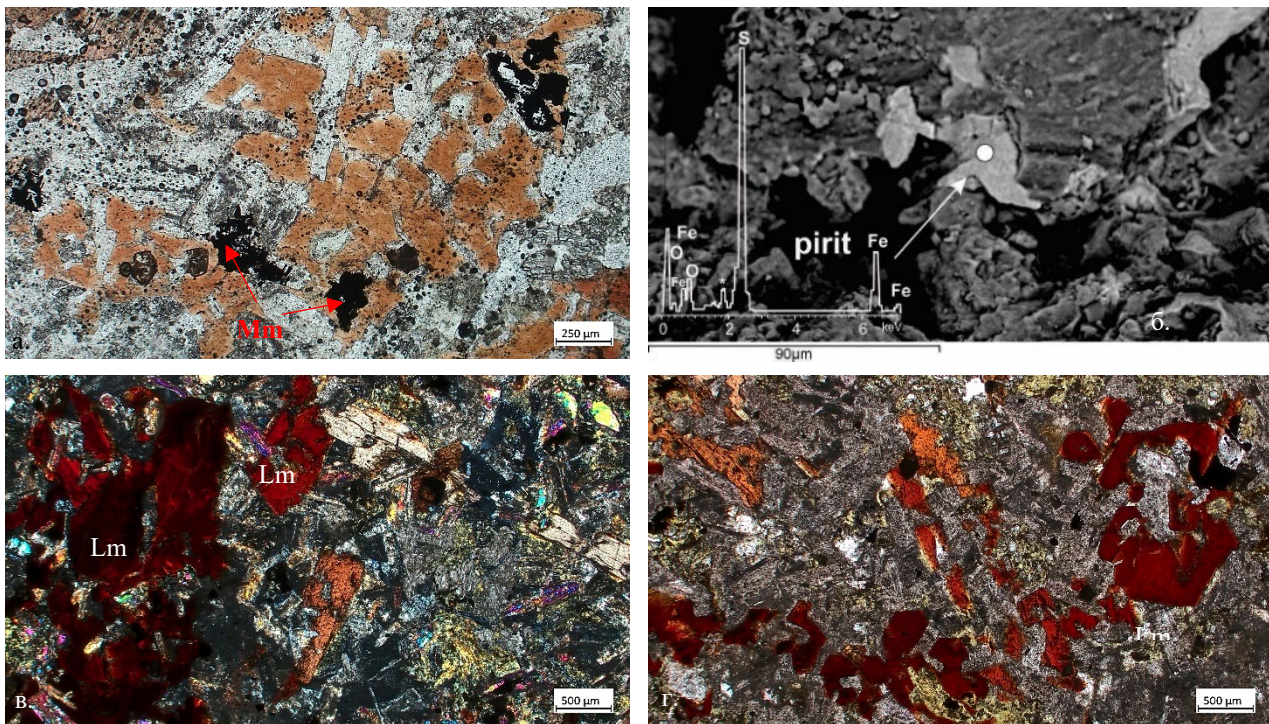


Слика 92. Микрофотографија пироксена, испуцалог, алтерисаног у хлорит и епидот, узорак 1KL, XPL; Легенда ознака: Chl – хлорит; Sp – моноклинични пироксен; Ep – епидот

**Апатит** се јавља у форми идиоморфних, издужених, танких игличастих кристала, најчешће димензија 0,1 – 0,2 mm. Зрна апатита су редовно уклопљена у биотиту (Сл. 93а).



**Металични минерали** се јављају као појединачна, идиоморфна до хипидиоморфна зрна дужине и до 0,1 mm (Сл. 91а, и 94б), али и у форми финозрнастих агрегата диспергованих у маси стене. Правилне индивидуалне форме металичних минерала указују на присуство пирита што је и потврђено испитивањем електронским микроскопом (Сл. 93б). Прашкasti металични минерали секундарног порекла су најчешће у асоцијацији са хлоритом и епидотом. Настали су као продукт алтерације бојених минерала (Сл. 93а). За разлику од керсантита у каменолому Тешића мајдану, у керсантиту испитиваних објеката редовно је присуство оксида/хидроксида гвожђа. Јавља се у виду лимонитских превлака хомогено распоређених по површинама бојених минерала, најчешће биотита (Сл. 93в, г). Депоновање по површини бојених минерала указује на интензивну површинску дезинтеграцију ових минерала и мобилност гвожђа из њихове кристалне решетке. Међутим, његово присуство делом потиче и од површинског распадања примарно присутних металичних минерала као што је пирит.



Слика 93. Микрофотографије: а) металични минерали распоређени у испуцалим лискама биотита и прашкasti металични минерали, узорак 2MS, PPL; б) SEM фотографија зрна пирита, узорак 8MS; в) нехомогено распоређен лимонит, узорак 11MS, PPL; г) лимонит у узорку површинске коре, узорак 10MS, PPL

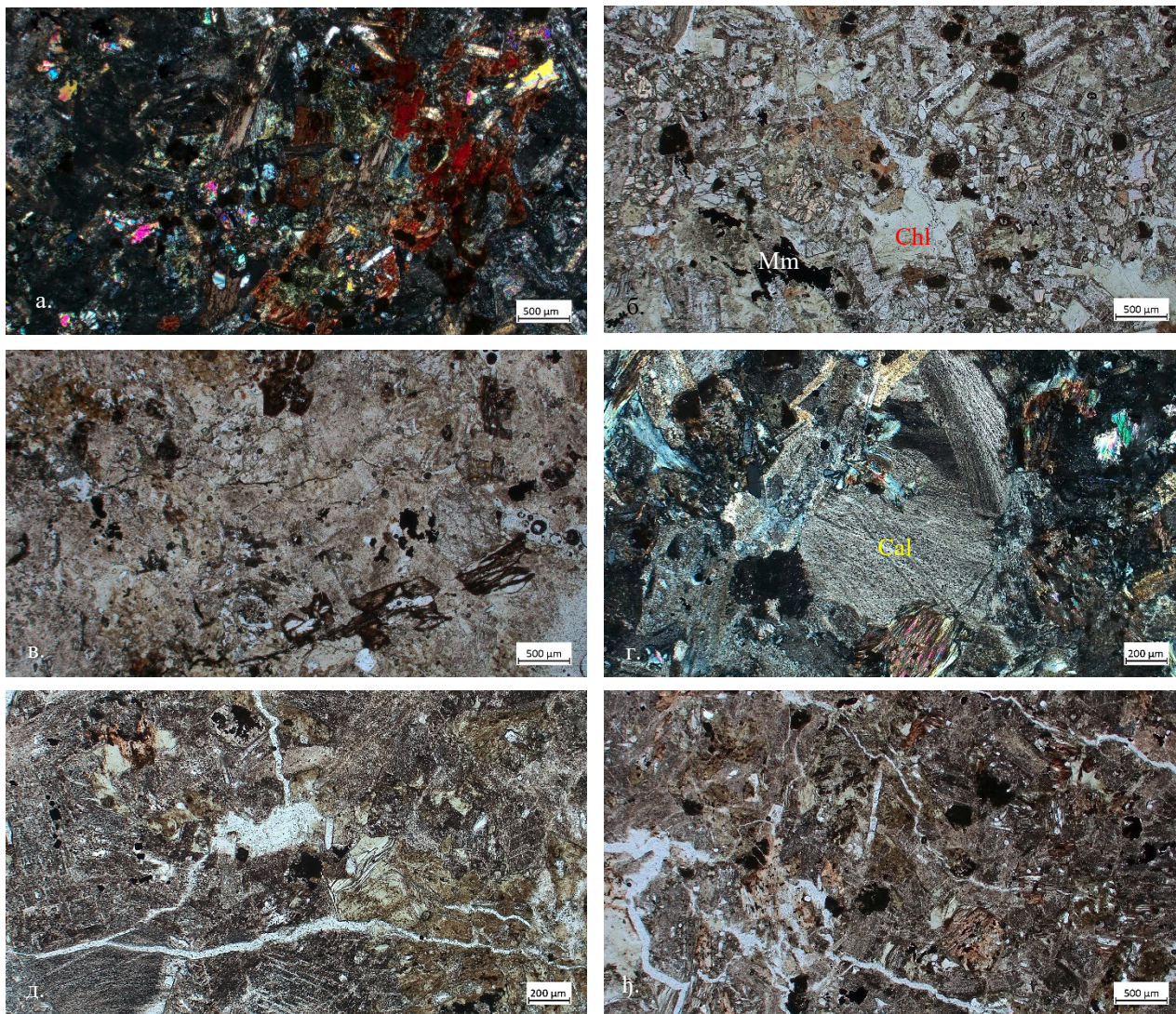
**Хлорит** се јавља у лискама бледо зелене боје или у ситнољуспастим агрегатима када испуњава међупростор главних минерала стене. Редовно је присутан по ободу лиски биотита (Сл. 91а). Такође је развијен дуж равни цепљивости или у потпуности замењује зрна примарних минерала на рачун којих је настао, када се јавља у асоцијацији са калцитом, епидотом и металичним минералима. Неретко запуњава међупростор главних минерала (Сл. 94б).

**Калцит** је поред хлорита најдоминантнији секундарни минерал у стени. Јавља се најчешће као ситнокристалasti продукт алтерације главних минерала (Сл 94в) или у виду крупних кристала који запуњавају порни простор у стени (до 10 mm у пречнику) (Сл. 94г). Често се јавља и као испуна микропрелина и пукотина које прожимају масу стене.

**Епидот** се јавља у виду зрна која достижу и до 0,3 mm у пречнику. Јавља се у нагомилањима или у виду самосталних зрна, најчешће удружен са осталим секундарним минералима, хлоритом и калцитом (Сл. 94а). Продукт је алтерације плагиокласа и пироксена.

Садржај секундарних минерала у уграђеним керсантитима варира од 10 до 20 вол. % стене.





Слика 94. Микрофотографије уграђеног керсантита: а) зрна епидота у асоцијацији са калцитом, хлоритом и металичним минералима – узорак 4MS, PPL; б) хлорит у међупростору главних минерала, узорак 1KL, PPL; в) интензивна калцитизација керсантита, узорак 14MS, PPL г) крупна зрна калцита, узорак 2KL, XPL; д) пукотине унутар компактне структуре са појавом већих шупљина (цепова), узорак 2KL, PPL; е) систем разгранатих пукотина различитих ширина, узорак 2KL, PPL; Легенда ознака: Chl – хлорит; Cal – калцит

**Порозност** уграђеног керсантита се карактерише значајним присуством микропукотина и прлина. Регистроване су појединачне микропукотине (Сл. 94д) и системи пукотина (Сл. 94е) на местима распадања појединих минерала. Димензије пукотина су дужине и по више центиметара, а ширине од 0,1 – 0,4 mm.

Као и код испитиваних узорака керсантита из каменолома Тешића мајдана, сви испитивани узорци уграђених керсантита карактеришу се високим степеном алтерационих промена (албитизација, хлоритизација, калцитизација), али су у њима додатно изражени и процеси индуковани површинским распадањем као што су оксидација која је резултирала значајним количинама депонованог лимонита.



## 14. ХЕМИЈСКИ САСТАВ КЕРСАНТИТА

Сагласно резултатима анализе петрографског састава који су указали на интензивну алтерацију керсантиста како у фази консолидације тако и у процесу површинског распадања, хемијске анализе ових стена, осим потврде наведеног, указују на концентрације имобилних и мобилних елемената као посебно значајних за процесе површинског распадања. Хемијски састав керсантиста из Тешића мајдана (узорци 5ТМ, 6ТМ, 7ТМ, 11ТМ) и керсантиста уграђеног у споменик Мало степениште у Београду (узорци 4МС, 6МС, 9МС, 19МС, 20МС, 22МС) изражен кроз садржај главних оксида приказан је у Табели 13.

Табела 13. Садржај главних оксида (теж. %) у керсантисту из Тешића мајдана (ТМ) и Малог степеништа (МС)

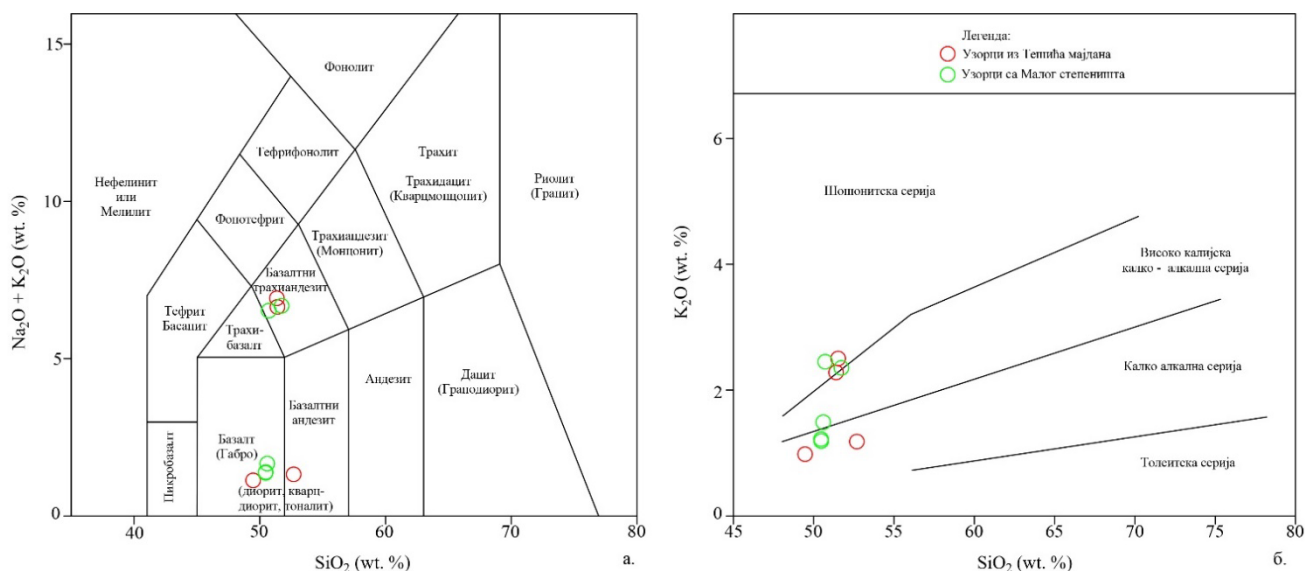
Оксид	Узорци из Тешића мајдана				Узорци са Малога степеништа					
	5ТМ	6ТМ	7ТМ	11ТМ	4МС	6МС	9МС	19МС	20МС	22МС
SiO <sub>2</sub>	50,80	49,18	48,94	46,37	47,48	49,15	48,33	47,38	47,93	39,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,90	16,60	16,20	14,90	16,50	16,60	16,80	17,00	16,70	14,10
FeO	5,51	7,89	7,68	6,37	8,30	8,02	7,05	5,66	4,34	6,69
CaO	8,18	6,87	7,71	9,44	7,63	7,41	8,60	8,54	9,73	11,30
MgO	2,76	5,63	5,81	1,77	5,47	5,63	2,21	1,28	1,88	4,26
MnO	5,56	0,14	0,16	9,00	0,14	0,13	6,15	5,95	5,75	0,22
TiO <sub>2</sub>	4,25	1,14	1,11	3,51	1,21	1,15	3,70	5,22	5,07	1,07
SO <sub>3</sub>	0,46	0,87	0,80	0,44	1,80	1,58	0,44	0,37	0,72	9,97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,35	0,47	0,47	0,46	0,57	0,50	1,46	1,15	1,94	0,57
K <sub>2</sub> O	1,14	2,39	2,17	0,92	2,29	2,23	1,17	1,12	1,41	0,85
Na <sub>2</sub> O	0,13	4,21	4,15	0,14	3,81	4,12	0,14	0,18	0,16	4,34
ГЖ	3,12	3,69	3,98	5,82	4,63	3,45	3,81	5,78	4,59	7,25
Укупно	99,16	99,08	99,19	99,14	99,83	99,97	99,87	99,63	100,22	100,30

Легенда: ГЖ - губитак жарењем

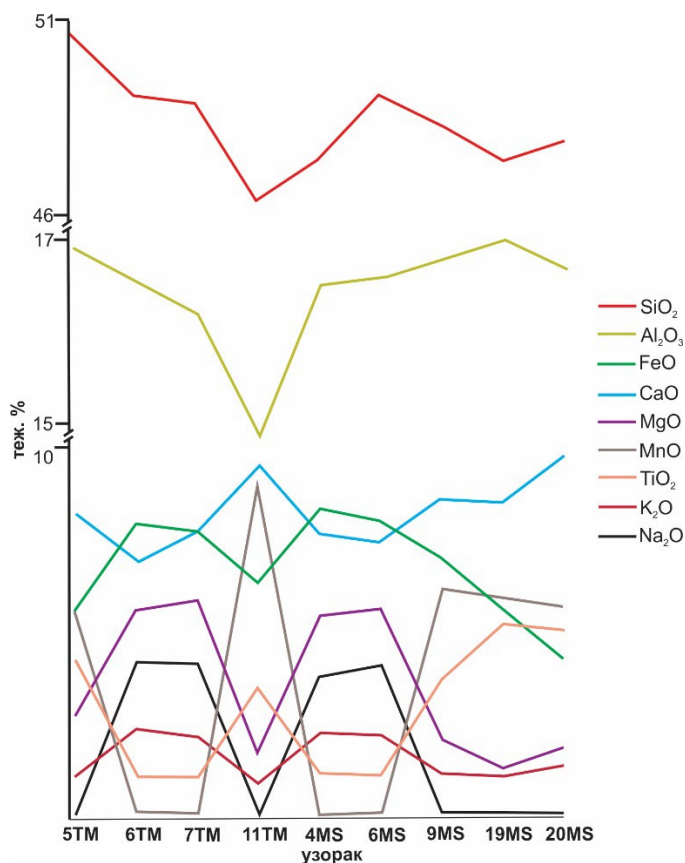
У Табели 13. приказан је и садржај главних оксида узорка 22МС (узорак црне површинске коре керсантиста) који се третира као депонент продуката површинског распадања и као такав не представља чврсту стену. Његов хемијски састав изражен кроз концентрације главних оксида је значајно различит од осталих узорка керсантиста због чега је искључен из интерпретације хемијског састава дате у наредном тексту. Међутим, због разматрања продуката распадања датих у каснијим поглављима, хемијски састав овог узорка је приказан у Табели 12. заједно са осталим узорцима керсантиста.

Сагледавајући садржај главних оксида, уочава се да нема већих разлика у њиховој средњој процентуалној вредности за узорке из каменолома и узорке са Малога степеништа. Тако средња вредност садржаја SiO<sub>2</sub> за узорке из каменолома износи 48,8 теж. %, док је за узорке керсантиста са Малога степеништа 48,1 теж. %, а садржај Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> варира у опсегу 14,9 - 17 теж. %. На основу резултата масеног процентуалног садржаја SiO<sub>2</sub> који је у опсегу од 46,37 теж. % – 50,80 теж. %, испитивани узорци керсантиста припадају групи базичних магматских стена. На класификационом ТАС дијаграму (Le Bas et al., 1986) испитивани узорци припадају групи базалта, базалтних андезита и базалтних трахиандезита (Сл. 95а), односно високо-К калко - алкалној серији и калко алкалној серији (Сл. 95б). Важни за проучавање керсантиста су алкални, веома реактивни оксиди као што су K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O. Заступљеност K<sub>2</sub>O је од 0,92 теж. % - 2,39 теж. % , док се Na<sub>2</sub>O у испитиваним узорцима налази у опсегу 0,13 - 4,21 теж. %.

Зависност појединих оксида у односу на SiO<sub>2</sub> приказана је на дијаграму варијабилности оксида (Сл. 96). Оксиди Na<sub>2</sub>O, FeO и MgO показују сличан тренд раста и варијабилности у свим испитиваним узорцима керсантиста, док вредности CaO и TiO<sub>2</sub> показују супротан тренд раста и варијабилности од претходно набројаних оксида.



Слика 95. Дијаграми класификације испитиваних керсантита: а) Положај узорака на дијаграму класификације  $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$  према La Maitre et al. (1989); б) Положај узорака на дијаграму односа  $K_2O$  и  $SiO_2$  (теж. %) према Peccerillo and Taylor 1976 и Le Bas et al., 1986)



Слика 96. Варијациони дијаграм главних оксида у испитиваним узорцима керсантита

Садржај губитка жарењем (садржај  $H_2O$  и  $CO_2$ ), као добар индикатор хемијског површинског распадања, у узорцима керсантита из каменолома варира од 3,12 - 5,82 теж. % са средњом вредношћу од 4,14 теж. %, док је у узорцима са Малог степеништа у опсегу од 3,45 - 5,78 теж. % са средњом вредношћу од 4,45 теж. %. Уједначене вредности керсантита из мајдана и са споменика последица су високог садржаја секундарних минерала у обе групе стена.

Садржај микроелемената у узорцима керсантита из Тешића мајдана (ТМ) и површински распаднутог керсантита са Малог степеништа (MS) приказан је у Табели 14.

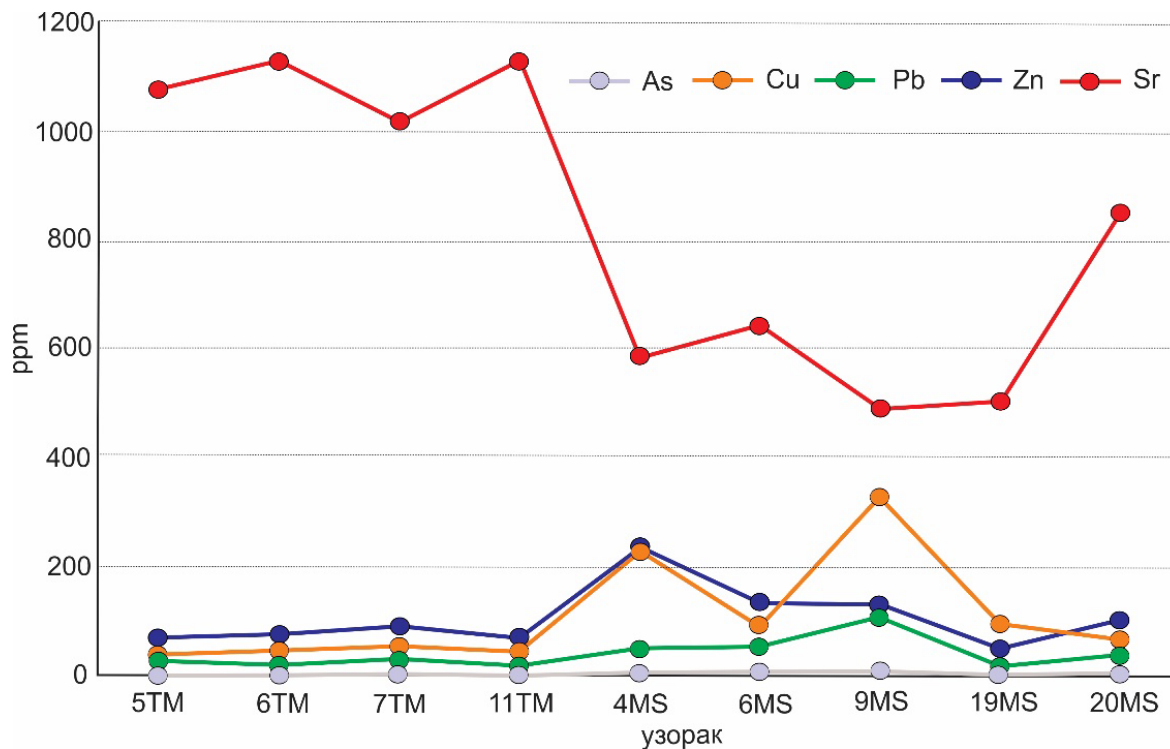
Табела 14. Садржај микроелемената у узорцима керсантита из мајдана (ТМ) и површински распадног керсантита са споменика (MS)

елемент (ppm)	5TM	6TM	7TM	11TM	4MS	6MS	9MS	19MS	20MS	22MS
Ag	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As	<b>0,4</b>	<b>1,2</b>	<b>2,2</b>	<b>1,2</b>	<b>3,6</b>	<b>4,6</b>	<b>7,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,8</b>	<b>5,2</b>
Ba	2140	1130	1170	820	1300	989	1500	1390	1820	134
Be	3,2	2,8	3,2	1,6	2,6	2,4	2,2	1,8	2,8	2,4
Bi	0,08	0,08	0,12	0,04	0,06	0,04	0,08	0,06	0,06	0,16
Cd	-	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-
Ce	183	163	174	142	151	146	144	125	158	127
Co	31,2	32,9	34	45,6	33,1	33,2	34,6	33,6	35,6	31,7
Cr	130	117	148	295	118	133	152	154	88	91
Cs	0,46	0,43	0,48	3,38	0,51	0,56	0,97	0,82	0,91	2,95
<b>Cu</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>52</b>	<b>44</b>	<b>230</b>	<b>92</b>	<b>328</b>	<b>96</b>	<b>66</b>	<b>64</b>
Dy	4,34	4,31	4,64	3,63	4,1	3,54	3,58	3,53	4,3	3,7
Er	2,11	2,1	2,08	1,78	2	1,81	1,73	1,59	2,1	1,66
Eu	2,63	2,63	2,58	2,35	2,77	2,54	2,39	2,16	2,7	2,25
Ga	18,3	19,2	19,2	17	19,8	19,8	18,2	18	21	18,6
Gd	6,93	6,65	7,09	5,87	7,03	6,65	5,87	5,7	7,22	5,8
Ge	0,9	1	1,25	1,15	1,4	1,2	1,25	0,7	0,9	0,7
Hf	8,62	6,01	7,06	5,36	5,74	5,4	5,35	5,29	6,17	4,79
Ho	0,79	0,76	0,84	0,66	0,75	0,69	0,65	0,63	0,81	0,66
In	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,1
La	102	92,9	98	76,3	83,4	81,4	81,5	71,2	85,6	70,2
Lu	0,27	0,22	0,25	0,21	0,24	0,2	0,18	0,17	0,22	0,21
Mn	1130	1130	1200	1190	1080	1010	1130	1490	1380	1700
Mo	1,4	1,8	1	2	1,8	2,2	2,6	3	2,6	2,2
Nb	27,5	20,2	23,8	16,5	19,3	17,4	17,5	15,4	19,2	14,5
Nd	70	63,3	67,2	58,6	63,3	58,6	56,5	53,4	67,3	52,6
Ni	92	92	106	190	86	96	110	112	76	70
<b>Pb</b>	<b>28</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>17</b>	<b>49</b>	<b>52</b>	<b>107</b>	<b>16</b>	<b>37</b>	<b>45</b>
Pr	20,3	18,3	19,1	16,2	17,5	16,7	16,1	14,7	18,5	14,8
Rb	51,3	41	40,1	40,8	43,4	44	44,4	28,2	37,5	27,9
Re	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sb	-0,1	0,3	0,4	0,2	0,9	0,9	1,6	0,7	0,6	1,8
Sc	14,9	17,5	17,3	19	18,8	18,8	19,3	19	18,4	17,2
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sm	10,8	9,79	10,6	9,09	10,1	9,3	9	8,46	10,6	8,9
Sn	1,4	2	1,8	1,4	2,4	2,4	2,2	1,4	2	2,6
<b>Sr</b>	<b>1080</b>	<b>1130</b>	<b>1020</b>	<b>1130</b>	<b>588</b>	<b>643</b>	<b>492</b>	<b>504</b>	<b>850</b>	<b>623</b>
Ta	1,56	1,16	1,44	0,94	1,1	1,04	1	0,89	1,17	0,91
Tb	0,84	0,85	0,94	0,76	0,87	0,84	0,73	0,66	0,85	0,76
Te	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Th	25,4	18,9	22	14,9	16,6	15,7	15	13,9	17,2	14
Ti	7030	7070	6830	5530	7410	7080	7100	6650	8650	6780
Tl	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	0,4	-	0,4	-
Tm	0,33	0,26	0,32	0,21	0,23	0,28	0,22	0,23	0,28	0,23
U	6,21	4,42	5,13	3,72	3,96	3,82	3,96	3,26	4,37	4,3
V	142	155	146	116	165	157	159	151	188	155
W	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1
Y	20,9	19,5	21,7	17,6	19,7	17,7	16,7	15,8	20	16,8
Yb	1,94	1,66	1,89	1,49	1,66	1,68	1,48	1,43	1,66	1,3
<b>Zn</b>	<b>70</b>	<b>75</b>	<b>90</b>	<b>70</b>	<b>235</b>	<b>135</b>	<b>130</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>80</b>
Zr	362	260	305	219	244	230	226	209	255	204

Садржаји арсена, бакра, олова, стронцијума и цинка у керсантиту показују значајне разлике између узорка из каменолома и узорка са Малог степеништа. То се посебно односи на више садржаје бакра у свим узорцима са Малог степеништа у односу на његове садржаје у узорцима из каменолома. Слична ситуација је и са садржајима олова, цинка и арсена (Сл. 97). Супротну тенденцију показује садржај стронцијума, јер су садржаји овог елемента и до 50 % нижи у



узорцима са Малог степеништа у односу на његове садржаје у узорцима керсантита из каменолома (Табела 14. – вредности означене подебљано).



Слика 97. Садржај арсена, бакра, олова, стронцијума и цинка у узорцима керсантита из каменолома (узорци 5TM, 6TM, 7TM и 11TM) и са Малог степеништа (узорци 4MS, 6MS, 9MS, 19MS и 20MS)

Садржаји осталих микроелемената у анализираним узорцима керсантита не показују значајне разлике и варирања како унутар самих група узорака, тако и између ове две групе (узорака из каменолома и површински распаднутих узорака са Малог степеништа – Табела 13).

## 15. ХЕМИЈСКИ ИНДЕКСИ ПОВРШИНСКОГ РАСПАДАЊА

Хемијски индекси површинског распадања коришћени су за детерминисање степена хемијског распадања керсантита из Тешића мајдана и керсантита са Малог степеништа. Индекси су израчунати на основу резултата хемијских анализа (Табела 13), односно моларних маса главних оксида (Табела 15).

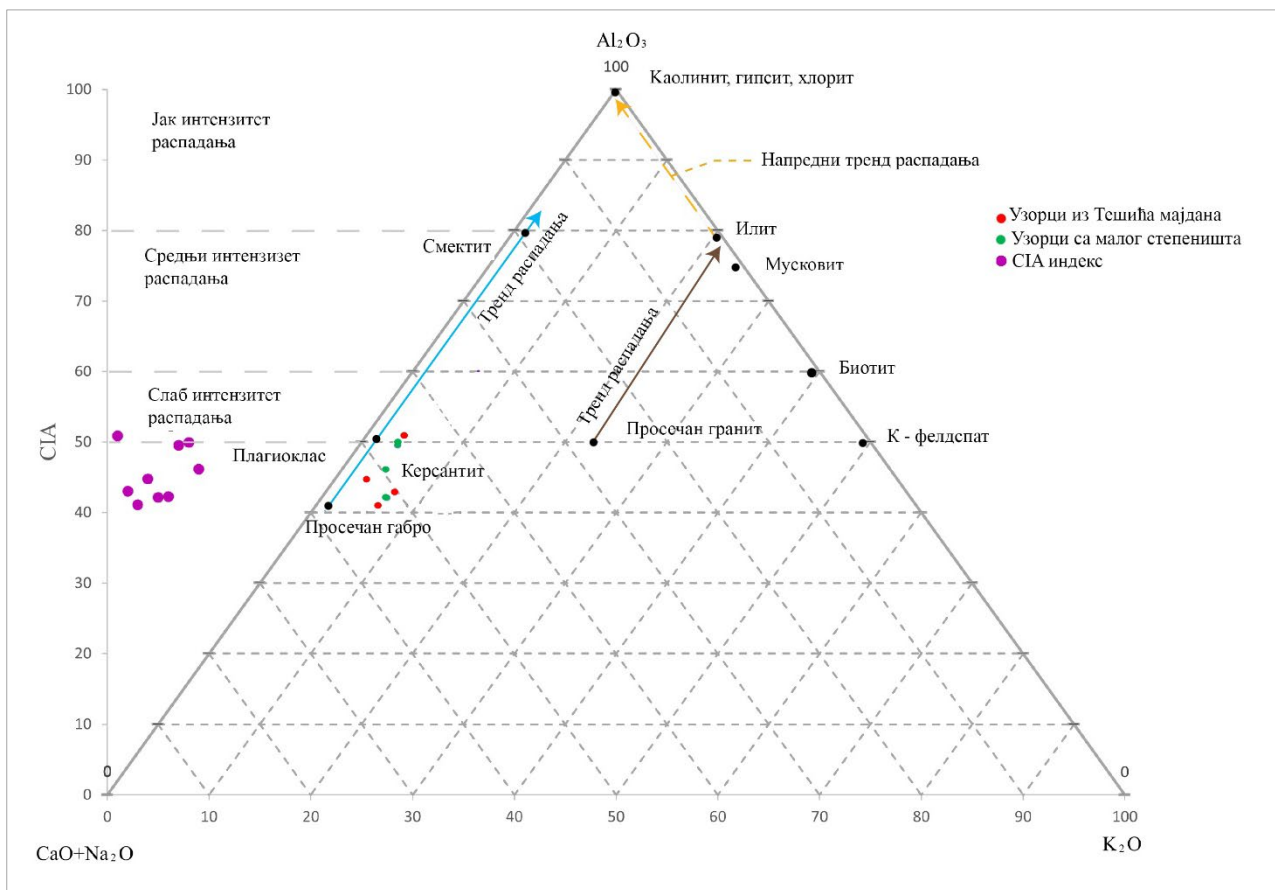
Табела 15. Резултати индекса хемијског распадања на одабраним узорцима

Индекс	УЗОРЦИ КЕРСАНТИТА ИЗ КАМЕНОЛОМА ТЕШИЋА МАЈДАНА					УЗОРЦИ КЕРСАНТИТА СА МАЛОГ СТЕПЕНИШТА						
	5ТМ	6ТМ	7ТМ	11ТМ	$\bar{x}$	4 MS	6 MS	9MS	19MS	20MS	$\bar{x}$	22MS <sup>*9</sup>
<b>ba</b>	0,97	1,33	1,43	1,23	<b>1,24</b>	1,37	1,37	1,02	1,00	1,17	<b>1,18</b>	2,03
<b>V</b>	0,82	0,57	0,52	0,73	<b>0,66</b>	0,56	0,55	0,84	0,96	0,80	<b>0,74</b>	0,39
<b>PI</b>	71,68	70,54	70,97	70,49	<b>70,92</b>	69,29	70,36	69,18	69,25	71,51	<b>69,92</b>	69,39
<b>WPI</b>	16,23	23,45	24,46	17,00	<b>20,29</b>	23,87	23,74	16,09	14,86	17,57	<b>19,23</b>	28,86
<b>MWPI</b>	17,88	25,54	26,57	18,90	<b>22,23</b>	26,15	25,88	17,96	16,66	19,33	<b>21,20</b>	31,36
<b>WP</b>	39,33	92,13	92,35	38,03	<b>65,46</b>	89,09	91,32	39,23	36,46	43,42	<b>59,90</b>	87,74
<b>CIA</b>	50,87	43,00	41,12	44,76	<b>44,94</b>	42,18	42,28	49,51	49,95	46,16	<b>46,01</b>	33,02
<b>CIW</b>	52,83	46,09	43,73	46,14	<b>47,20</b>	45,03	45,05	51,43	51,79	48,19	<b>48,30</b>	33,74
<b>PIA</b>	50,94	41,92	39,92	44,43	<b>44,30</b>	41,04	41,20	49,47	49,94	45,80	<b>45,49</b>	32,26
<b>PWI</b>	76,67	77,92	78,26	76,70	<b>77,39</b>	77,10	77,83	75,56	74,39	75,60	<b>76,10</b>	76,91

Компарацијом резултата средњих вредност индекса (хемијског) распадања, вредности керсантита из Тешића мајдана и керсантита са Малог степеништа су уједначене. Регистроване мале варијације, међутим, указују да постоји извесна, очекивана разлика између вредности индекса ове две групе узорака. Средња вредност индекса ba, PI, WPI, MWPI, WP и PWI индицирају већи интензитет површинског распадања керсантита са Малог степеништа у односу на керсантит из каменолома јер су мање вредности индекса забележене за узорке површински распаднутог керсантита са објекта. Највећа разлика у вредности код ове групе индекса забележена је за Паркеров индекс (WP), који одражава степен површинског распадања свеже стене и њену осетљивост на даље распадање. Средња вредност овог индекса за узорке из каменолома је 65,46, док је за узорке са Малог степеништа средња вредност индекса 59,90 што је пад вредности за 8,5 %.

Код индекса V, CIA, CIW и PIA израчунате средње вредности су веће за узорке из каменолома него код узорака површински деградираног керсантита из објекта што представља очекивани тренд линеарног кретања у односу на пораст интензитета површинског распадања за овај тип индекса. На трокомпонентном дијаграму представљене су вредности CIA индекса и вредности (Na<sub>2</sub>O + CaO) - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - K<sub>2</sub>O за све испитиване узорке (Сл. 98). Резултати CIA индекса за узорке керсантита из каменолома и са Малог степеништа крећу се у распону од 41,12 - 50,87, те се сви налазе у стадијуму слабог, иницијалног распадања са трендом раста паралелно (Na<sub>2</sub>O + CaO)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> граници (Сл. 98).

<sup>9</sup> \*Резултати узорка 22MS нису укључени у прорачун средње вредности због одступања хемијског састава узоркованог материјала (црна кора на површини уграђеног керсантита).



Слика 98. Положај узорака керсантита из каменолома (5ТМ, 6ТМ, 7ТМ и 11ТМ) и са Малог степеништа (4МС, 6МС, 9МС, 19МС и 20МС) на дијаграму  $Al_2O_3$ ,  $(CaO + Na_2O)$ ,  $K_2O$  са упоредним приказом вредности CIA индекса узорака керсантита, наглашеним трендовима распаѓања и диспозицијом минерала (према Nesbitt and Young (1982, 1984, 1989))



## 16. МОРФОЛОШКЕ И ФАЗНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОДУКАТА РАСПАДАЊА (*SEM-EDS* и *XRPD* анализе)

Присуство и морфологија рецентних секундарних минералних фаза (глиновитих минерала и соли), формираних површинским распадањем и депонованих на површини керсантиа Тешића мајдана и површини керсантиа уграђеног у испитиване објекте, одређени су применом скенирајуће електронске микроскопије (*SEM*), семиквантитативни хемијски састав одређен је енергетско дисперзивном спектрометријом (*EDS*), док је *XRPD* анализом утврђен њихов фазни састав. Анализирани су узорци соли депоноване на површини керсантиа у каменолому Тешића мајдан (узорци 1sTM, 3sTM, 5sTM и 6sTM) и соли прикупљених са површина уграђених керсантиа (46MS, 55MS, 64aMS, 64bMS - Мало степениште и 3L - Класна лутрија). Такође је извршена и анализа узорака површинских кора са објекта Мало степениште (узорци 4MS, 5MS, 6MS, 8MS, 9MS и 13MS). На узорцима из каменолома идентификоване су растворљиве соли гипс и калцит, а на објектима, гипс, тенардит, Na - Ca сулфат и халит.

Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) је најдоминантнија со регистрована како на површини керсантиа у каменолому, тако и на узорцима керсантиа уграђеног у споменик културе. На керсантиту у каменолому се јавља у два морфолошка облика, у моноклиничним призматичним кристалима величине око 80 - 100  $\mu\text{m}$  (узорак 3sTM, Сл. 99а), или у карактеристичној форми „пустињске руже“ (узорак 1sTM, Сл. 99б).

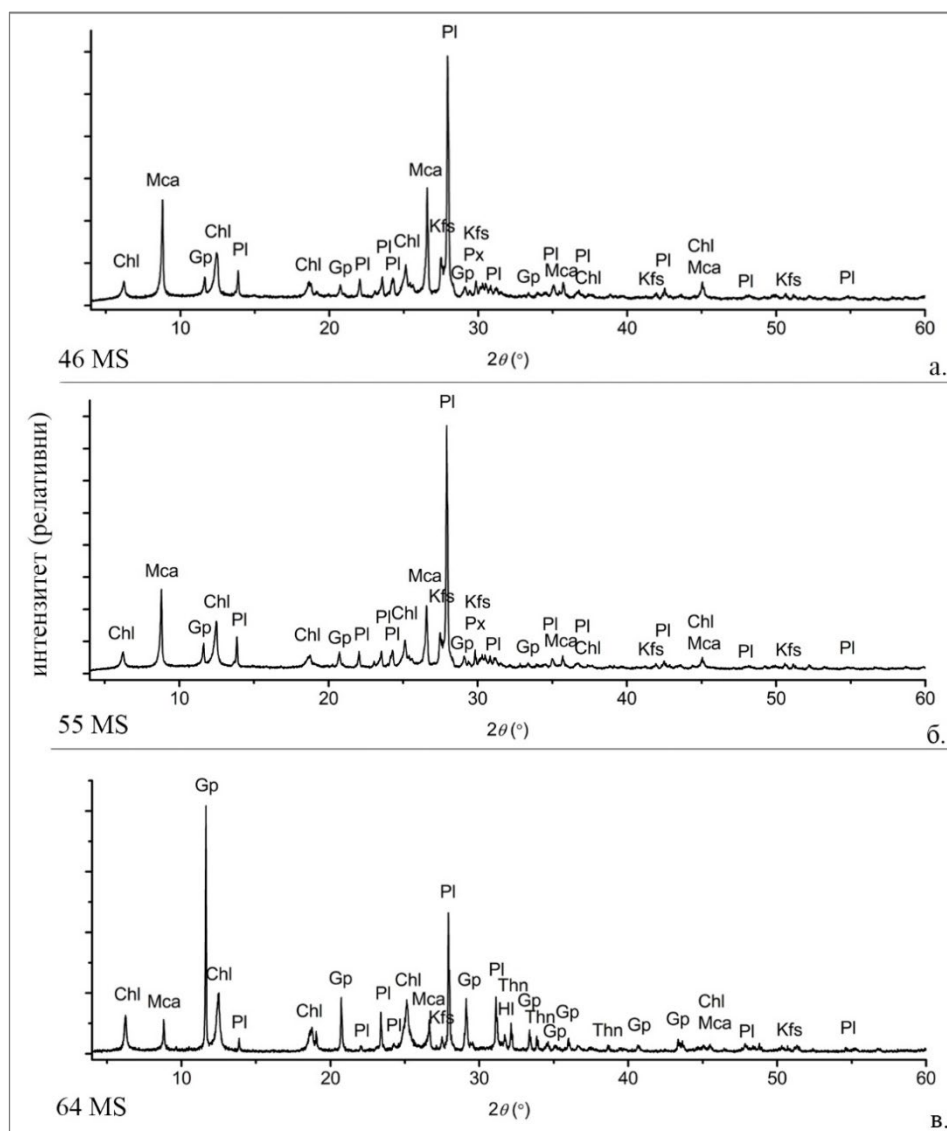


Слика 99. *SEM* снимци анализираних узорака соли: а) призматични кристали гипса у узорку соли са површине керсантиа из каменолома 3sTM; б) агрегат гипса у форми „пустињске руже“ са површине керсантиа у каменолому 1sTM; в) гипс у узорку 46MS; г) гипс у узорку 55MS; д) тенардит и гипс (узорак соли 64MS); е) Na – Ca сулфат у узорку 64MS

Присуство гипса је регистровано и у узорцима површинске коре, где се најчешће јавља у виду кристала, величине до 30  $\mu\text{m}$ , развијених између лиски биотита/вермикулита (Сл. 102б). Кристали гипса у површинским корама јављају се и у неправилним облицима, величине око 5  $\mu\text{m}$  (узорци 46MS и 55MS; Сл. 99в, г), до величине око 50  $\mu\text{m}$  у узорку 64MS (Сл. 99д). Присуство гипса је потврђено XRPD анализом (Сл. 100а, б, в).

Тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) се налази у скоро свим узорцима соли узетим са површине керсантита уграђеног у испитиване објекте. Јавља се у облику призматичних и неправилних зрна величине приближно 5-30  $\mu\text{m}$  (Сл. 99д). XRPD анализом је такође потврђено присуство тенардита (узорак 64MS Сл. 100в).

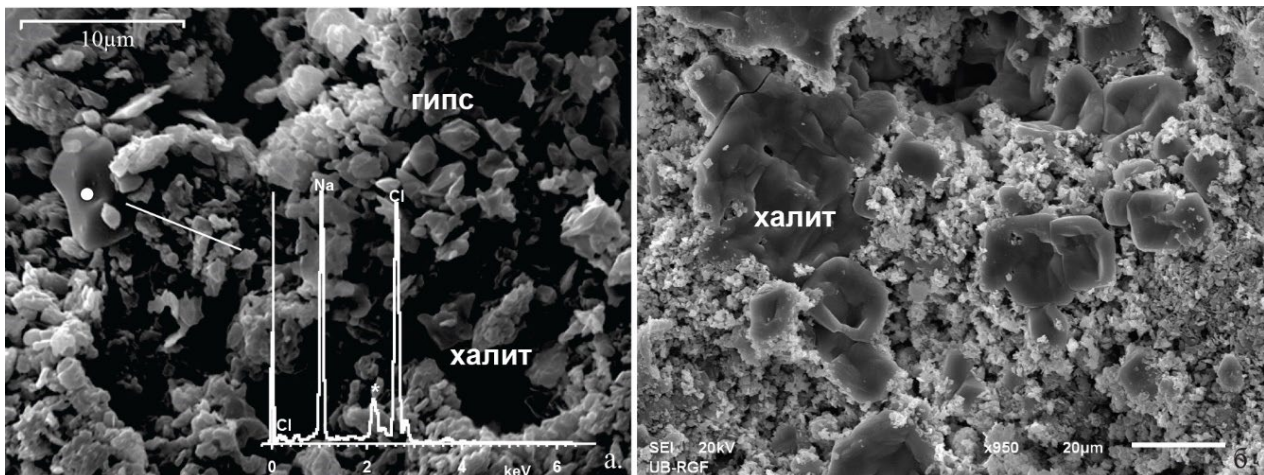
Двострука Na–Ca сулфатна со у облику плочастих агрегата је идентификована коришћењем EDS анализа у узорку соли 64MS (Сл. 99ђ). Она се јавља у количинама испод границе детекције XRPD методом.



Слика 100. Дифрактограм (рендгенски дијаграм праха) узорка у којима је регистрован гипс: а) узорак 46MS; б) узорак 55MS; в) узорак 64MS. Ознаке фаза на дифрактограмима: **Pl** – плагиоклас, **Mca** – лискун, **Chl** – хлорит, **Kfs** – K-фелдспат, **Gp** – гипс, **Px** – пироксен, **Thn** – тенардит, **Hl** – халит.

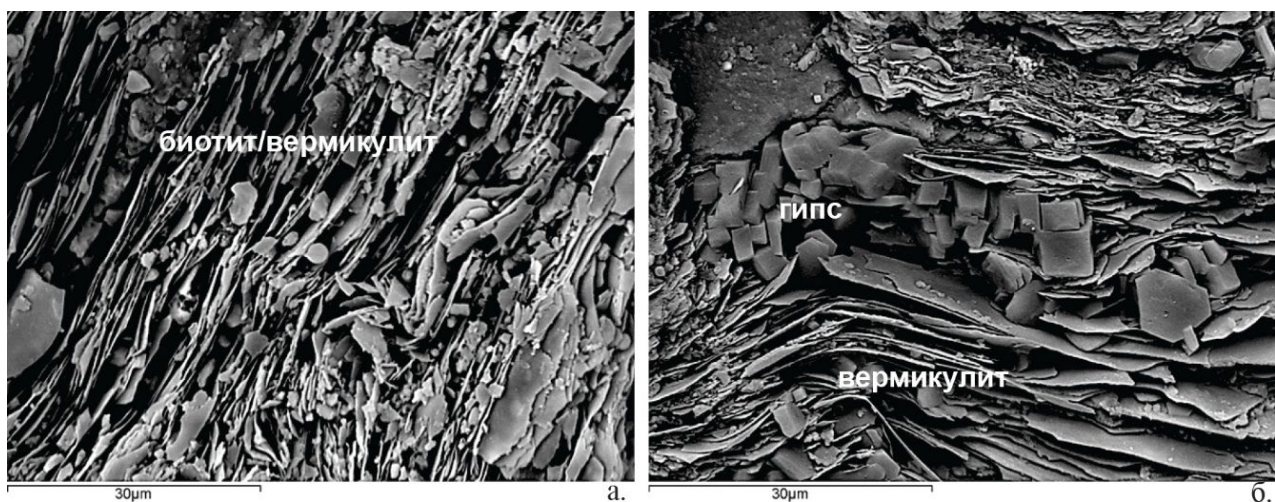
Халит је регистрован на површини керсантита на Малом степеништу у зони контакта са тлом (узорак 46MS, Сл. 101а). Такође је констатован и на површини керсантита уграђеног у улаз објекта Класне лутрије (узорак 3L; Сл. 101б). Халит се јавља у виду тесералних кристала, величине до 10  $\mu\text{m}$ . Његово присуство је доказано и XRPD анализом узорка 64aMS (00-005-0628) (Сл. 100в).





Слика 101. SEM снимци анализираних узорка соли: а) халит (NaCl) и гипс - узорак 46MS; б) халит –узорак 3L

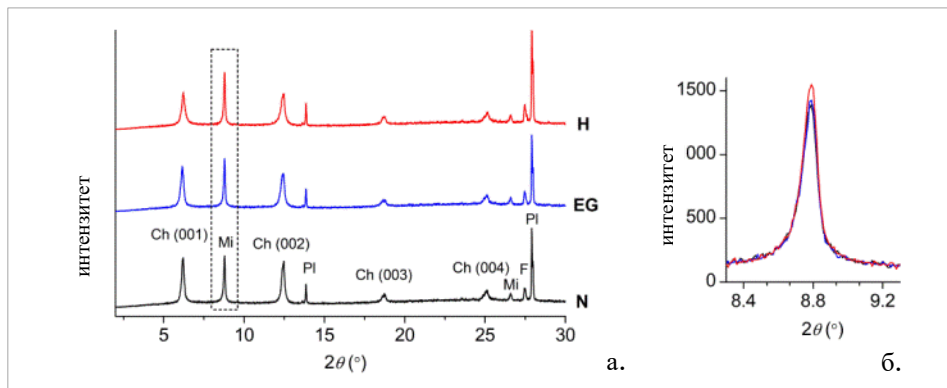
SEM-EDS као и рендгенске анализе површинских кора формираних на керсантиту уграђеном у објекат Мало степениште потврдиле су присуство минералних фаза које су детерминисане петрографском анализом: плагиоклас - албит, биотит, пироксен, епидот, калцит, хлорит, као и у мањим количинама пирит и апатит. У испитиваним узорцима површинских кора керсантита је регистрована интензивна деградација биотита манифестована раслојавањем лиски, њиховим пуцањем, повијањем и крзањем (Сл. 102а, б). Карактеристика тако распаднутих биотита у појединим узорцима (нпр. узорак 8MS, Сл. 102б) јесте и концентрисање кристала гипса у међуслојном простору што додатно подстиче раслојавање лиски (Сл. 102б). Како је морфологија лиски биотита указала на његову трансформацију у секундарне глиновите минерале извршене су додатне анализе у циљу потврђивања присуства глиновитих минерала насталих на рачун биотита.



Слика 102. SEM снимци анализираних узорка површинских кора керсантита са Малог степеништа; а) интерстратификација биотит/вермикулит у узорку 6MS; б) вермикулит са кристалима гипса у међуслојном простору - узорак 8MS

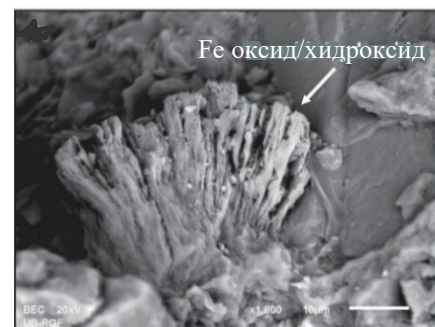
Присуство вермикулита је доказано XRPD анализом узорка 9MS. Рендгенски дифрактограми оријентисаног препарата приказани су на слици 103. Два дифракциона максимума могу се приписати  $hk_l$  рефлексијама вермикулита (006) и (008). Пошто рефлексија (001) триоктаедарског вермикулита колабира на око 10 ангстрема ( $\sim 8.78^\circ 2\theta$ ) након загревања на  $400^\circ\text{C}$  током 1 h (Brindley and Brown, 1980; Moore and Reynolds, 1997), благи пораст интензитета  $8.78^\circ 2\theta$  (Сл. 103б) се такође може приписати присуству мале количине вермикулита.



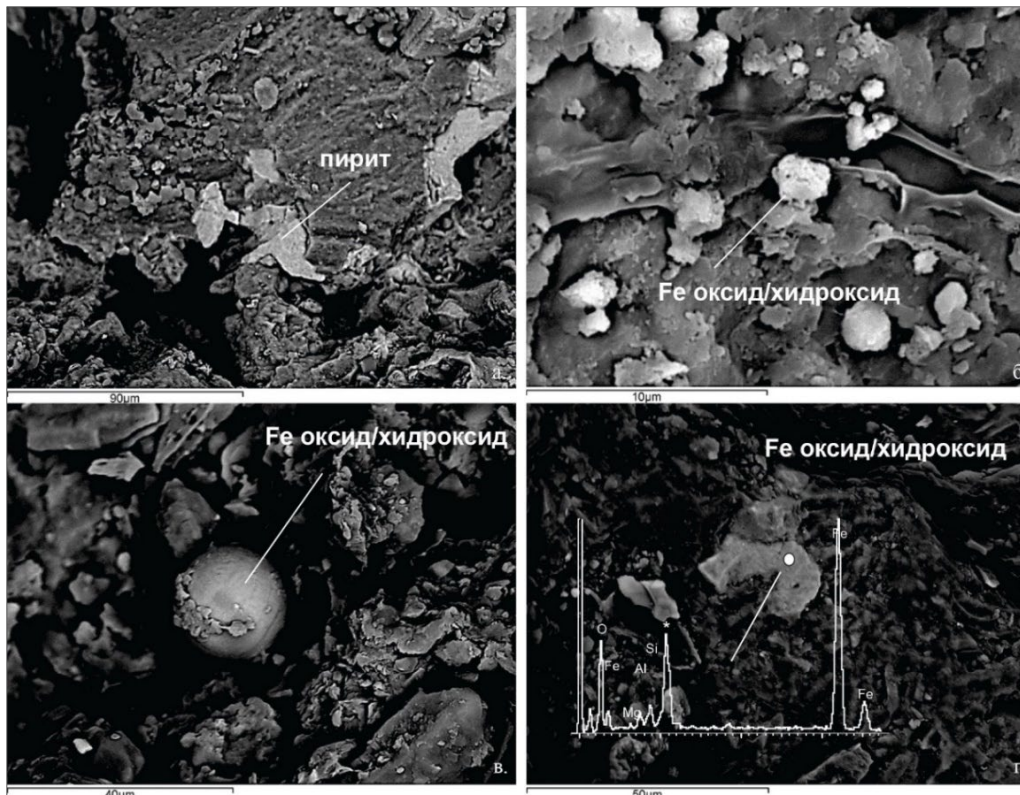


Слика 103. а) Дифрактограми орјентисаних препарата припремљених од узорка 9MS: нетретман (N), после третмана етилен гликолом (EG) и после загревања (H). Легенда: Ch – хлорит, Mi – лискун, PI – плагиоклас, F – K-фелдспат, б) преклопљени дифракцијски максимуми (узорак MS 9)

Присуство пирита је идентификовано у узорку 8MS (Сл. 105а) док су оксиди и/или хидроксида гвожђа регистровани у свим узорцима испитиваних површинских кора. Развијени су као зрнасти агрегати са величином појединачних зрна до 30  $\mu\text{m}$  (Сл. 105г), или се јављају у форми дендричних (Сл. 105б), лезастих агрегата (Сл. 104), или у облику сферичних честица (Слика 105в).

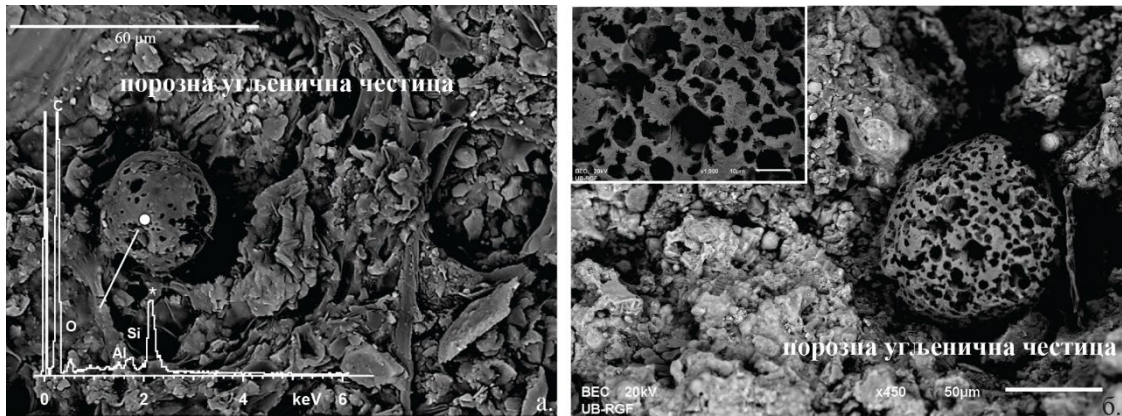


Слика 104. SEM лезасти агрегат Fe оксида/хидроксида



Слика 105. SEM снимци морфологије гвожђевитих минерала у површинским корима узграђеног керсантита; а) пирит у узорку 8MS; б) неправилни зрнасти агрегати Fe оксида/хидроксида у узорку 4MS; в) сферична честица Fe оксида/хидроксида у узорку 4MS; г) неправилни агрегати Fe оксида/хидроксида у узорку 5MS

У узорцима површинских кора констатовано је присуство порозних угљеничних честица пречника око 30 - 60  $\mu\text{m}$  које су концентрисане у порном простору керсантита (Сл. 106а, б).



Слика 106. SEM снимци сфероидних честица а) порозна угљенична честица из узорка 13MS; в) порозна угљенична честица из узорка 9MS пречника  $\sim 60 \mu\text{m}$  са величином пора до 10  $\mu\text{m}$  (увеличан детаљ у горњем левом углу)

## 17. ФИЗИЧКА СВОЈСТВА КЕРСАНТИТА

На одабраним узорцима керсантита из каменолома и узорцима површински деградираног керсантита са објекта Мало степениште и фасаде Народног музеја извршена су испитивања физичких својстава камена и то: привидне запреминске масе -  $\rho_b$ , стварне запреминске масе -  $\rho_r$ , отворене порозности –  $P_o$ , укупне порозности –  $P_t$ , упијања воде –  $Ab$ . Капиларно упијање воде ( $C$ ) испитивано је на узорцима свеже стене из каменолома. Њихове контактне површине су третиране различитим врстама површинске обраде: полирана, штокована, резана, четкана. Иста врста испитивања спроведена је на површински деградираним узорцима са Малог степеништа са штокованим контактним површинама. Преглед резултата физичких својстава керсантита дат је у табели 16.

Табела 16. Физичка својства керсантита из каменолома и површински деградираних керсантита из објекта

Локација	Узорци	Физичка својства				
		$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	$P_o$ (%)	$P_t$ (%)	$Ab$ (%)
Керсантит из каменолома	1 ТМ	2,72	2,75	0,56	1,34	0,23
	2 ТМ	2,63	2,71	2,88	3,21	1,09
	3 ТМ	2,71	2,72	0,92	3,21	0,35
	4а ТМ	2,70	2,74	0,90	1,46	0,34
	4б ТМ	2,64	2,74	2,17	3,61	0,86
	5 ТМ	2,70	2,82	3,75	4,26	1,39
	6 ТМ	2,60	2,81	5,69	7,58	2,19
	7 ТМ	2,67	2,82	4,40	5,31	1,68
	8 ТМ	2,72	2,85	2,29	4,70	0,91
	9 ТМ	2,67	2,85	4,57	6,21	1,69
	10 ТМ	2,74	2,81	0,78	2,49	0,29
	11 ТМ	2,74	2,83	/	3,00	0,79
$\bar{x}$	2,69	2,79	2,63	3,87	0,98	
Површински деградирани керсантит	24 MS	2,61	2,77	4,29	5,71	1,65
	25 MS	2,61	2,82	5,13	7,43	1,97
	26 MS	2,55	2,77	4,40	7,88	1,74
	5 NM	2,33	2,77	14,7	15,9	6,3
	6 NM	2,48	2,78	9,9	10,8	4,0
	7 NM	2,56	2,79	6,9	8,2	2,7
	8 NM	2,28	2,75	16,2	17,1	7,1
	$\bar{x}$	2,48	2,78	8,8	10,4	3,6

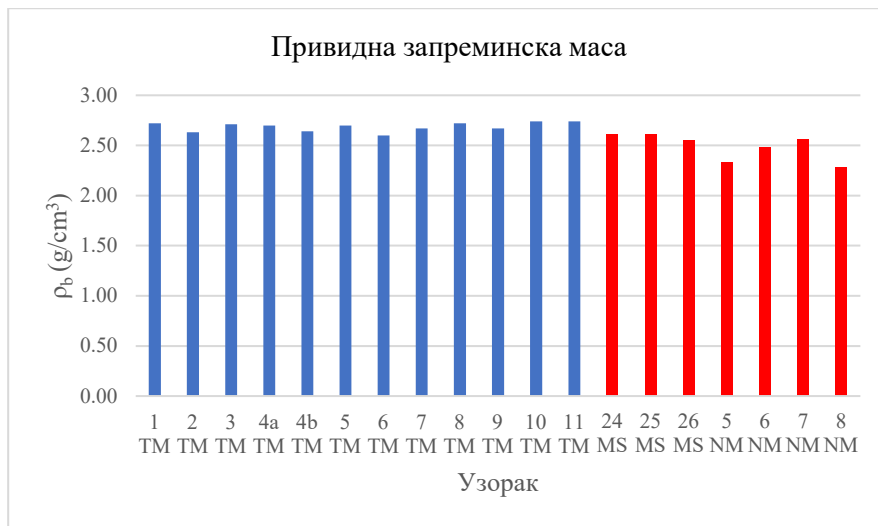
Легенда:  $\rho_b$  – привидна запреминска маса;  $\rho_r$  – стварна запреминска маса;  $P_o$  – отворена порозност;  $P_t$  – укупна порозност;  $Ab$  – упијање воде;  $\bar{x}$  – средња вредност резултата; ТМ узорци керсантита из каменолома Тешића мајдана; MS узорци керсантита са Малог степеништа; NM узорци керсантита са објекта Народног музеја

### 17.1. ЗАПРЕМИНСКА МАСА

Привидна запреминска маса ( $\rho_b$ ) узорака **керсантита из каменолома** варира од 2,60 - 2,74 g/cm<sup>3</sup> са средњом вредношћу од 2,69 g/cm<sup>3</sup> што сврстава испитивани керсантит у категорију тешког камена.

Узорци површински деградираног керсантита са **Малог степеништа** имају вредности привидне запреминске масе од 2,55 - 2,61 g/cm<sup>3</sup>, просечно 2,59 g/cm<sup>3</sup>, док је на узорцима деградираног керсантита са **Народног музеја** забележена нешто нижа вредност привидне запреминске масе у опсегу 2,28-2,56 g/cm<sup>3</sup> (Новаковић и др., 2015), са просечном вредношћу 2,41 g/cm<sup>3</sup>. Узорци керсантита са Народног музеја имају за 7 % мање вредности у односу на вредност истог својства узорака са Малог степеништа (Сл. 107). Анализирајући просечну вредност узорака керсантита из каменолома и просечну вредност резултата привидне запреминске масе свих површински деградираних узорака (2,48 g/cm<sup>3</sup> – припадност категорији средње тешког камена), пад вредности износи 7,8 %.

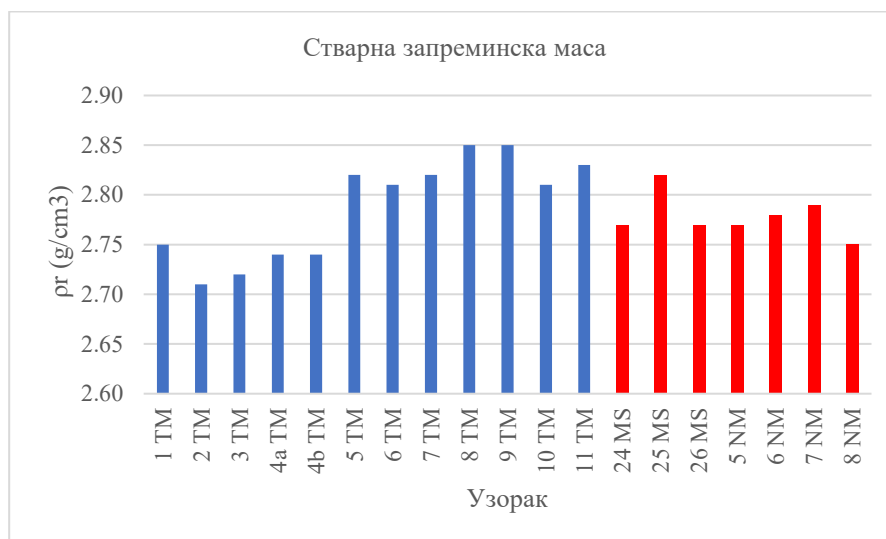




Слика 107. Хистограм резултата привидне запреминске масе (плаво – узорци керсантита из каменолома, црвено- узорци површински деградираниог керсантита из објеката)

**Стварна запреминска маса ( $\rho_r$ )** узорака **керсантита из каменолома** има средњу вредност од  $2,79 \text{ g/cm}^3$  што је у складу са минералним саставом испитиване стене.

Стварна запреминска маса **површински деградираниог керсантита** из објеката не показује значајне промене вредности након процеса распадања. Средња вредност је  $2,78 \text{ g/cm}^3$  што представља пад просечне вредности за само  $0,4 \%$  у односу на средњу вредност узорака из каменолома (Сл. 108). Варирање вредности стварне запреминске масе је израженије код узорака керсантита из каменолома у односу на варијабилност овог својства код површински деградираних узорака. Ниже вредности  $\rho_r$  регистроване у узорцима 1-4ТМ последица су и већег присуства калцита у односу на остале узорке из каменолома.



Слика 108. Хистограм резултата стварне запреминске масе (плаво – узорци свеже стене, црвено- алтерисани узорци)

## 17.2. ПОРОЗНОСТ

**Укупна порозност ( $P_t$ )** узорака **керсантита из каменолома** је у распону од  $1,34$  до  $7,58 \%$  са средњом вредношћу од  $3,87 \%$ . Према средњој вредности укупне порозности керсантити из каменолома се могу сврстати у категорију умерено порозних стена (Henrikues and Tello 2006, Bilbija i Matović 2009).

Укупна порозност **површински деградираних узорака** варира од  $5,7$ - $17,1 \%$  (Сл. 109). Док су

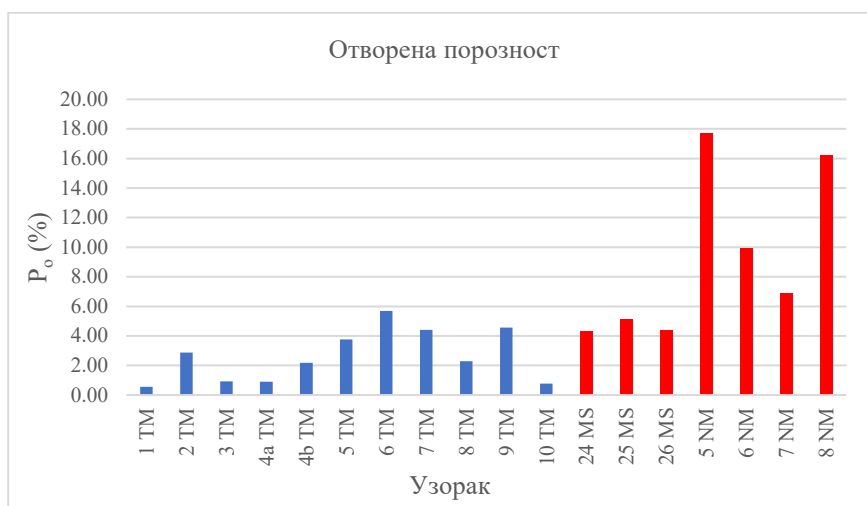
вредности укупне порозности површински распаднутих узорака са Малог степеништа у опсегу од 5,7 до 7,9 %, порозност узорака веома оштећеног керсантита уграђеног у фасаде Народног музеја варира у распону од 8,2-17,1 %. Као репрезентативна вредност узета је аритметичка средња вредност од 10,4 %, што сврстава површински деградираних узорке керсантита у категорију веома порозног камена. Поменута вредност је 2,7 пута већа од средње вредности овог својства узорака из каменолома.



Слика 109. Графички приказ резултата мерења укупне порозности (плаво – узорци свеже стене, црвено-алтерисани узорци)

**Отворена порозност ( $P_o$ )** код узорака *керсантита из каменолома* варира од 0,56 – 5,69 %, са средњом аритметичком вредношћу од 2,63 % што указује да 1,2 % порног простора припада категорији затворених пора односно порном простору у коме није омогућено кретање и задржавање флуида.

Тренд пораста вредности укупне порозности *површински деградираних* узорака керсантита прати и пораст вредности отворене порозности. Она варира од 4,3 - 16,2 %, са средњом вредношћу од 8,8 % (Сл. 110). Близак однос високих вредности отворене и укупне порозности узорака фасаде Народног музеја указује на значајан садржај (микро) пукотина које су способне да приме и задрже воду.



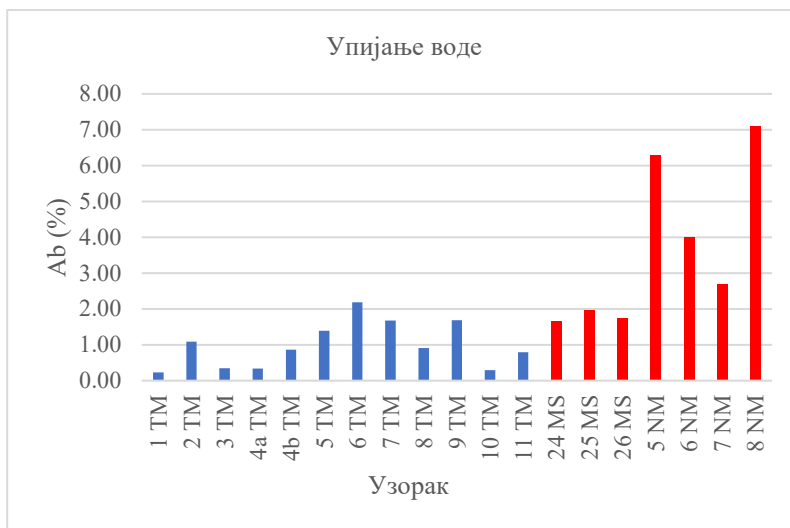
Слика 110. Графички приказ резултата отворене порозности (плаво – узорци свеже стене, црвено-алтерисани узорци)

### 17.3. УПИЈАЊЕ ВОДЕ

Упијање воде под атмосферским притиском је параметар који дефинише кретање воде кроз порну структуру камена у засићеном стању. Резултати **упијање воде** узорака *керсантита из*

**каменолома** су у распону од 0,23 - 2,19 %. Средња вредност упијања воде је 0,98 % што сврстава испитиване стене у категорију камена малог упијања воде.

Средња вредност упијања воде **површински деградираних** узорака из објеката износи 3,6 % што је за 3,6 пута више у односу на узорке из каменолома (Сл. 111). Ово повећање је у сагласности са повећањем отворене порозности истих узорака. На основу средње вредности упијања воде површински деградирани узорци припадају категорији камена осетног упијања воде.



Слика 111. Графички приказ резултата упијања воде (плаво – узорци свеже стене, црвено- алтерисани узорци)

#### 17.4. КАПИЛАРНО УПИЈАЊЕ ВОДЕ

Резултати коефицијента капиларног упијања воде (С) и тренда капиларне апсорпције воде узорака керсантита из каменолома и узорака површински деградираних керсантита са Малог степеништа приказани су у Табели 17 и сликама 112 и 113.

Табела 17. Коефицијент капиларног упијања керсантита

Капиларно упијање воде С (g/m <sup>2</sup> /s <sup>0.5</sup> )	Узорак													
	1ТМ	2ТМ	3ТМ	4аТМ	4бТМ	5ТМ	8ТМ	9ТМ	10ТМ	̄ ТМ	24MS	25MS	26MS	̄ MS
полиран-Р	0,507	2,708	0,944	1,036	1,501	2,675	2,261	3,459	0,746	1,760				
штокован-S	0,673	/	/	1,113	2,055	3,860	3,716	4,345	0,816	2,368	4,410	5,284	5,419	5,037
четкан-С	0,587	/	/	0,888	1,630	3,475	2,184	3,333	0,749	1,837				
резан-R	0,557	/	/	0,838	1,982	3,639	2,892	3,882	0,762	2,222				

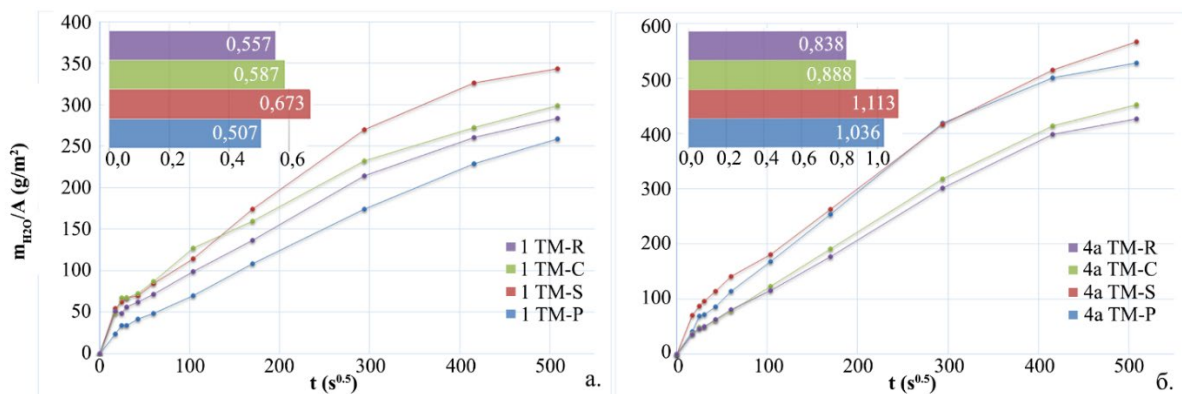
Испитивањима капиларног упијања на опитним телима са различитим типовима површински обрађених контактних површина добијени су следећи резултати:

Керсантит из каменолома (Сл. 112 и 113а-д):

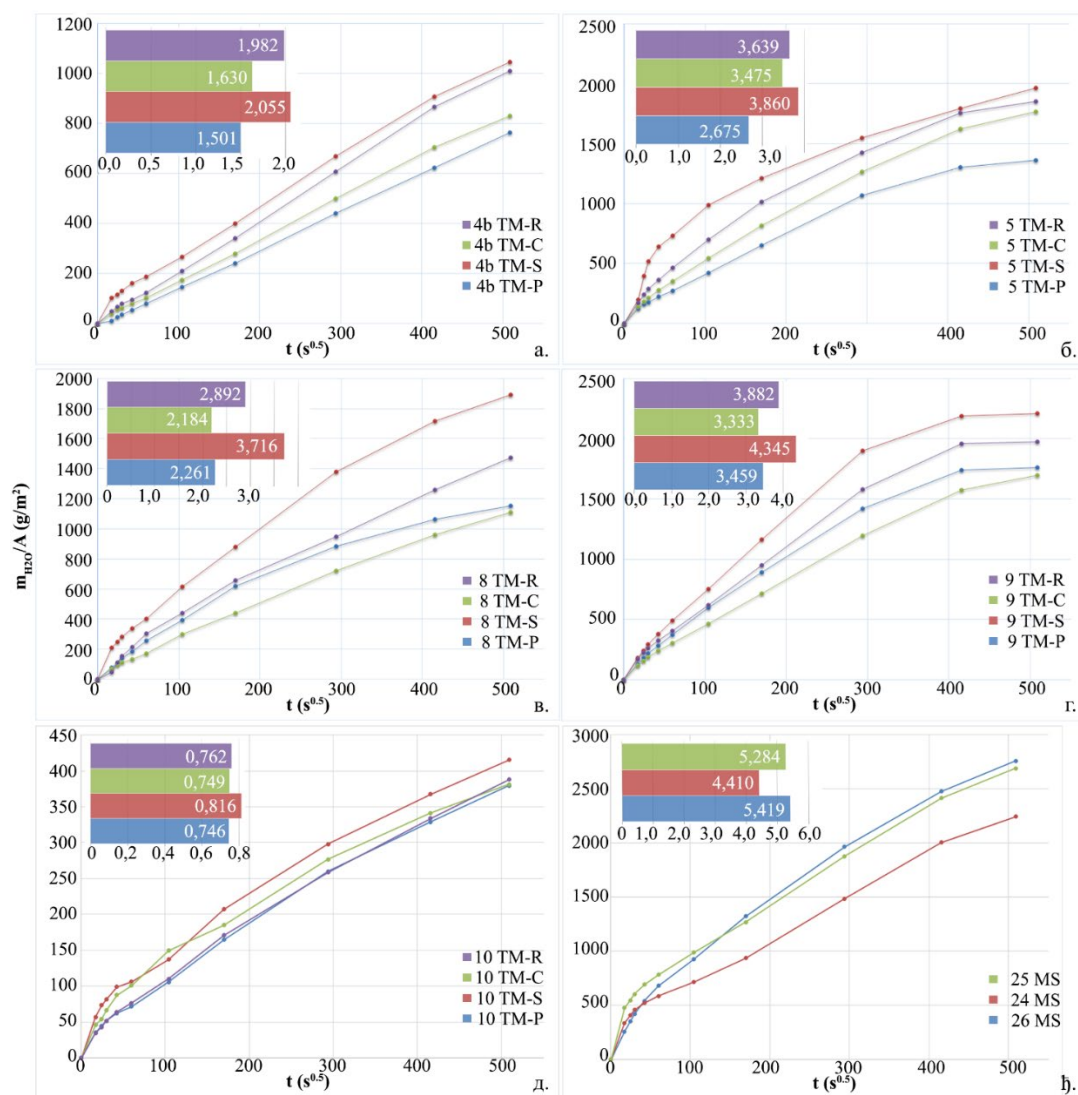
- Узорци са полираном површинском обрадом (Р): Распон резултата коефицијента капиларног упијања воде на полираним узорцима је 0,507 - 3,459 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>, са средњом вредношћу од 1,760 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>.
- Узорци са штокованом површинском обрадом (S): Резултати су у распону од 0,673 - 4,345 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>, средња вредност за испитиване узорке је 2,368 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>.
- Узорци са четканом површинском обрадом (С): Минимална измерена вредност капиларног упијања код узорака је 0,587 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup> док је максимална 3,475 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>. Средња вредност износи 1,837 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>.



- Узорци са резаном површинском обрадом (R): Распон резултата капиларног упијања је у опсегу 0,557 - 3,882 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>. Средња вредност на узорцима са резаном обрадом површине износи 2,222 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>.



Слика 112. Графички приказ резултата капиларног упијања воде узорака керсантита из каменолома; хистограм коефицијента капиларног упијања воде (C) (горњи леви угао дијаграма) и криве капиларног упијања керсантита узорка а) 1TM и узорка б) 4aTM



Слика 113. Графички приказ резултата капиларног упијања воде узорака керсантита из каменолома и узорака површински деградираниог керсантита са Малог степеништа; хистограм коефицијента капиларног упијања воде (C) (горњи леви угао дијаграма) и криве капиларног упијања керсантита узорка 4bTM (а) и узорка 5TM (б), узорка 8TM (в), узорка 9TM (з), узорка 10TM (д) и узорака са Малог степеништа 24MS, 25MS и 26MS (ђ)

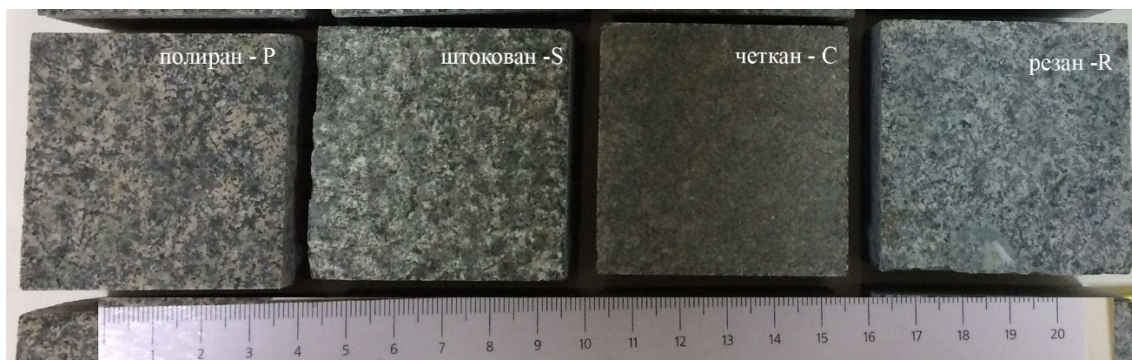
Тренд капиларног упијања воде, графички приказан функцијама зависности промене масе у задатим временским интервалима, указује да ниједан узорак није достигао фазу засићења водом изузев узорка 9ТМ (Р, S и R) који у последња два мерења не показује значајне промене масе. Функције кривих показују приближно линеаран тренд. Док узорци 1ТМ и 10ТМ у прва три сата капиларно упијају малу количину воде, сви остали узорци за исто време упију 10 пута већу масу воде. Према коефицијенту С узорци керсантита из каменолома припадају категорији камена умереног капиларног упијања воде.

Површински деградирани керсантит Малог степеништа (Сл. 113ђ):

- Узорци са штокованим контактним површинама (S): Измерене вредности коефицијента С су очекивано веће у односу на вредности коефицијената С штокованих узорака из каменолома. Вредности С су у распону од 4,410 - 5,419 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>, док је средња аритметичка вредност 5,037 g/m<sup>2</sup>/s<sup>0.5</sup>. Коефицијент С површински деградираних узорака је 2,13 пута већи од просечне вредности коефицијента С узорака керсантита из каменолома. Према коефицијенту С узорци површински деградирани керсантита припадају категорији високог капиларног упијања воде.

## 18. МОРФОЛОГИЈА РАЗЛИЧИТО ОБРАЂЕНИХ ПОВРШИНА КЕРСАНТИТА

У циљу анализе морфолошких карактеристика површина керсантита подвргнутих различитим облицима површинске обраде (полирање, штоковање, четкање и резање; Сл. 114), извршена је анализа површина керсантита из каменолома (узорци 4ТМ и 5ТМ) и штоковане површине узорка керсантита изложеног вишедеценијском временском пропадању са објекта Мало степениште (узорак 25MS). Анализе су извршене скенирајућим електронским микроскопом.

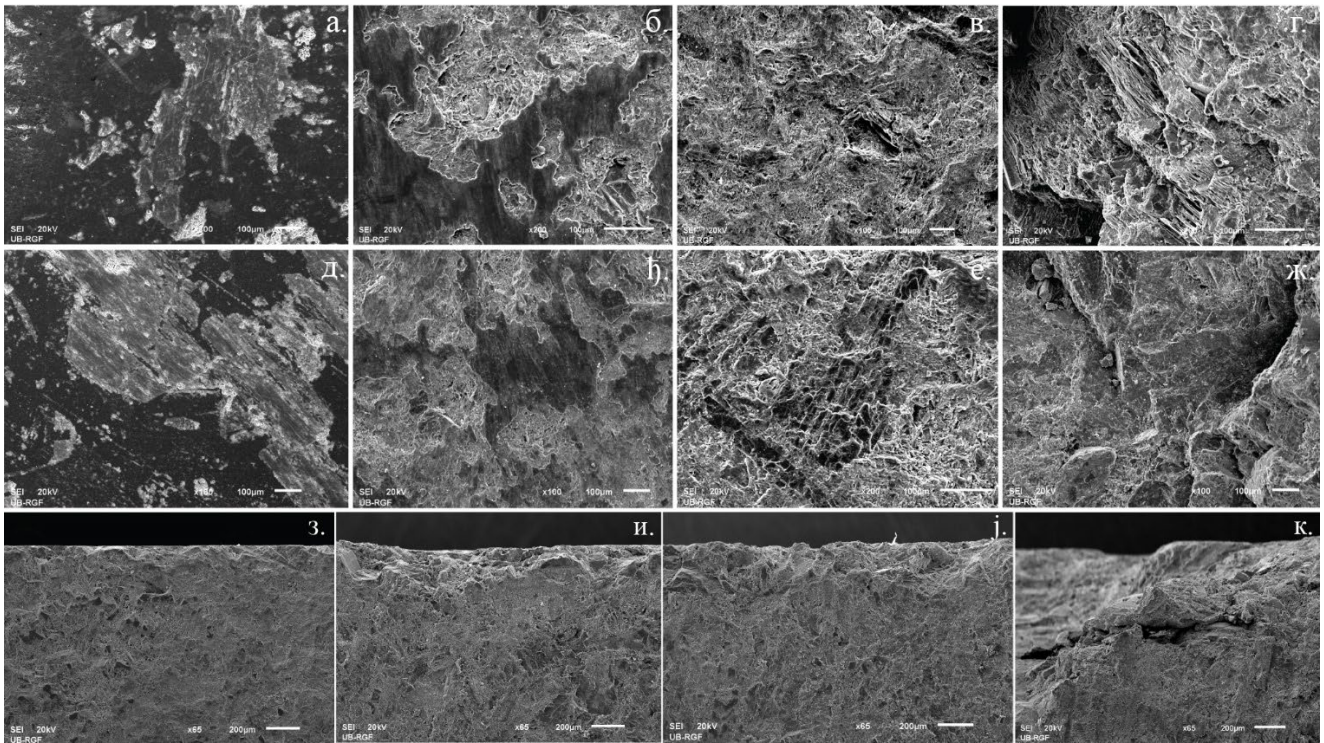


Слика 114. Површинска обрада керсантита из каменолома (узорак 10ТМ)

Морфолошки изглед различито обрађених површина узорка је приказан на слици 115. Полиране површине керсантита су глатке, хомогене, униформне без отворених пора или механичких оштећења изазваних технолошким поступком обраде површине (Сл. 115а, д). На четканим површинама керсантита (Сл. 115б, ђ) уочава се хетерогеност коју карактеришу зоне изузетно компактне глатке површине, морфолошки сличне полираним површинама (тамније зоне камена на сликама 115б, ђ), али се такође уочавају и неправилна или овална удубљења, храпаве површине различитих димензија у пречнику и по дубини (светлије зоне камена на сликама 115б, ђ). Резане површине керсантита се одликују одсуством хомогености и компактности површине (Сл. 115в, е), а привидно равна површина камена се одликује бројним плитким удубљењима. На штокованим површинама керсантита евидентно је потпуно одсуство хомогености, маркантна су бројна неправилна удубљења, неравнине и зоне ослабљених веза минерала (Сл. 115г, ж).

Анализом попречног пресека различито обрађених површина узорка керсантита регистроване су значајније разлике у компактности површинске зоне камена (Сл. 115з-к). Полирана површина узорка 4ТМ је потпуно равна, без уочљивих структурно-текстурних промена површинске зоне камена (Сл. 116з). Четкана површина узорка 4ТМ показује одступања од замишљене хоризонталне линије пресека и на њој се уочавају мања удубљења и неравнине која достижу дубину до 0,2 mm (Сл. 115и). Резана површина узорка 4ТМ је храпавија од четкане и полиране са појавом већег броја удубљења, најчешће до дубине од 50-100  $\mu\text{m}$ , са максималним дубинама до 0,2 mm (Сл. 115ј). Агресивност утицаја процеса површинске обраде штоковањем евидентна је променом морфолошких карактеристика површине керсантита посматране на попречном пресеку. Ако се узме у обзир да процесу штоковања претходи процес резања камена, те да је површина првобитно имала изглед као на слици 115ј, резултати анализе јасно указују да су процесом штоковања отворена не само нова удубљења значајних димензија до 0,5 mm дубине, већ и да су вештачки генерисане отворене пукотине и прелине са зјапом око 100  $\mu\text{m}$  и милиметарских димензија пружања (Сл. 115к).





Слика 115. SEM снимци различито обрађених површина керсантита из каменолома а) ортогонални изглед полиране површине узорка 4ТМ; б) ортогонални изглед четкане површине узорка 4ТМ; в) ортогонални изглед резане површине узорка 4ТМ; г) ортогонални изглед штоковане површине узорка 4ТМ; д) ортогонални изглед полиране површине узорка 5ТМ; е) ортогонални изглед четкане површине узорка 5ТМ; ж) ортогонални изглед резане површине узорка 5ТМ; з) ортогонални изглед штоковане површине узорка 5ТМ; з) попречни пресек узорка 4ТМ са полираном завршном обрадом; и) попречни пресек узорка 4ТМ са четканом завршном обрадом; ј) попречни пресек узорка 4ТМ са резаном завршном обрадом; к) попречни пресек узорка 4ТМ са штокованом завршном обрадом

У циљу дијагностификовања стања штоковане, технолошки ослабљене површине камена, након дугогодишње изложености различитим екстринзичним факторима окружења керсантита, спроведена је иста морфолошка карактеризација површина. Анализи на скенирајућем електронском микроскопу је претходила макроскопска опсервација три оригинално штокована узорка керсантита са три различите локације на Малом степеништу (Сл. 116), и том приликом је регистровано:

- узорак 24MS (покривна капа оgrade према улици, сегмент 6 на сликама 20 и 22) се карактерише потпуним губитком површинске коре која је настала у процесу површинског распадања, дезинтегрисала се и одстранила од остатка каменог елемента; последично, трагови алата коришћеног за површинску обраду нису уочљиви на површини узорка (Сл. 116а). На попречном пресеку узорка регистроване су пукотине и прслине, паралелне међусобно и са површином камена, отворене са зјапом од 0,5-3 mm; пукотине су макроскопски уочљиве до дубине од 2 cm што истовремено маркира и ослабљену површинску зону камена подложну даљем раслојавању, фрагментирању, дезинтегацији и одвајању од преосталог дела субстрата; доњи део узорка керсантита је компактан, без видљивих трагова оштећења.
- макроскопском опсервацијом узорка 25MS (вертикални стуб централног дела оgrade, сегмент 11, на сликама 20 и 22), регистрован је такође губитак примарно штоковане површине камена, док се новоотворена површина карактерише лабилним љускама и фрагментима склониим лако одвајању од субстрата; на попречном пресеку узорка уочавају се пукотине и прслине паралелне површини камена; максимално простирање пукотина и прслина је до 10 mm дубине (Сл. 116б).
- узорак 26MS (сегмент 11, хоризонтални рукохват централног дела оgrade, на сликама

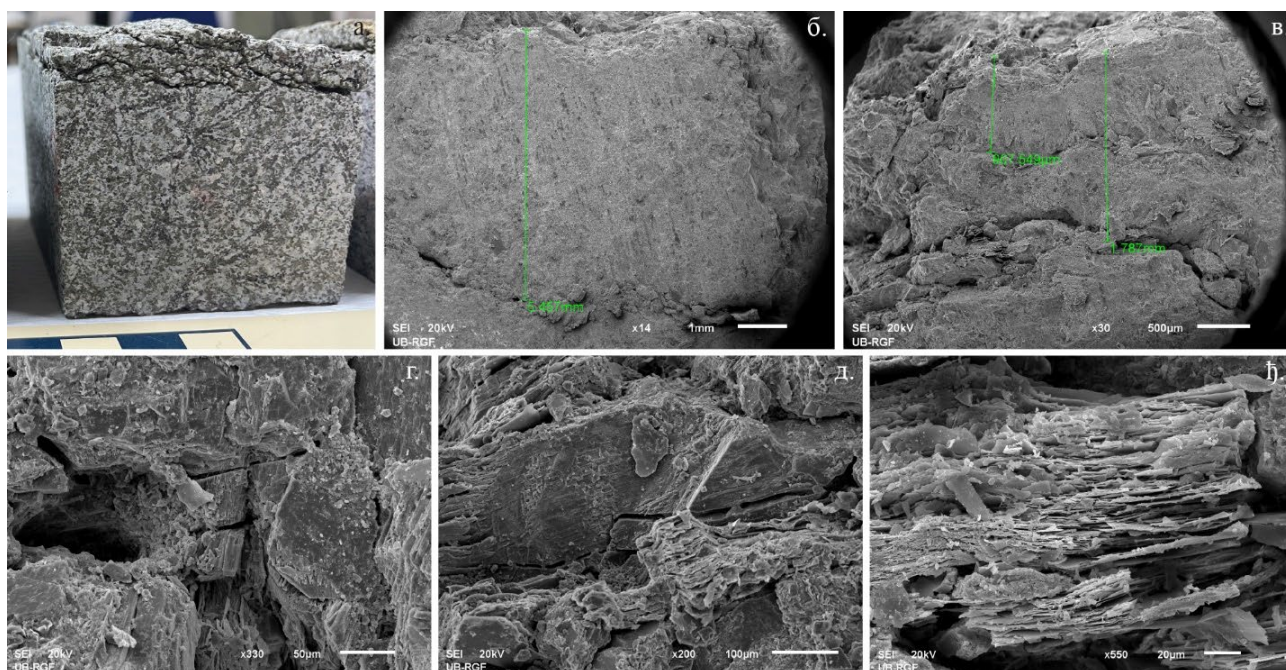


20 и 22) има очувану оригиналну површину са траговима алата за штоковање; површина је хомогена, компактна, са уочљивим сферичним удубљењима максималног пречника 3 mm; на попречном пресеку узорка регистроване су пукотине и прслине, паралелне међусобно и са површином камена, на максималној дубини до 1 cm (Сл. 116в).



Слика 116. Узорци керсантита са Малог степеништа а) узорак 24MS; б) узорак 25MS; в) узорак 26MS

Након макроскопске опсервације, узорак 25 MS, тачније морфологија површински ослабљене зоне камена дебљине око 1 cm, је анализирана скенирајућим електронским микроскопом (Сл. 117а). Резултати су указали на присуство бројних микропрслина различитих дужина простирања, али са појављивањем на међусобном растојању просечно око 1 mm или мање (Сл. 117б, в); површинском обрадом - штоковањем су отворене и бројне капиларне поре пречника до 100  $\mu\text{m}$  (Сл. 117г), и узроковано је микро фрактурисање минерала керсантита и то првенствено минерала мале тврдоће и савршене цепљивости као што су биотит, хлорит и калцит (Сл. 117д, њ) што је отворило бројне путеве за несметану циркулацију воде.



Слика 117. Приказ оштећења на узорку 25 MS а) макроскопски изглед узорка 25 MS; б-в) SEM снимци микропрслина површински ослабљене зоне камена; г) SEM снимак зоне са видљивим капиларним порема створеним штоковањем; д-њ) SEM снимак микро фрактурисаних минерала керсантита.

## 19. ДИСКУСИЈА

Докторском дисертацијом је обухваћено детаљно проучавање петролошких и физичко-механичких карактеристика, као и физичко-хемијских процеса површинског распадања керсантита из Тешића мајдана уграђеног у градитељско наслеђе Београда. Компарацијом стања керсантита из каменолома и керсантита уграђеног у Мало степениште оцењена је његова алтерабилност након вишедеценијске изложености различитим екстринзичним факторима агресивне урбане средине. Поред детаљног проучавања врста и степена површинског распадања керсантита у каменолому (руралној средини) и керсантита уграђеног у одабрани споменик културе (студија случаја), извршено је и снимање стања керсантита у другим, споменицима/објектима изграђеним од овог камена, са аспекта корелације и утврђивање утицаја начина површинске обраде, утицаја степена покривености површине камена слојевима земље („природне конзервације“) и геометријске позиције каменних елемената у структури објекта на његову алтерабилност у урбаној средини.

Керсантит Тешића мајдана је магматска стена, сиве, сиво зелене до зелене боје, масивне текстуре и неравномерно зрнасте структуре варира од ситнозрне до крупнозрне са елементима офитске структуре која карактерише варијетет доминантно коришћен за изградњу објеката - споменика културе. Керсантит је изграђен од плагиокласа (албита), биотита и моноклиничног пироксена (аугита). Од акцесорних минерала јављају се калијски фелдспат (због ниског садржаја до 3% сврстан као акцесорни минерал), металични минерали и апатит, док су секундарни минерали хлорит, калцит, епидот, леукоксен и минерали глина. Декоративна својства керсантита потичу од главних петрографских карактеристика тј. његове препознатљиве зелене боје и макроофитске структуре у којој доминирају изукрштана призматична зрна плагиокласа у комбинацији са лискама биотита и пироксена. Међутим, изражена петролошка карактеристика стенске масе керсантита Тешића мајдана је хидротермална алтерација главних минерала. Она се манифестује значајним присуством секундарног хлорита, калцита, епидота, леукоксена и минерала глина уз додатно, за архитектонски камен, непожељно присуство акцесорног пирита. Тако експлоатисани и уграђени хидротермално алтерисани керсантит представља стену изузетно осетљиву на дејство спољних атмосферских фактора агресивне урбане средине. Стогодишња изложеност атмосферијима и различитим антропогеним утицајима, резултирала је чињеницом да су у уграђеном керсантиту, главни минерали додатно разграђени процесима површинског распадања тј. зрна фелдспата су интензивно измењена, аргилитисана, замућена и калцитисана, биотит трансформисан у вермикулит, а његово раслојавање подстакнуто и растом гипса у међуслојним просторима. Пироксен је интензивније хлоритисан и калцитисан, а садржај секундарних оксида/хидроксида гвожђа је маркантно изражен у уграђеном керсантиту.

Процеси површинског распадања су, осим промена у минералном и хемијском саставу керсантита, узроковали морфолошке промене компактности уграђеног камена. Оне су регистроване и класификоване кроз различите форме и интензитета распадања како у каменолому Тешића мајдану тако и на објектима где је керсантит уграђен. Примењена техника геометријског мапирања омогућила је издвајање облика површинског распадања керсантита заједничких за оба локалитета (руралну средину Тешића мајдана и урбану средину Београда), али и издвајање специфичности које су карактеристичне само за објекте где је овај маркантни камен уграђен.

На стенској маси керсантита Тешића мајдана, као резултат деловања процеса површинског распадања најзначајније регистроване форме су следеће: губитак каменог материјала услед дубинског распадања и комадастог одвајања; деколорација изражена кроз тамносива до црна тракаста обојења, присутна на великим површинама и деколорација услед црвеносмеђих обојења; наслаге гипса и калцита регистроване су на заклоњеним површинама керсантита; одвајање површинских кора и љуски као и зрнаста дезинтеграција.

На испитиваном објекту Мало степениште, као и на осталим испитиваним објектима,



свеобухватном проценом стања уграђеног камена констатовано је да се на блоковима/елементима од керсантиа појављује истовремено више форми распадања у различитим интензитетима. Међутим, њихово удружено деловање на појединим елементима керсантиа је довело до високог степена деградације па чак и потпуног губитка интегритета самих камених блокова/елемената. Најдоминантније је дубинско и рељефно распадање, праћено љускастим и љуспастим одвајањем каменог материјала уз последичну зрнасту дезинтеграцију. Док је на Малом степеништу готово редовно присутна деколорација услед развијене црвеносмеђе танке површинске коре, на осталим објектима није регистровано њено присуство у значајној мери. Појава тамних, црних кора је локално регистрована на објектима и то искључиво на површинама заклоњеним од директног деловања кише. Наслаге соли у форми гипса, тенардита и/или халита, спорадично су регистроване на Малом степеништу и згради Класне лутрије. Оне се јављају како у форми ефлоресценције, тако и у виду субефлоресценције која поспешује претходно поменуто љускасто одвајање каменог материјала. Развој биолошке колонизације није интензиван на Малом степеништу, али је у значајној мери регистрован на објектима као што су споменици Јовану Скерлићу и Ђури Јакшићу. Док су пукотине у керсантиу у каменолому изражених димензија и могу бити различитог порекла, пукотине регистроване на уграђеном керсантиу су свакако последица утицаја екстринзичних фактора, мањих су димензија и различитог интензитета. Компилација свих регистрованих форми распадања како у каменолому Тешића мајдан тако и на објекту Мало степениште уз издвајање заједничких форми приказана је на слици 118.



Слика 118. Графички приказ заједничких форми распадања на каменолому Тешића мајдану и на Малом степеништу и интензитет и учесталост индивидуалних форми распадања по локалитету

Специфичност објекта Мало степениште односно алтерабилност уграђених камених елемената условљена је и околностима којима је споменик био изложен током своје дуге историје. Један од фактора који је утицао на постојаност камених елемената је чињеница да је део објекта био затрпан земљом која се насипала у склопу уређења парковске структуре. То је резултирало очуваношћу примарних површина керсантиа тј. одсуством површинског распадања. Осим поменуте специфичности објекта Мало степениште, све горе поменуте форме распадања регистроване су и на осталим споменицима културе.

Утицај атмосферског фактора на интензитет површинског распадања керсантиа одређен је корелацијом стања керсантиа у екстеријеру и ентеријеру објекта Градског правобранилаштва и Класне лутрије. Опсервацијом је констатовано да је керсантит веома постојан у контролисаним временским условима, где није изложен директним атмосферским утицајима што потврђује стање унутрашњих степеништа са потпуно очуваним формама и

примарним површинама у оба објекта (Сл. 119а, в). У екстеријеру, међутим, затечено стање степеника са високим интензитетима регистрованих форми распадања, јасно указује на подложност керсантита спољашњим агресивним утицајима (Сл. 119б, г).



Слика 119. Степенице од керсантита: а) унутрашње степениште у Градском правобранилаштву; б) спољашње улазно степениште у Градском правобранилаштву; в) унутрашње степениште у згради Класне лутрије; г) део Малог степеништа

### 19.1.1. Узроци, процеси и продукти површинског распадања керсантита

Сви наведени облици разградње керсантита резултат су процеса физичког и хемијског површинског распадања. Морфолошки разноврсни облици распадања керсантита, као што су дубинско и рељефно распадање, љускање и одвајање површинских кора, несумњиво указују на развој физичких процеса распадања. Међутим, развијена деколорација, и стварање рецентних секундарних минералних фаза указују на хемијско распадање примарних хидротермално алтерисаних главних минерала. Сваки од ових процеса подстиче развој и брзину деловања другог, те је њихово егзистирање истовремено, без могућности јасног одвајања доминантног процеса.

Физички процеси распадања условили су механичку дезинтеграцију керсантита на свим испитиваним објектима као и у стенској маси каменолома. Распадање манифестовано комадастим фрактурисањем, љускањем, љуспањем или зрнастом дезинтеграцијом узроковано је унутрашњим напонима генерисаним кристализационим притисцима растворљивих соли и леда, циклусима влажења-сушења и/или мржњења-отапања (Alemany, 2007). Главни узрочник свих наведених процеса јесте вода. Она улази у керсантит уобичајеним механизмима као што су упијање воде из атмосферских падавина (киша, снег), капиларним путем из тла или кондензацијом водене паре из ваздуха. Интензитет њеног агресивног деловања у великој мери зависи и од саме грађевинске конструкције (Alemany, 2007). Профилисани делови објеката на којима је омогућено дуже задржавање воде, као што су венци и слични профили на фасадама, показују већи интензитет механичке разградње у односу на вертикалне површине (Сл. 120).





Слика 120. Делови објеката где дужи задржавање воде условљава интензивну физичку деградацију; а) љускање и љуспање керсантита у сокли зграде Класне лутрије – фасада ка Васиной улици; б) љуспање и рељефно распадање керсантита уграђених у венац на главној фасади зграде Народног музеја; в) дубинско распадање и рељефно заобљавање површине керсантита – фасада Народног музеја ка Васиной улици

Позиција каменних елемената у фасадама објеката утиче на количину воде коју керсантит прима током атмосферских падавина. Већој количини упијене воде свакако доприноси и снага ветра, присуство пукотина и прслина као и неизбежно капиларно кретање воде/влаге из тла. Када је температура током зимских месеци испод нуле, вода у унутрашњости камена се претвара у лед који својим кристализационим притисцима слаби везу између минерала. Дневне промене температуре условљавају циклично понављање процеса, и уз редовно нови принос воде, раст кристала леда ствара напоне који се на крају трансформишу у механичку енергију узрокујући прекид кохезионих веза минерала и дезинтеграцију стене (Alemany, 2007). Иста врста напона и исти крајњи резултат одвија се и приликом кристализације и хидратације соли у порама камена.

Поред интензивног агресивног деловања воде у течном и чврстом агрегатном стању, подједнако важан, а у нашем климатском окружењу и много чешћи процес, јесте кондензација водене паре која се развија како на површини камена тако и у његовој унутрашњости. Када је температура површине камена испод температуре тачке росе ваздуха, водена пара се кондензује на површини, па микропукотинама и повезаним порама продире у унутрашњост камена (Alemany, 2007). Климатске карактеристике Београда омогућавају развој описаних процеса у уграђеном керсантиту испитиваних објеката. Средњи број мразних дана током последњих сто година (око 60 дана је минимална дневна  $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и средња месечна температура током јануара (у просеку увек испод  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), стварају услове за развој процеса мржњења и отапања и генерисање напона у порама камена услед кристализације леда. Просечну годишњу релативну влажност ваздуха током последњих 100 година од око 70 % условљава и просечна количина падавина и број дана са маглом што је конзистентно развоју процеса влажења – сушења. Континуирано померање воденог фронта у површинској зони камена узрокује слабљење њене чврстоће. Као и код процеса мржњења-отапања, тако и код процеса влажења-сушења, у почетној фази долази до подкљобучавања површинске зоне, а временом и до њеног пуцања и одвајања површинских љуспи/љуски камена (Сл. 121).



Слика 121. Подкљобучавање и одвајање површинске коре керсантита (зграда Класне лутрије)

Осим физичких (механичких) процеса деструктивног деловања воде на керсантит, она је и главни узрочних процеса хемијског површинског распадања. Највидљивија промена на уграђеним блоковима керсантита јесте деколорација. Осим црне боје површинске коре формиране таложењем честица чађи, прашине и аеросоли (у каменолому црна боја површине

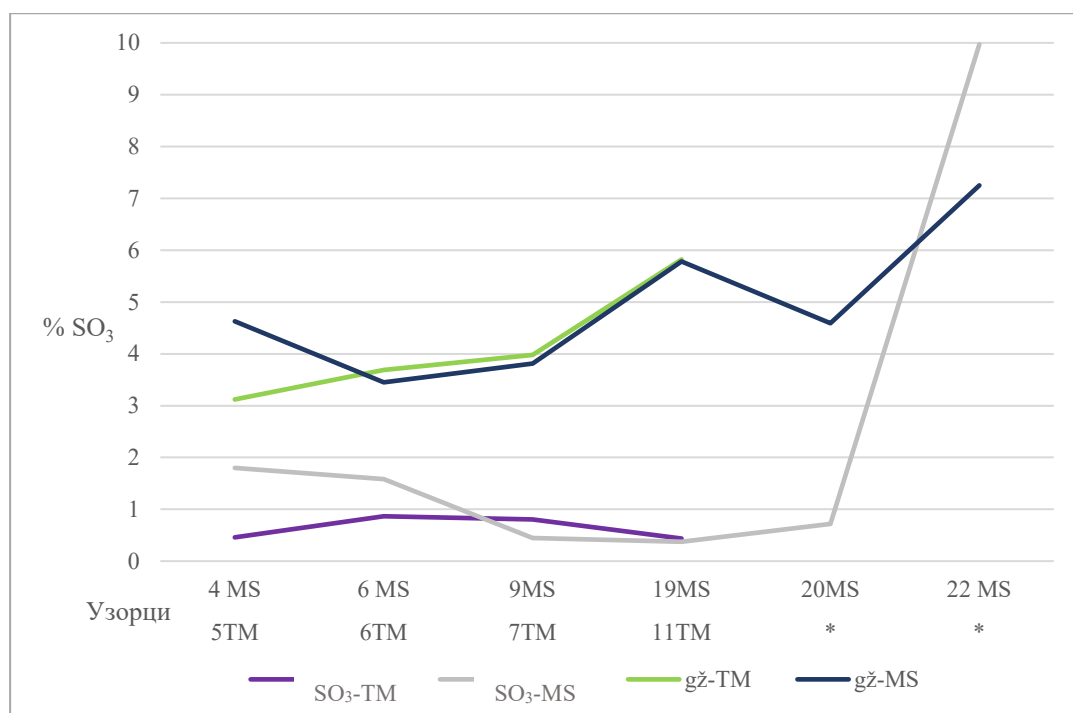


великим делом потиче услед биолошке колонизације), за керсантит је карактеристична деколорација у форми црвено-браон боје (Сл. 122а). Дефинисана је као обојена кора настала акумулацијом оксида/хидроксида гвожђа као продукта површинског распадања бојених минерала керсантита (биотита и пироксена) или присутних металичних минерала, пирита. Регистрована је како на површинама керсантита у каменолому тако и на површинама уграђених керсантита. Депоновање рецентних секундарних фаза гвожђа, као што је регистровани лимонит, не одвија се само на површини керсантита већ и у површинској зони дубине до 10 mm (Сл. 122б, в) што је несумњиво доказ развоја хемијских процеса површинског распадања.



Слика 122. Деколорација површине керсантита уграђеног у Мало степениште; а) црвено-смеђа површинска кора; б) дезинтегрисана површина керсантита в) љуспасто-зрнаста дезинтеграција са израженим оксидима/хидроксидима гвожђа; г) бронзано браон лиске површински дезинтегрисаног биотита са депонованим оксидима/хидроксидима гвожђа по површини, изолованим зрнима фелдспата у пукотини (изглед површине под бинокуларом)

У површинским условима керсантит је изложен хемијском растварању под утицајем атмосферске воде (и у њој растворених гасова и аеросола) и водених раствора обогаћених ослобођеним јонима који капиларним кретањем мигрирају из тла или других грађевинских материјала (малтера). Без обзира на порекло, ови водени раствори иницирали су промене хемијског састава, односно садржаја макро- и микроелемената у уграђеном керсантиту. Резултати хемијских анализа четири репрезентативна узорка керсантита из Тешића мајдана и шест узорака керсантита уграђеног у споменик Мало степениште, показују разлике у хемијском саставу. Оне се пре свега односе на садржаје  $SO_3$  и губитак жарењем (ГЖ) који су значајно виши у узорцима изложеним урбаној средини. Како губитак жарењем поред  $CO_2$  (садржај калцита) подразумева и садржај  $H_2O$ , јасно је да је прелазак биотита у вермикулит утицао на повишени садржај воде. Наиме, теоријски, биотит може да садржи до око 4 теж. %  $H_2O$ , док вермикулит садржи и до 18 теж. %  $H_2O$ . Са друге стране, висок садржај  $SO_3$  у узорцима керсантита директна је последица загађености животне средине и деценијама високог садржаја  $SO_2$  у ваздуху. Заправо већи део калцита је под утицајем загађености, односно високог садржаја  $SO_2$  у ваздуху, прешао у гипс. То се посебно односи на узорак 22MS - узорак црне коре (Сл. 123).

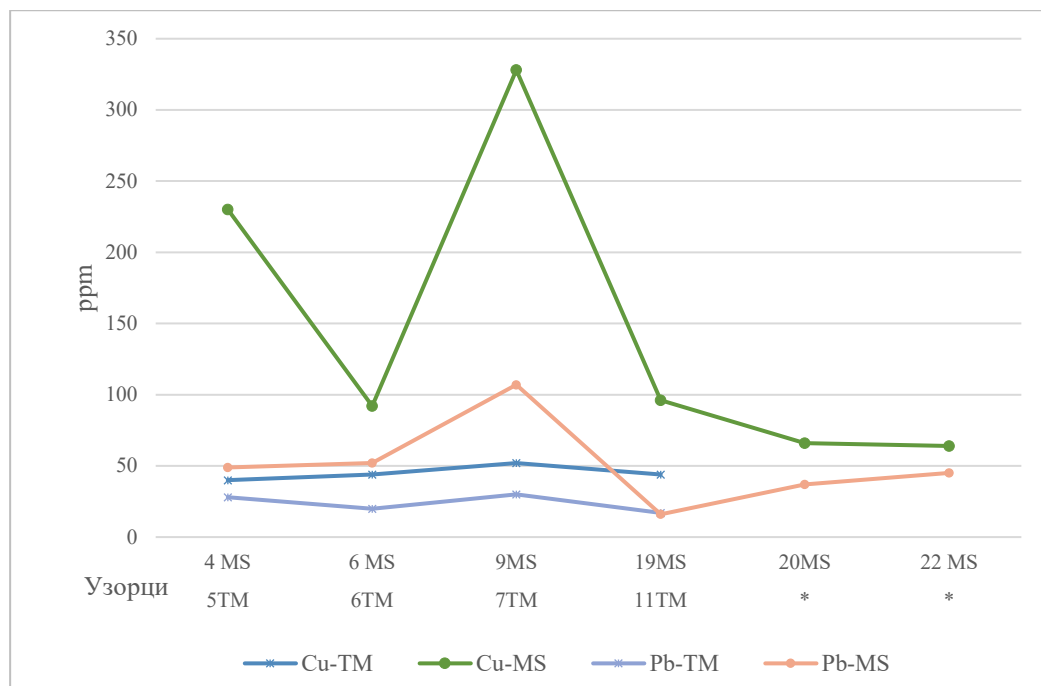


Слика 123. Садржај  $SO_3$  и губитак жарењем у испитиваним узорцима керсантита

Такође, посебне разлике у узорку 22MS у односу на све остале узорке показују садржаји  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $CaO$ . Наиме, садржаји  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  у овом узорку су значајно нижи, а садржаји  $CaO$ ,  $SO_3$  и ГЖ значајно виши у односу на све остале узорке. Ове разлике су доказ да узорак 22MS представља депоненте продуката површинског распадања, а не чврсту стену.

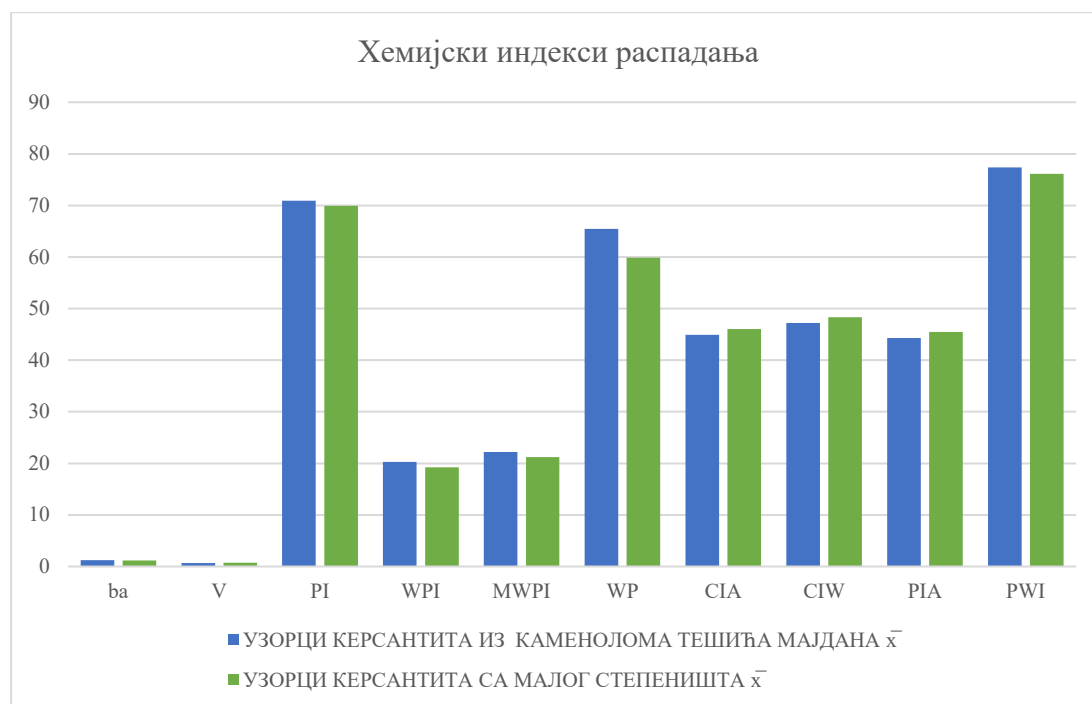
Утицај урбане средине на хемијски састав керсантита уграђеног у споменик Мало степениште, такође се види на основу садржаја појединих микроелемената. Наиме, садржај олова, бакра (Сл. 124), цинка и арсена је значајно виши у узорцима са споменика у односу на узорке истог керсантита из Тешића мајдана. Сви ови елементи углавном су везани за  $Fe$ -хидроксиде и евентуално за секундарне минерале глине који су настали на рачун фелдспата. С обзиром да је керсантит уграђен у Мало степениште деценијама изложен урбаној средини, порекло олова може се узети за некадашњу употребу бензина са вишим садржајем олова. Тако су на пример, Parekh et al., (2002) на основу расположивих статистичких података о врсти и обиму саобраћајних возила, проценили да је у Пакистану због коришћења такозваног оловног бензина, емисија олова у атмосферу била око 391 метричке тоне у току 1999. године. С друге стране, бакар, цинк и други метали се у бензину и дизелу могу наћи уколико су природни састојци сирове нафте, затим кроз контакт са опремом за рафинацију и дестилацију, као и током складиштења и транспорта (Roldan et al., 2004). Чврста горива (угаљ, дрво) која су ранијих деценија била изразито коришћена на овом простору такође могу сагоревањем проузроковати веће количине метала попут олова, бакра, цинка, арсена и других. Практично, осим воде,  $SO_3$  и сви микроелементи који се јављају у већим количинама у узорцима керсантита са споменика у односу на керсантит из Тешића мајдана су антропогеног порекла.

Значајно снижење садржаја стронцијума у узорцима керсантита са споменика Мало степениште у односу на узорке керсантита са Тешића мајдана, највероватније је последица трансформације калцита у гипс. Наиме, садржаји стронцијума у калциту углавном су виши у односу на његове садржаје у гипсу.



Слика 124. Садржај бакра и олова у испитиваним узорцима керсантита

Хемијски индекси распадања базирани на односима главних оксида користе се као индикатори брзине површинског распадања стена у каменолому (Torabi-Kaveh et al., 2023; Јоксимовић и др., 1994; Price and Velbel, 2003). Компарација вредности израчунатих индекса хемијског распадања за узорке керсантита у каменолому и уграђених керсантита приказана је на слици 125.



Слика 125. Хистограм вредности хемијских индекса распадања

Тренд односа хемијских индекса керсантита из каменолома и керсантита у Малом степеништу сагласан је литературним подацима. Тако на пример Фогтов индекс распадања V (Vogt, 1927), Паркеров индекс распадања (Parker, 1970), и коефицијент *ba*, имају веће вредности за керсантит Тешића мајдана у односу на узорке са Малог степеништа. Индекси CIA, CIW и PIA показују очекивано веће вредности за узорке керсантита са објекта у односу на керсантит из каменолома. Дијаграм  $Al_2O_3$ ,  $(CaO + Na_2O)$ ,  $K_2O$  са упоредним односом CIA индекса (Сл. 98)



указује на веома слаб интензитет површинског распадања керсантита, с обзиром на мишљење да стене и минерали без површинског распадања имају CIA вредности око 50 (Nesbitt and Young, 1982; 1984; 1989). Тумачење добијених ниских CIA вредности даље наводи на закључак да је током површинског распадања керсантита било слабо осиромашење мобилним катјонима (Ca, Na, K) у односу на стабилне елементе као што су Al, Ti током процеса површинског распадања (Nesbitt and Young, 1982). И поред констатованих очекиваних односа вредности индекса за керсантите из каменолома и Малог степеништа, потребно је истаћи да се утврђене разлике генерално могу тумачити као одраз ниског интензитета површинског распадања, односно да нема значајних измена у хемијском саставу иницираних површинским распадањем. Овако тумачење резултата је супротно оцени стања уграђеног камена са аспекта морфолошких промена и регистрованог интензитета форми распадања као и резултатима петрографске анализе. Са друге стране, ова супротност је прихватљива, с обзиром да је компарација вршена између узорака хидротермално алтерисане стене, узетих са површине стенске масе у каменолому и исте стене уграђене у објекат, изложен стогодишњем деловању фактора површинског распадања. У таквој консталацији разлика у индексима и не може бити већа, посебно ако се узме у обзир геолошко и архитектонско поимање времена. Наиме, у савременој архитектури се период од сто до сто педесет година сматра изузетно дуготрајним, док у геолошком смислу ова временска одредница је скоро безначајна са аспекта површинског распадања. Међутим, како конзерваторска пракса увек за циљ има продужетак животног века материјала који су у функцији архитектуре, чак и оних који егзистирају и преко две хиљаде година, одрживост и трајност је потребно сагледавати између ових појмова.

Као што је већ речено, водени раствори са јонима ослобођеним из растворених минерала, компоненти цементног малтера или земљишта, у зависности од pH и Eh (оксидационо-редукциони потенцијал) раствора, као и релативне влажности и температуре околине, иницирали су развој хемијских процеса: растварања, хидролизе, оксидације и хидратације. Као резултат ових процеса формиране су рецентне секундарне минералне фазе и то: вермикулит, Fe оксиди/хидроксици, хлорит, калцит и лако растворљиве соли (гипс, тенардит, халит). Нови секундарни минерали довели су до нарушавања минералне кохезије у површинској зони керсантита, што се манифестовало зрнастом дезинтеграцијом.

С обзиром да су биотит и минерали глина у површинским условима осетљиви на процес хидратације која изазива слабљење камена (Snethlage and Wendler, 1997; Funatsu et al., 2004; Scherer and Jimenez-Gonzalez, 2005; Wedekind et al., 2012; Tiennot et al., 2017) јасно је да хлоритисани биотит керсантита, под утицајем атмосферске воде, лако подлеже хемијским процесима распадања уз образовање слојевите интерстатификације биотит-вермикулит (Schoeman, 1989; Schroeder et al., 2000; Fang et al., 2019; Rama et al., 2019). Кроз континуиране физичко-хемијске процесе (растварање, адсорпцију, катјонску измену), изазване циркулисањем атмосферске воде, долази до одласка  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$  и  $Fe_2O_3$  из биотита, уз обогаћивање  $SiO_2$  и  $MgO$  и формирање вермикулита ( $Mg-Fe$  хидратисани алумосиликат) као крајњег продукта распадања биотита (Boettcher, 1966; Dubinska and Wiewióra, 1988; Hillier et al., 2013; Tematio et al., 2017). Механизам формирања почиње заменом  $K^+$  молекулима  $H_2O$ , оксидацијом  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  и заменом  $OH^-$  са  $O^{2-}$  када се формира интерстратификација биотит-вермикулит (Basett, 1961; Srodon, 1999; Wilson, 1970; 1986; Moon et al., 1994). У следећој фази, увођењем још веће количине  $H_2O$  на рачун  $K^+$ , и заменом Fe са Mg, формира се вермикулит као финални производ (Harras and Hamdi, 2010), са веома слабом кохезијом између слојева у којима међуслојни катјони заузимају само трећину расположивих позиција (Erić, 2019). С обзиром на интензивну бронзано-браон боју лиски биотита у керсантиту са споменика/објеката, губитак полихроизма, избелене и искрзане лиске и резултате SEM-EDS и XRPD анализа, евидентно је да биотит има све одлике трансформације у интерстратификацију биотит/вермикулит (Ross et al., 1982; Fanning et al., 1989; Moon et al., 1994). Како је брзина замене  $K^+$  са хидратисаним катјонима пропорционална величини лиски биотита (Scott, 1968, Ross & Rich, 1973), крупноћа биотита у уграђеном керсантиту погодује

хемијској трансформацији. Иако се биотит богат флогопитском (Mg) компонентом лако и брзо трансформише у вермикулит у површинским условима (за само 15 година; Basset, 1961), ипак кључни фактор вермикулитизације јесте расположивост Mg. Висок садржај Mg у биотиту погодује формирању вермикулита (Hoda and Hood, 1972; Murakami et al., 2003), а управо такву врсту представља биотит уграђеног керсантита из Тешића мајдана (Sokol et al., 2020). Узимајући у обзир претходно наведено, а у складу са добијеним резултатима, може се закључити да је биотит у испитиваном керсантиту трансформисан у интерстратификацију биотит-вермикулит. Тврдњу подржавају резултати компарације оптичких и морфолошких карактеристика биотита у керсантиту Тешића мајдана, односно, начин раслојавања и ексфолијација дуж равни цепљивости биотита у уграђеном керсантиту (Сл. 102). Трансформација је праћена оксидацијом  $Fe^{2+}$  дуж испраних лиски биотита или микропукотинама (Сл. 122г) што је сагласно резултатима претходних студија (Bisdorn et al., 1982).

Са описаном хемијском трансформацијом, истовремено се одвија и физичка дезинтеграција биотита. Познато је да хемијска трансформација иницира повећање међуслојног растојања са 10 Å у биотиту на 14 Å у вермикулиту (Banfield and Eggleton, 1988) уз последично ослобађање напона и стреса акумулираног током хемијске трансформације. Енергија ослобођена механичким напрезањима узрокује бубрење и отварање нових микропукотина и прслина тј. нових путева за слободно циркулисање водених раствора (Tiennot et al., 2017). Ако се томе придода и чињеница да уграђени керсантит примарно има висок садржај минерала (пироксен, биотит, хлорит, калцит) савршене цепљивости, што су природни предиспонирани правци могућег циркулисања раствора, новоотворени слободни простори настали секундарним процесима површинског распадања додатно поспешују агресивно растварачко деловање воде/раствора.

Оксиди/хидроксида гвожђа су очекивани рецентни секундарни преципитати процеса површинског распадања биотита и других гвожђевитих минерала што је доказано и експерименталним проучавањима (Murakami et al., 2003). Они су истовремено још једно обележје раног стадијума распадања биотита, с обзиром да је према истим ауторима то стадијум када раствори око зрна биотита лако достижу стање суперзасићења услед слабе повезаности са главним правцима циркулисања воде. То резултира депоновањем значајних количина оксида/хидроксида гвожђа, односно гетита и/или аморфног лимонита. Стварање оксида/хидроксида гвожђа резултирало је хроматском модификацијом уграђеног керсантита и формирањем црвено-смеђе површинске коре (Сл. 122). Осим наведене хроматске промене, последица описаних процеса је и повећан садржај оксида гвожђа, одређен хемијском анализом, у узорцима уграђених керсантита у односу на узорке керсантита из каменолома. Ове слабо растворљиве фазе оксида/хидроксида гвожђа настале су као резултат оксидације растворених Fe (II) јона, ослобођених из примарних минерала богатих гвожђем, у присуству воде/влаге. Црвено-смеђа површинска кора представља средину где растворени  $O_2$  из атмосфере, заједно са чврстим Fe (III) фазама, повећава редокс потенцијал воденог раствора и доприноси даљој оксидацији Fe (II) у чврсте Fe (III) депоненте на површини камена (Franzen and Fischer, 2022).

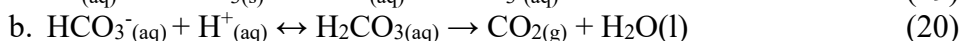
С обзиром да XRPD анализама узорака површинских кора керсантита није утврђено присуство кристалних минералних фаза гвожђа, нема сумње да хроматска модификација површине керсантита и црвеносмеђа боја површине уграђеног керсантита потичу од депонованог лимонита. Присуство сфероидних, дендритичних облика и лепезастих агрегата Fe (III) оксида/хидроксида, регистрованих SEM анализама површинских кора керсантита, које иначе нису типичне за природне стене, несумњиво указује на комплексне хемијске процесе у целокупном површинском распадању уграђеног керсантита (Novaković et al., 2016). Одсуство описане хроматске промене на површинама керсантита у ентеријерима појединих објеката додатно потврђује висок агресивни утицај спољашњих атмосферских фактора средине на стање уграђеног камена.

Растварањем минерала керсантита, али и компоненти цементног малтера коришћеног при претходним рестаураторским интервенцијама, ослобађају се јони  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  и растворима даље мигрирају кроз површинску зону камена. Такви раствори у спрези са другим атмосферским агенсима ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  итд.), под одређеним температурним условима и zasiћењу раствора, граде секундарне продукте распадања, међу којима су растворљиве соли најагресивније по даљу стабилност камена (Arnold and Zehnder, 1989; Duffy et al., 1993; Perry and Duffy, 1997). SEM – EDS и XRPD анализама је констатовано присуство гипса на површинама керсантита у каменолому, односно гипса, тенардита, двоструких Na-Ca сулфата и халита у уграђеном керсантиту.

Гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) је најдоминантнија со присутна у два морфолошка облика, у моноклиничним призматичним кристалима и у карактеристичној форми „пустињске руже“. Настанак гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) може се објаснити већ познатим процесима растварања калцијум карбоната и оксидације  $\text{SO}_2$  у капљицама воде са стварањем  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и даљом реакцијом са јонима  $\text{Ca}^{2+}$  који се ослобађају растварањем минерала, пре свега калцита.

Процес трансформације калцита присутног у керсантиту у гипс подразумева најпре растварање калцита а потом преципитацију гипса и може се представити на следећи начин:

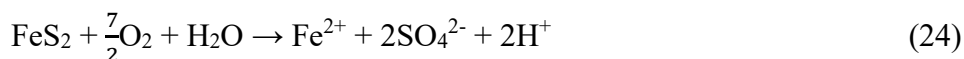
- I. У контакту са водом, калцијум карбонат се раствара при чему ослобађа калцијумове и карбонатне јоне. Реакције/формуле 19 и 20 показују растварање калцита које се дешава када се калцит нађе у киселим условима, обично на pH 4–5 (Brown et al., 1993; Wilkins et al., 2001; Jones et al., 2003; Bouchelaghem, 2010).



- II. Излагање минерала (делимично раствореног калцита) сумпорној киселини (која потиче из атмосферског  $\text{SO}_2$  – реакције 21 и 22) доводи до брзог формирања слоја калцијум сулфата који смањује брзину растварања калцита и може потпуно пасивизирати површину против даље реакције и растварања - реакција 23 (Booth et al., 1997; Alimi et al., 2003; Bouchelaghem, 2010).



С друге стране, на формирање гипса може утицати и распадање пирита. То потврђује присуство гипса и у узорцима керсантита из Тешића мајдана који се не налазе у урбаној средини. Гипс се и у овом случају формира дејством сумпорне киселине на калцит, али се њен настанак, односно настанак сулфатних јона везује за оксидацију пирита. Наиме, када је пирит изложен утицају околине, услед природних процеса, долази до оксидације када формира сумпорну киселину у присуству влаге. Реакција 24 описује оксидацију пирита у присуству воде која доводи до стварања киселих ( $\text{H}^+$ ), сулфатних ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) и  $\text{Fe}^{2+}$  јона (Akcil and Koldas, 2006; Dos Santos et al., 2016):



Гипс је редован састојак у наслагама соли које се манифестују у виду ефлоресценције, али је такође и редован састојак црних површинских кора. С обзиром да црне коре на површини камена представљају баријеру за евапорацију воде, оне истовремено олакшавају циркулацију раствора и миграцију гипса у порни систем камена (Franković, 2022). Са већ поменутих циклусима влажења-сушења одигравају се и циклични процеси растварања и рекристализације гипса који својим притисцима иницира механичку дезинтеграцију керсантита.

Поред гипса као доминантно присутне соли, на површинама уграђеног керсантита је

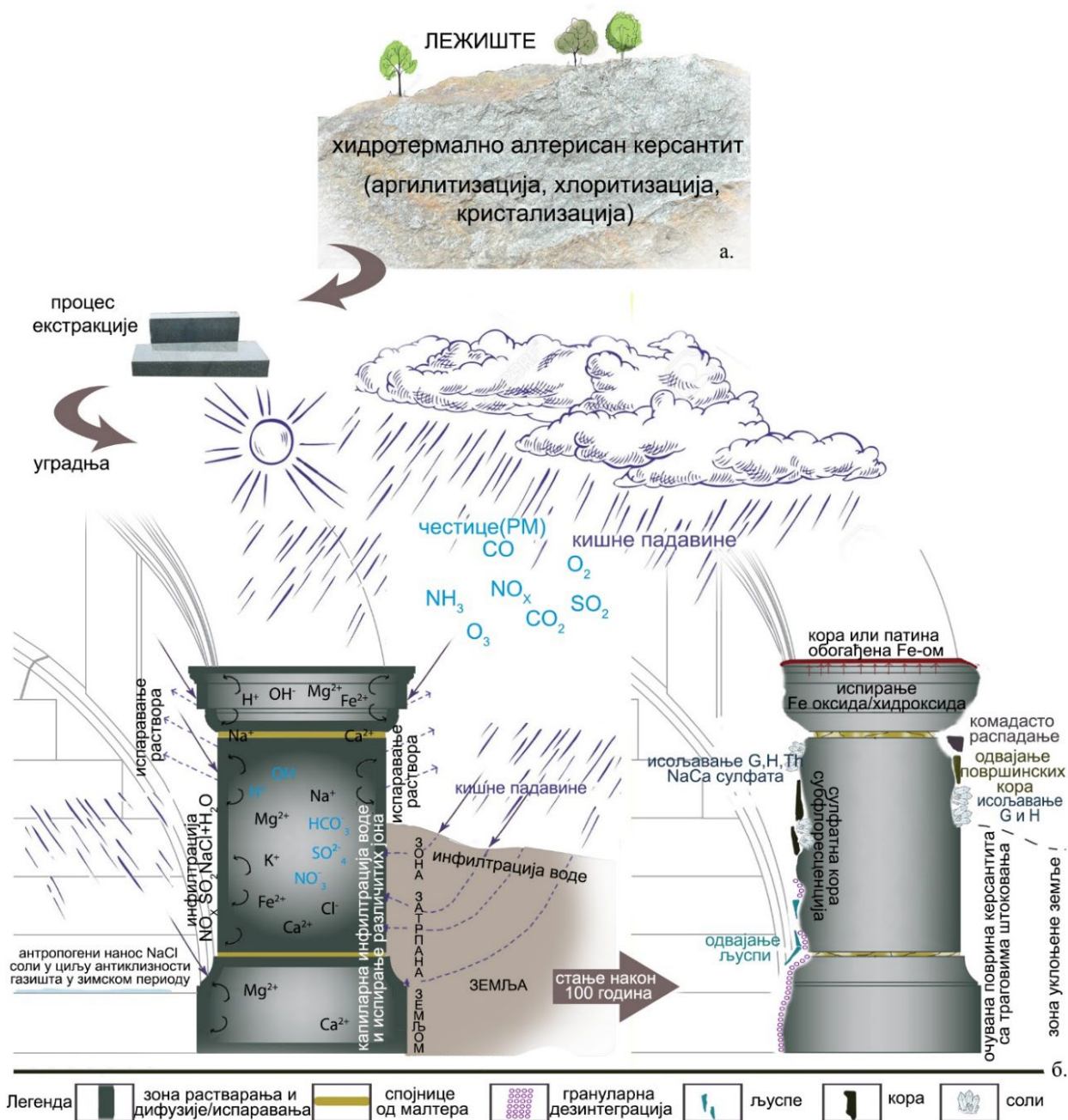


регистровано и присуство тенардита ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) који у влажној средини лако прелази у хидратисану фазу – мирабилит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). Тенардит и мирабилит су соли изузетно јаких кристализационих притисака (Flatt, 2002; Steiger and Asmussen, 2008). Порекло тенардита се везује за циркулисање водених раствора кроз керсантит и цементни малтер. Ови раствори обогаћени јонима  $\text{Na}^+$  и у комбинацији са јонима  $\text{SO}_4^{2-}$  резултирају настанком тенардита (Duffy et al., 1993; Perry and Duffy, 1997). Додатно присуство  $\text{Ca}^{2+}$  јона у раствору (пореклом од раствореног калцита, гипса или цементног малтера) поспешује и стварање двоструких  $\text{Na-Ca}$  сулфатних соли (Orti et al., 2002; Matović et al., 2014), такође регистрованих у површинским корама керсантита. Позиција исцветавања регистрованог халита ( $\text{NaCl}$ ) на површинама газиста објекта Класне лутрије или капиларно подигнутих раствора и исцветавања на вертикалним површинама Малог степеништа, објашњава антропогено порекло ове соли (посипање соли у зимском периоду). Све идентификоване соли, удружене или самостално, својим кристализационим и хидратационим притисцима изазивају промене запремине (Flatt and Scherer, 2002), ширење постојећих микропукотина као и развој нових (Sousa et al., 2018), што резултира процесима распадања у површинској зони камена.

Целокупан процес хемијског растварања, миграције јона, циркулације раствора из различитих извора и депоновање продуката распадања на површини керсантита уграђеног у Мало степениште, приказан је шематски на слици 126а, б.

Осим описаних соли, у површинским корама керсантита редовно су присутне порозне угљеничне сфероидне честице. Њихово присуство води порекло од атмосферских загађивача присутних у ваздуху у Београду. Према доступним подацима Републичког хидрометеоролошког завода Србије (детаљан мониторинг од 1978. године), садржај главних загађујућих материја у ваздуху ( $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$ ) је до 1991. године био изузетно висок због емисија из термоелектрана и индустријских постројења која се налазе у окружењу Београда (ХИП-Азотара и ХИП-Петрохемија у Панчеву и Фабрика нерђајућег челика (Железара) у Смедереву) (Unkašević, 1994). Иако је последњих деценија значајно смањен садржај  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$ , Београд се и даље често карактерише високом позицијом на листи најзагађенијих градова у свету. Средње годишње вредности концентрација угљен-моноксида, азота, азот-диоксида, олова и сумпор-диоксида који потичу из издувних гасова аутомобила су изнад дозвољених вредности (Gburčik et al., 2002). Поред поменутог извора, значајни емитери су и топлане у Београду и локалне котларнице које користе угаљ или тешка лож уља. Њиховим сагоревањем се емитију додатне количине угљен-диоксида, сумпор-диоксида и чађи. Поменути извори емитију порозне угљеничне честице које делују као катализатори оксидације  $\text{SO}_2$  у  $\text{SO}_3$  у ваздуху или површини камена (Amoroso and Fasina, 1983) и тиме доприносе како стварању киселих киша, тако и убрзаном растварању калцита присутног у керсантиту, стварању гипса и других растворљивих соли.

Сви описани процеси површинског распадања керсантита, поред морфолошких, минералošких и хемијских промена, условили су и промену његових физичких својстава па тиме и квалитета као архитектонског камена. Керсантит Тешића мајдана, према вредностима привидне запреминске масе, укупне порозности и упијања воде, припада категорији тешког камена, умерено порозног са малим упијањем воде. Према истим физичким својствима керсантит Малог степеништа се категорише као средње тежак, веома порозан камен са осетним упијањем воде. Да су процеси површинског распадања (поред третмана површинске обраде) отворили нове путеве за циркулисање водених раствора, потврђују резултати пораста порозности и упијања воде керсантита уграђених у објекте, у односу на керсантит из Тешића мајдана. Средња вредност укупне порозности уграђених керсантита од 10,4 % је троструко већа у односу на исти параметар стене из каменолома (3,87 %).



Слика 126. Механизам распадања уграђеног керсантита; а) скица лежишта проучаване стене; б) шематски цртеж деградационих процеса на испитиваном споменику; в) претпостављени правци кретања воде (модификовано, Novakovic et al. 2023)

С обзиром да су вредности укупне и отворене порозности веома блиске, добра повезаност пора омогућава лако кретање раствора кроз камен па је и средња вредност упијања воде са 0,98 % достигла вредност од 3,6 % у уграђеном керсантиту. Измерене вредности коефицијента капиларног упијања воде сврставају керсантит Тешића мајдана у стене умереног капиларног упијања воде (средња вредност  $2,047 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0.5}$ ; Sneath, 2005), док узорци из објеката имају високу апсорпцију капиларног упијања воде ( $5,037 \text{ g/m}^2/\text{s}^{0.5}$ ), што је повећање способности капиларног упијања воде од 246 %. Високе вредности параметара порозности, атмосферског и капиларног упијања воде додатно повећавају осетљивост керсантита према дејству мрза и соли, односно негативно утичу на његову алтерабилност као архитектонског камена.

Промене физичких својстава свежег камена из каменолома и уграђеног у објекат користе се као показатељи интензитета површинског распадања. Тако на пример уколико је порозност свежег гранита око 1%, пораст вредност на 2 % се оцењује као рани стадијум распадања (Sousa

et al., 2005; Hofmann and Siegesmund, 2007; Mosch and Siegesmund, 2007; Mosch, 2009; Vázquez et al., 2010, 2018). Екстраполацијом наведене тврдње на испитиване керсантите, интензитет промена физичких својстава, након сто година изложености површинским условима и различитим антропогеним утицајима, оцењује се као изузетно висок, односно, испитивани уграђени керсантит је у значајној мери подлегао процесима површинског распадања.

### 19.1.2. Ефекти завршне обраде керсантита на интензитет површинског распадања

Познато је да типови површинске обраде различито утичу на физичко-механичка својства камена у зависности од петрографске врсте и његовог минералног састава. Међутим, независно од литолошке врсте камена, површинским третманима се увек постиже исти ефекат на боју камена. Колориметријска испитивања су потврдила да се полирањем и брушењем појачава хрома и zasiћеност боје камена, док се термичком обрадом, штоковањем, пескирањем, шпицовањем и браздањем повећава осветљеност боје (Benavente et al., 2003).

Поред бројних, претходно описаних, екстринзичних фактора који утичу на брзину и форме површинског распадања уграђеног камена, изузетно велики утицај имају и процеси експлоатације камена из каменолома као и сви каснији процеси површинске обраде. Обрада камена, иако је још 1932. године препозната као важан контролни фактор распадања (Schaffer, 1932), аспекти деловања различитих третмана још увек нису у потпуности разјашњени и доказани експерименталним резултатима. Несумњиво је да експлоатација, димензионисање и процеси површинске обраде могу да створе бројне врсте дисконтинуитета и оштећења. Док полирање смањује порозност камена (најфиније честице приликом процеса полирања запуњавају порни простор), брушење ствара испупчења у деловима где су крупна зрна резистентна на овај тип обраде (García-del-Cura et al., 2008). Полирање утиче крајње негативно на отпорност на клизање, али термичка обрада подстиче високу антиклизавост. Од свих начина површинске обраде штоковање има најбољи ефекат на антиклизавост, али и највећи негативан ефекат на алтерабилност камена. Штоковање као врста површинске обраде, осим рустичног изгледа и осветљавања природне боје камена, резултира микрофрактурисањем, стварајући предуслове за касније љускање камена (Schaffer, 1932). Поред постојећих генетских пукотина и микропрлина у камену, микрофрактурисање изазвано штоковањем отвара нове путеве циркулисања флуида који убрзавају процесе распадања (Andre and Phalip, 2010), а у стенама богатим лискунима, редовно изазива њихову дезинтеграцију (García-del-Cura, 2008) што је потврђено и на испитиваном керсантиту.

Резултати мапирања су потврдили да екстринзични фактори различито делују на алтерабилност различито обрађених површина керсантита. Утицај атмосферилија на полиране површине проучаваних споменика културе (споменик Ђури Јакшићу и Јовану Скерлићу) и после стогодишње изложености у агресивној урбаној средини је сведен на минимум. Полиране површине су без регистрованих губитака каменог материјала, а уочена оштећења у виду биолошке колонизације или пукотина су веома ниског интензитета. То потврђује чињеницу да полирање као врста површинске обраде, вештачким смањењем порозности (García-del-Cura et al., 2008) изложене површине камена, доприноси повећању временске трајности и отпорности на негативан утицај атмосферских фактора. Наведену тврдњу подржавају резултати испитивања коефицијента капиларног упијања воде различито обрађених површина, међу којима полирана површина има најмањи коефицијент ( $1,760 \text{ g/m}^2/\text{s}0.5$ ) у поређењу са добијеним резултатима за резану, четкану и штоковану површину керсантита.

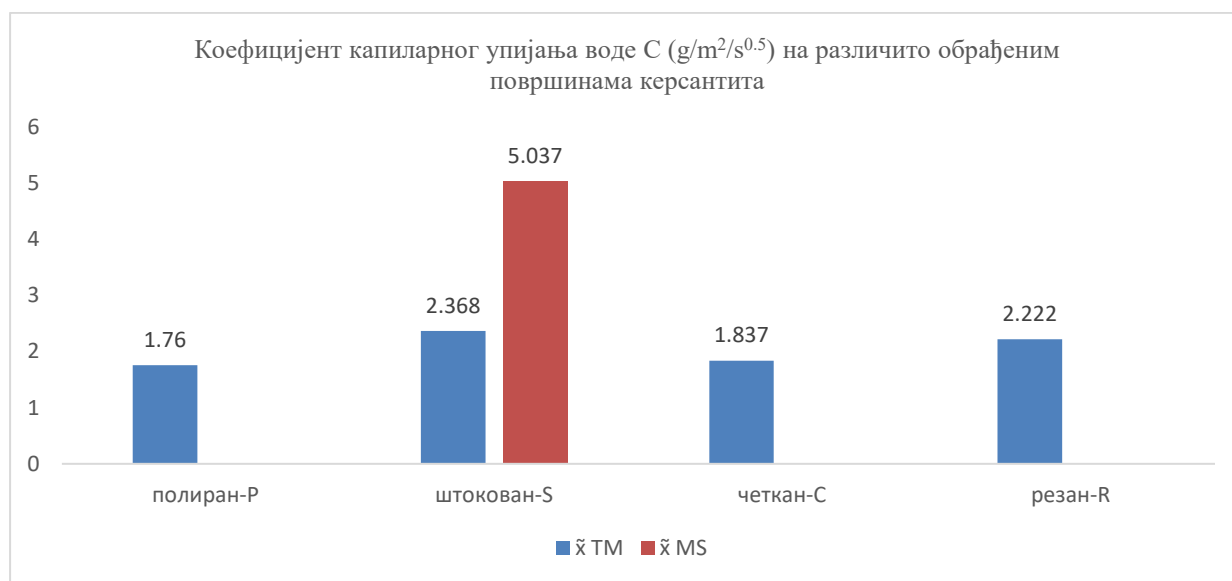


Слика 127. Интензивно љускање штоковане површинске зоне керсантита без или са делимично очуваним остацима примарне површине



Клесане, резане и буњасто обрађене површине уграђеног керсантиа такође показују висок степен очуваности интегритета за разлику од штокованих површина које су редовно без, или са ретко очуваним остацима оригиналне површине (Сл. 127). Осим значајног губитка каменог материјала ове површине показују и највише регистроване интензитета деградације што доказује висок степен површинског распадања. Поред постигнутог рустичног изгледа керсантиа, штоковање је механичким поступком ударне обраде, пре уградње, формирало „вештачки ослабљену” површинску зону/слој. Генерисањем микропрелина и пукотина, штоковање је механички дезинтегрисало лиске биотита и хлорита, фрактурисало фелдспате и калцит и омогућило врло лаку циркулацију водених раствора кроз интер- и интракристиалне микропукотине у површинској зони. Механички ослабљена на овај начина, зона повећане порозности и упијања воде је током времена, под агресивним утицајем средине, постепено губила везу са остатком камена, што је у складу са опште познатом чињеницом да кластери микропукотина представљају зоне камена најсензитивније на распадање (Benavente et al., 2003; Sousa et al., 2005). Кретање воденог фронта уз континуиране процесе растварања и физичке дезинтеграције у механички предиспонираној ослабљеној зони, манифестује се одвајањем површинске љуске, готово увек исте дебљине око 3-5 mm (Сл. 127). Након одвајања површинског слоја, новоотворена површина подлеже даљем распадању, најчешће љуспасто-зрнастој дезинтеграцији, што је сагласно резултатима истраживања и на другим штокованим литотиповима (Bromblet et al., 1996; Benavente et al., 2008; Vázquez et al., 2008).

Поређењем морфолошког изгледа различито обрађених површина узорака керсантиа на скенирајућем електронском микроскопу оцењен је степен утицаја третмана на интегритет површине керсантиа (Сл. 115). Полирани узорци керсантиа, са готово идеално глатким и равним површинама, имају највећи степен компактности без видљивих отворених пора и без пукотина што потврђују и резултати коефицијента капиларног упијања воде. Карактерише их равна површина. У односу на опадање степена компактности, следе четкане површине са мањим удубљењима и неравнинама, док су резане површине храпаве, уз појаву бројних удубљења до 0,2 mm дубине. Најмање очувани интегритет је на штокованој површини. Ударни поступци механичке обраде створили су потпуно неравну површину са бројним удубљењима значајних димензија и вештачки генерисаним отвореним пукотинама и прелинама са зјапом око 100  $\mu\text{m}$  и милиметарских димензија пружања, што је сагласно резултатима SEM студија спроведених на гранитима и мермерима (Allesandrini et al., 1979). Повећање порне мреже изазвано штоковањем резултирало је и највећим коефицијентом капиларног упијања у односу на друге типове површинске обраде (Сл. 128).



Слика 128. Хистограм средњих вредности коефицијента капиларног упијања воде различито површински обрађених површина и деградираних штокованих површина након стогодишње изложености атмосферским условима

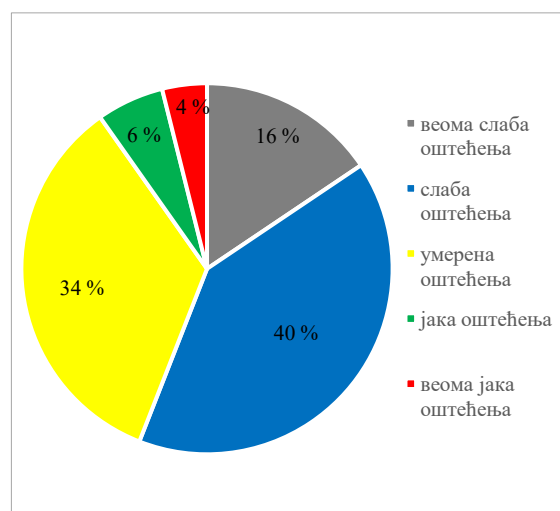
Добијени резултати су новина у овом пољу ретких истраживања, с обзиром да су у супротности са резултатима истраживања према којима нема разлика међу кривама апсорпције (Rojo et al., 2003), и најмању брзину капиларне апсорпције показују гранити са полираном и штокованом површином (García-del-Cura, 2008). Поузданост резултата добијених истраживањима у оквиру ове дисертације потврђују и резултати SEM испитивања штоковане површине керсантиа Малог степеништа, деценијама изложеног атмосферским утицајима. На њима је констатовано одсуство примарне површине, али редовно присуство паралелних пукотина и прлина са површином камена, са зјапом од 0,5-3 mm. Пукотине су макроскопски уочљиве до дубине од 2 cm што истовремено мармира и ослабљену површинску зону камена подложну даљем раслојавању, фрагментирању, дезинтеграцији и одвајању од преосталог дела субстрата. Двоструко увећана вредност коефицијента капиларног упијања воде потврђује чињеницу да штоковање, повећањем порозности и способности упијања воде, подстиче већу подложност површинском распадању (Allesandrini et al., 1979).

### 19.1.3. Утицај геометрије споменика и позиције блокова на распадање керсантиа

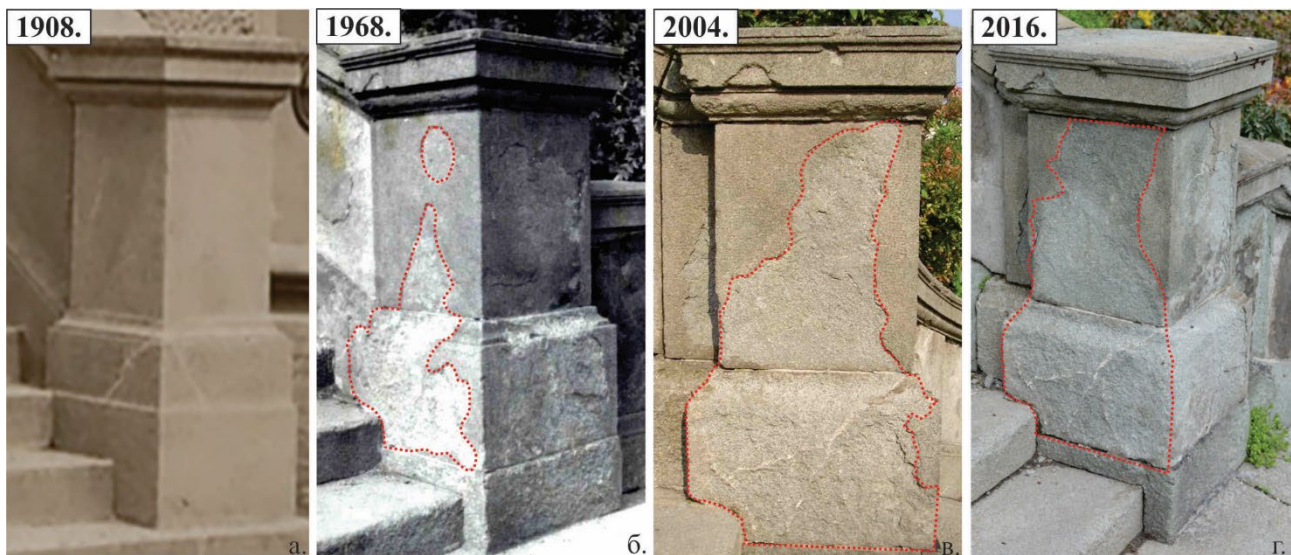
Архитектонски облик споменика и његов геометријски положај и оријентација, идентификовани су као још један од кључних екстринзичних фактора који су допринели стању уграђеног керсантиа. Мало степениште је споменик изграђен без конструктивне основе - темеља, на терену са нагибом од 24 %. Начин и правац одвођења атмосферске воде дуж површина камених елемената, уз континуирано испирање подлоге, условио је микроклизање и последично механичко померање газишта из првобитног положаја. У појединим сегментима споменика, као што је подест, геометрија је допринела дужем задржавању воде, посебно у периодима великих атмосферских падавина, услед отицања са горњег платоа и централног степеништа.

Анализом резултата мапирања, а посебно резултата линеарног и прогресивног индекса распадања израчунатих за цео споменик и појединачне сегменте споменика (Сл. 51), омогућено је идентификовање зона највећег интензитета и категорија распадања керсантиа. Посматрајући споменик у целини, највећи проценат оштећења је у категорији слабих (40 %) и умерених (34 %) оштећења (Сл. 129), међутим, високе средње вредности индекса распадања ( $DI_{lin} = 2.42$ ,  $DI_{prog} = 2.58$ ) указују на прогресију распадања и висок степен угрожености споменика.

Квантификована евалуација распадања керсантиа, изражена наведеним индексима распадања, потврђује велику брзину површинског распадања елемената са штокованим видним површинама, посматрано у временском интервалу од 108 година изложености површинским условима (Сл. 130).



Слика 129. Заступљености различитих категорија оштећења на малом степеништу



Слика. 130. Хронолошки приказ промене изгледа површине каменог елемента керсантиа током 108 година изложености различитим екстринзичним факторима средине (а) и б) документација Завода за заштиту споменика културе града Београда; в) аутор фотографије Весна Матовић, г) фотографија аутора)

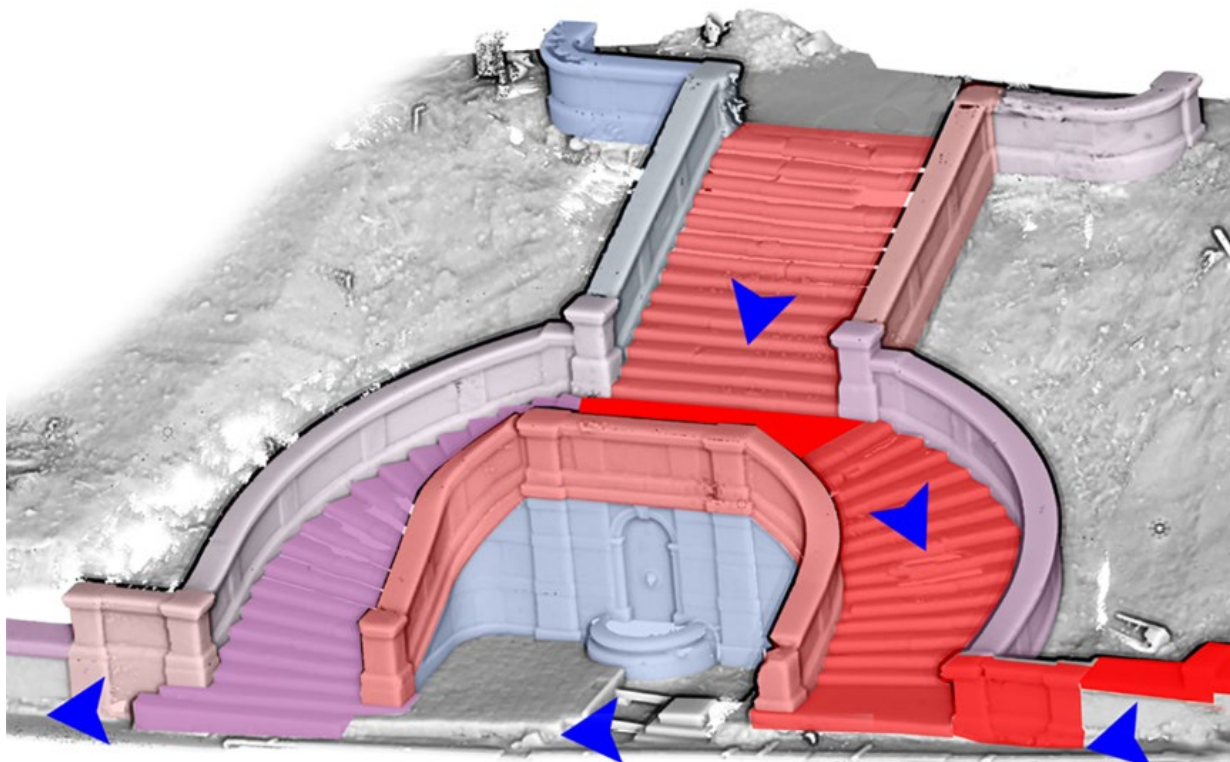
Хронолошким праћењем промене величине распаднуте површине истог каменог елемента, утврђено је да је у првих 60 година губитак каменог материјала површинског слоја износио 42,8 % (Сл. 130б). Наредних 36 година увећале су губитак на 74,5 % (Сл. 130в), да би након још само 12 година изложености урбаној агресивној средини, губитак оригиналне површине износио 90,03 % (Сл. 130г).

Анализом споменика у целини, регистрована су јака и веома јака оштећења у распону од 4–6 %, међутим, анализа резултата за појединачне сегменте споменика указује на приметно одступање сегмената бр. 15 и 6 где је 16 % елемената у категорији јаких и 34 % у категорији веома јаких оштећења. Сегменте бр. 6 и 7 карактерише веома висока вредност индекса распадања ( $DI_{lin} = 2.7$ ,  $DI_{prog} = 2.9$ ) као резултат ударног правца тока воде низ две равни, дуж тротоара и низ падину. Сегменти су изложени продуженом агресивном деловању водених раствора што је резултирало интензивним површинским распадањем. Зону споменика са највећим степеном задржавања воде, сегмент 15 (подест), карактерише највећи индекс распадања блокова ( $DI_{lin} = 3.35$ ,  $DI_{prog} = 3.49$ ), док су најниже вредности линеарног и прогресивног индекса забележене код сегмената бр. 5 и 10, позиционираних на највишој коти споменика.

Анализом понашања индекса распадања у односу на геометријску позицију у споменику закључено је да су вредности индекса обрнуто пропорционалне висини (коти) на којој се сегмент налази. Такође је констатовано да постоје значајне разлике између десног и левог дела степеништа, како у погледу правца, тако и динамике промена у вредности индекса. Док је у левом делу степеништа регистрована мала промена индекса распадања, десни део степеништа показује веће разлике у вредностима индекса. Ово потврђује да је нагиб споменика још један од кључних елемената који утиче на интензитет распадања.

Корелација нумеричких вредности индекса са геометријом и нагибом споменика резултирала је интегрисаним колоризованим моделом главних праваца кретања/протока воде низ падину и дуж тротоара (Сл. 131).





Слика 131.3Д Модел Малог степеништа са градираним бојама сегмената према интензитету вредности  $DI_{prog}$  (највећи интензитет – најјача црвена боја) и обележеним главним правцима кретања воде

Дефинисање доминантних путања кретања воде у два правца олакшава разумевање високог интензитета деградација блокова позиционираних у централном и десном делу степеништа, у огради централног степеништа и у огради дуж тротоара. Осим тога, индекси распадања у корелацији са положајем камених елемената на микролокацији споменика, указују на важност сагледавања свих параметара који утичу на стање керсантита у објектима културног наслеђа.

За разлику од интензивно деградираних блокова изложених атмосфери, упадљив феномен на испитиваном објекту, Малом степеништу, је потпуна очуваност примарних површина блокова који су деценијама били под земљом. Услови покривености земљом успорили су природни процес деградације површина керсантита, а у појединим случајевима потпуно очували њихово примарно стање. Степен очуваности се повећава са дубином без обзира што су и најдубљи делови камених елемената још увек у зони мржњења, али и ниских варијација влажности. У таквим условима, без значајних осцилација температуре и релативне влажности ваздуха, са брзим процеђивањем атмосферских вода условљеног нагибом терена, чак и штоковане примарне површине остале су очуване у потпуности. Једини регистровани облик деградације јесте ефлоресценција која маркира контактну зону тло/атмосфера. Регистровано стање керсантита указује да прекривање камена природним материјалом као што је земља, пружа значајну заштиту од површинског распадања, односно његову природну „конзервацију“. Добијени резултати су у складу са резултатима јединствене експерименталне студије којом је такође истакнуто да су затрпани делови камена у стабилном стању услед константне zasiћености водом и да осим мањих промена у зонама близу површине, нема значајнијих варијација у садржају природне влаге у самом камену (Barry, 2020). Такође је истакнуто да је у плићим зонама, број циклуса смрзавања дупло мањи него у површинским условима, док је у дубљим зонама смањен за 75 %. Идеју да је за потпуну конзервацију камена довољно да земља покрива најмање 0,5 m (Barry, 2020) поткрепљују резултати истраживања спроведених у овој докторској дисертацији. На то указује очувана профилација камених елемената спољне ограде пронађена на дубинама испод 50 cm.

Осим природне „конзервације“ земљом, "очуваности" керсантита који је егзистирао у стабилним условима допринели су и други материјали. Честе реконструкције Париске улице резултирале су прекривањем камених базишта крупнозрним агрегатом и слојем асфалта. Ова водоотпорна баријера утицала је на стварање стабилних услова за камена базишта, без дотока површинске воде и са малим варијацијама температуре и влаге. У таквим стабилним условима керсантит је остао потпуно очуван.

## 20. ЗАКЉУЧАК

Проучавање петролошких, хемијских и физичко-механичких карактеристика, лампрофира - керсантита из каменолома Тешића мајдана, и истог уграђеног керсантита у Мало степениште, након деценијске изложености различитим екстринзичним факторима, омогућило је дефинисање алтерабилности ове врсте архитектонског камена са аспекта начина површинске обраде и уградње. Идентификација форми распадања керсантита у каменолому и одабраним објектима омогућила је утврђивање врсте физичко - хемијских процеса, њихових интринзичних и екстринзичних узрока и последица по данашње стање керсантита, камена који је обележио престоничку архитектуру на прелазу 19. у 20 век.

Зелена боја и структура керсантита су главна декоративна својства која су представљала примат при избору архитектонског камена, односно разлог његове масовне употребе у изградњи Београда прве половине 20. века. Те главне естетске карактеристике резултат су петролошких карактеристика ове магматске стене масивне текстуре и неравномерно зрнасте структуре уз присуство маркантне макроофитске структуре, уједно и доминантно коришћеног структурног варијетета за изградњу споменика културе. Керсантит је стена изграђена од плагиокласа (албита), биотита и моноклиничног пироксена (аугита) као главних минерала, али истовремено и хидротермално алтерисаних што је за последицу имало и значајно присуство секундарног хлорита, калцита, епидота, леукоксена и минерала глина. Према физичким својствима керсантит Тешића мајдана припада категорији тешког камена, умерено порозног, са малим атмосферским до умереним капиларним упијањем воде. У руралној, незагађеној средини којом је окружен, керсантит у каменолому локално показује знаке површинског распадања карактеристичне за површине које су у контакту са атмосфером и то: губитак каменог материјала услед дубинског и комадастог распадања, деколорацију, биолошку колонизацију, наслаге соли (гипса и калцита) и одвајање површинских кора, љуски и љуспи.

Извађен из стенске масе, различито површински обрађен и уграђен у објекте Београда, након стогодишње изложености атмосферилијама и различитим антропогеним утицајима, хидротермално алтерисани керсантит се карактерише значајним морфолошким, минералолошким и хемијским променама које деградирају вредност објеката културног наслеђа нарушавајући њихов интегритет. Мапирањем форми и интензитета облика распадања уграђених, атмосфери изложених керсантита Малог степеништа, констатовано је егзистирање индивидуалних, али најчешће удружених форми распадања насталих као последица површинског распадања. Најдоминантније форме су дубинско и рељефно распадање, праћено љускастим и љуспастим одвајањем каменог материјала уз последичну зрнасту дезинтеграцију. Уз редовно присутну деколорацију у облику црвеносмеђе танке површинске коре, и локално регистрованих црних кора и наслаге соли (гипса, тенардита, двоструких Na-Ca сулфата и халита), развој биолошке колонизације и пукотина различитих димензија и порекла је регистрован готово на свим испитиваним објектима. Доминантни интензитети оштећења су у категорији слабих (40 %) и умерених (34 %) оштећења. Иако мање заступљено, присуство распадања у категорији јаких и веома јаких оштећења (10 %), узроковало је висок степен деградације или потпуни губитак интегритета уграђених каменних блокова/елемената. Вредности индекса распадања ( $DI_{lin} = 2.42$ ,  $DI_{prog} = 2.58$ ) указују на висок степен угрожености Малог степеништа и прогресију даљег површинског распадања.

Са мањим или већим разликама у доминантности и интензитету, поменути облици распадања су регистровани и на осталим испитиваним објектима. Корелацијом са стањем керсантита у каменолому закључено је да рурална средина иницира процесе површинског распадања, али значајно нижег интензитета у односу на високу учесталост и интензитет форми деградације настале као последица површинског распадања керсантита у урбаној средини.

Додатно, да изложеност атмосферским условима, без обзира на њен степен загађења, индукује процесе површинског распадања, потврђује опсервација стања керсантита у ентеријеру објеката коју карактерише потпуно одсуство форми распадања.



Изложеност керсантита деловању спољних атмосферских фактора агресивне урбане средине условио је описане форме распадања као резултат процеса физичко-хемијског површинског распадања. Физички процеси распадања условили су механичку дезинтеграцију керсантита у каменолому и на свим испитиваним објектима, посебно у деловима објеката где је омогућено дуже задржавање воде, као што су подести објеката, венци и слични профили на фасадама. Као главни узрочник свих физичких процеса површинског распадања идентификована је вода у свим њеним облицима и могућим изворима (атмосферска или капиларно унета из тла). Присуство воде у уграђеном керсантиту је омогућило развој процеса влажења-сушења, мржњења-отапања, а климатски фактори окружења њихово циклично понављање.

Водени раствори, у зависности од рН и Е<sub>h</sub> раствора, као и релативне влажности и температуре околине, иницирали су развој хемијских процеса: растварања, хидролизе, оксидације и хидратације већ хидротермално алтерисаних главних минерала уз последично стварање нових, рецентних продуката распадања. У уграђеном керсантиту зрна фелдспата су интензивно измењена, аргилитисана, замућена и калцитисана, крупне лиске хлоритисаног биотита су изломљене, искрзане, деформисане и трансформисане у вермикулит, примарни пироксен је финално хлоритисан и калцитисан. Маркантно површинско депоновање секундарних оксида/хидроксида гвожђа је нарушило главно декоративно својство, примарну боју уграђеног керсантита. Хемијско растварање минералних фаза керсантита у садејству са атмосферилијама и околним грађевинским материјалима (малтер) допринело је депоновању гипса, тенардита и Na-Ca сулфата који су даље својим кристализационим и хидратационим притисцима допринели механичкој дезинтеграцији керсантита.

Сви наведени физичко-хемијски процеси површинског распадања резултирали су декохезијом минералних зрна, одвајањем у почетку мањих љуспи од субстрата, а касније и љуски великих димензија уз прогресивно нарушавање целовитости каменог елемента. Процеси су деловали интегрално, без могућности јасног издвајања доминантног, али несумњиво са каталитичком међусобном релацијом. Супротно оцени интензивног површинског распадања уграђеног керсантита, са аспекта његових морфолошких и минералошких промена као и регистрованог интензитета различитих форми деградације, индекси хемијског распадања су рефлектовали низак интензитет површинског распадања. То је потврдило њихову ограничену применљивост на хидротермално алтерисане стене, а посебно на примену у компарацији каменолом-објекат и оквирима геолошког и архитектонског поимања времена.

Описани процеси површинског распадања керсантита, поред морфолошких, минералошких и хемијских промена, условили су и промену његових физичких својстава па тиме и квалитета као архитектонског камена. За разлику од категоризације керсантита Тешића мајдана, уграђени керсантит је категорисан као средње тежак, веома порозан камен са осетним упијањем воде и високе апсорпционе способности капиларног упијања воде. Пад квалитета уграђеног керсантита изражен кроз вредности физичких својстава јесте делимично, али не и искључиво последица развоја физичких и хемијских процеса површинског распадања. Смањење алтерабилности керсантита, делом пораст порозности и способности примања и задржавање воде, пре његове уградње, инициран је екстринзичним, антропогеним фактором, односно начином површинске обраде. Резултати испитивања су доказали да је штоковање, у поређењу са другим врстама обраде, најдеструктивнији површински третман по временску трајност камена. Иако има најбољи ефекат на антиклизавост, овај механички ударни поступак развија мрежу микропукотина/прслина олакшавајући кретање агресивних водених раствора. Повећање порне мреже изазвано штоковањем резултира највећим коефицијентом капиларног упијања воде у односу на површинске обраде као што су резање, четкање и полирање, а добијени резултати су новина у овом пољу ретких истраживања. На основу оцене форми и интензитета распадања различито површински обрађених површина керсантита, закључује се да су у екстеријеру једини прихватљиви видови површинске обраде керсантита полирање, четкање и буњаста обрада. Брзина распадања уграђених каменних елемената у испитиваним објектима са штокованим површинама указује да тако обрађени керсантит није временски

постојан у атмосферским условима. Одсуство форми распадања на објектима са полираним површинама керсантиа сагласно резултатима физичких својстава, указује да полирање смањује површинску порозност камена и повећава његову временску постојаност, па је пожељан тип површинске обраде вертикалних површина у екстеријеру.

Архитектура објекта/споменика и геометријски положај на микролокацији су такође једни од кључних екстринзичних фактора који су допринели стању уграђеног керсантиа. Комплексном геометријском корелацијом резултата мапирања и индекса распадања закључено је да положај објекта, његових делова и индивидуална позиција камених елемената, директно утиче на токове одвођења и задржавања воде, а тиме и интензитет површинског распадања. Регистровано стање затрпаних камених елемената од керсантиа указује да прекривање камена природним материјалом као што је земља или камени агрегат пружа значајну заштиту од површинског распадања, односно обезбеђује његову „природну конзервацију“.

Све напред наведено указује да је површинско, физичко-хемијско распадање уграђеног керсантиа, условљено синергетским деловањем његових интринзичних карактеристика – минералног састава и структуре, али и подједнако важним екстринзичним факторима као што су атмосферски фактори окружења, начин површинског третмана, архитектура и геометрија објекта, позиција елемента од камена у објекту, као и промене у окружењу које се догоде током времена/историје. Оцена временске трајности архитектонског камена је комплексан процес који захтева познавање и разумевање петролошких карактеристика материјала и способност евалуације понашања у различитим околностима којима може бити изложен. Међутим, комплексност оцене алтерабилности још више добија на значају када је аспект посматрања мултидисциплинаран. Док у геологији период од сто година нема скоро никакав значај са аспекта површинског распадања, у архитектури овај период представља најчешћи жељени животни век савремених грађевина. Ова неконзистентност, у оквиру дефиниције одрживе архитектуре, захтева додатну интроспекцију, обзиром да конзервација тежи да сачува материјалне остатке грађене од камена, и да уједно на правилан начин користи необновљиве природне ресурсе. У погледу керсантиа, од кога су изграђени изузетно вредновани споменици културе престонице, веома је важно успоставити рационално коришћење ресурса у каменолому. Потрага за одрживом архитектуром се мора кретати кроз ову амбивалентност прихватајући и дуговечност и прилагодљивост, негујући изграђене вредне споменике културе и њихово окружење које је заиста одрживо за будућност.

Наставак истраживања спроведених у овој докторској дисертацији може да се развија у правцу конзерваторско – рестаураторских поступака и метода које ће допринети очувању непокретног културног наслеђа у чијој изградњи је коришћен керсантит, као и при доношењу планова његове експлоатације и употребе као вредне сировине, пре свега за реконструкције евидентираних споменика културе.

## 21. ЛИТЕРАТУРА

- Alemany, R.M.E. (2007) Alteration of granite stone used in building construction. *Materiales de Construcción*, Vol. 57, 288, 77-89.
- Alessandrini, G., Peruzzi, R., Manganelli Del Fa, C., Vannucci, S., Tampone, G., Cecchi, R. (1979) Investigation on the degradation of Stones: The working effects on the Candoglia marble. *Proceedings of 3rd Internationale Congress on the Deterioration and Preservation of Stones*, Venice, 1979, 411-428.
- Alimi, F., Elfil, H., Gadri, A. (2003) Kinetics of the precipitation of calcium sulfate dihydrate in a desalination unit, *Desalination*, 157, 9-16.
- Amoroso GG., Fasina V. (1983) Stone decay and conservation; Atmospheric pollution, cleaning; and consolidation. *Environmental Science*, United States.
- Amoroso GG., Fasina V. (1994) *Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection*, Elsevier, New York (1983). xix + 453pp. Review: C.A. Price, *Studies in Conservation* 29 No.3 158-159.
- André, M. F. and Phalip, B. (2010) Rates of stone recession on Mediaeval monuments: some thoughts and methodological perspectives. *Cadernos Lab. Xeolóxico de LaxeCoruña*. 2010. Vol. 35, pp. 13 – 40.
- Anđelković M. (1954) Nalazak fosilnih neritskih i Batijalnih sedimenata donje krede južno od sela Rušanj (okolina Beograda), *Zbornik radova Geološkog instituta „Jovan Žujović“ knjiga VII*, Beograd.
- Anđelković M. (1964) Rasprostranjenje Šumadijske zone prema severu i jugu i njena geotektonska pripadnost. *Zapisi SGD za 1963. godinu*, Beograd.
- Anđelković, M. (1967) Šumadijska zona stratigrafija, paleogeografija, magmatizam i tektonika, *Geološki anali balkanskog poluostrva*, knjiga XXXIII, Beograd.
- Anđelković M. (1973) *Geologija mezozoika, okoline Beograda. Geološki anali Balkanskog poluostrva XXXVII*, sveska 1. 1-137str, Beograd.
- Anđelković, M., Milojević, N. (1964) Stratigrafija mezozojskog vulkanizma i faze njihovog izlivanja u okolini Beograda i Šumadijskoj zoni, *Simpozijum Srpskog Geološkog društva, Zapisi SGD za 1964*, Beograd.
- Aničić, S., Miroslavljević, S. (1992) Izveštaj o osnovnim geološkim istraživanjima Ripanjskog spilita (kersantita). – *Geozavod-nemetali*, Beograd.
- Antula, D. (1910) Detaljna geološka karta okoline Avale, *zapisnici SGD za 1949*, Beograd.
- Arnold A., Zehnder K. (1989) Salt weathering on monuments. In Zezza F (ed.) *Proc. 1st Int. Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Bari, 31-58.
- Baptista – Neto J.A., Smith B.J., McAllister J.J., Silva M.A.M., Castaheria F.S. (2006) Surface modification of a granite building stone in central Rio de Janeiro, *Ann. Braz. Acad. Sci.* 78,317-330. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000200011>.
- Barry (2020) Heritage: The benefits of burying stone, <https://www.stonespecialist.com/news/stone-heritage/heritage-benefits-burying-stone>, Accessed 21 May 2022.
- Basset W.A. (1961) The geology of vermiculite occurrences. *Clays and Clay Minerals* 10, 61–69.
- Basu S., Orr S.A., Aktas Y.D. (2020) A Geological Perspective on Climate Change and Building Stone Deterioration in London: Implications for Urban Stone-Built Heritage Research and Management. *Atmosphere*, 11, 788; doi:10.3390/atmos11080788.
- Benavente D., Cultrone G., Gomez-Heras M. (2008) The combined influence of mineralogical, hydric and thermal properties on the durability of porous building stones. *Eur J Mineral* 20:673–685.



- Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García Del Cura, M.A., Canaveras, J.C. (2007) The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environmental Geology* 52, p. 215-224.
- Benavente, D., Martínez-Verdú, F., Bernabéu, A., Viqueira, V., Fort, R., García-del-Cura, M. A., Illueca, C., Ordóñez, S. (2003) "Influence of Surface Roughness on Color Changes in Building Stones". *Colour Research and Application*. 28/ 5: pp 343-351.
- Berner R.A. (1978) Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions, *Amer. J. Sci.*, 278 (1978), pp. 1235-1252.
- Berner Robert A., Holdren George R. (1979) Mechanism of feldspar weathering—II. Observations of feldspars from soils, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 43, Issue 8, Pages 1173-1186, ISSN 0016-7037, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90110-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90110-8).
- Bilbija N., Matović V. (2009) *Primenjena petrografija - svojstva i primene kamena*, Gradjevinska knjiga d.o.o., ISBN 978-86-395-0591-2, 417 strana.
- Bisdorn, E.B.A., Stoops G., Delvigne J., Curmi P., Altemüller H.J. (1982) Micromorphology of weathering biotite and its secondary products. *Pedologie*. 32.
- Blight, G.E., Leong, E.C. (2012) *Mechanics of residual soils*. CRC Press, London.
- Boettcher, A. (1966) Vermiculite, hydrobiotite, and biotite in the Rainy Creek igneous complex near Libby, Montana. *Clay Miner.* 6 (04), 283–296. <https://doi.org/10.1180/claymin.1966.006.4.03>.
- Booth, J., Hong, Q., Compton, R.G., Prout, K., Payne, R.M. (1997) Gypsum overgrowths passivate calcite to acid attack, *J. Colloid Interf. Sci.*, 192, 207-214.
- Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S., Gull'a, G. (2014) Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). *Catena* 113, 325–340. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.014>.
- Bouchelaghem, F. (2010) A numerical and analytical study on calcite dissolution and gypsum precipitation, *Applied Mathematical Modelling*, 34(2), 467-480.
- Boue, A. (1840) *Esquisse géologique de la Turquie D'Europe*. Imprimerie de Bourgogne et Martinet, Paris, 128 pp.
- Bragin N., Bragina Lj., Gerzina N., Djerić N., Toljić M. (2017) New radiolarian data from the Late Jurassic mélange of Avala Mountain Serbia (abstract). 17th Alpshop, Zlatibor, Srbija.
- Brimblecombe, P. (2010a) Heritage climatology. In: Lefevre RA, Sabbioni C (eds) *Climate change and cultural heritage*. Edipuglia, Bari—Italy.
- Brimblecombe, P. (2010b) Mapping heritage climatologies In: Bunnik T, de Clercq H, van Hees R, Schellen H, Schueremans L (eds) *Effect of climate change on built heritage*. WTAPublications, Pfaffenhofen, 34, pp 18–30.
- Brimblecombe, P. (2014) Environment and Architectural Stone. In: Siegesmund, S., Sneathlage, R. (Eds.), *Stone in Architecture. Properties, Durability*. Fifth edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 317-348.
- Brimhall, G.H., Dietrich, W.F. (1987) Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrothermal systems: results on weathering pedogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 51, 567–587. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90070-6).
- Brindley, G.W., Brown, G. (1980) X-Ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification. In: Brindley, G.W. and Brown, G., Eds., *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*, Mineralogical Society, 305-356. <https://doi.org/10.1180/mono-5>.
- Brite-Euram 3908 Report. (1999) Granite and quartzite stone slabs processing by oxy-methane flaming. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/BRPR970441/fr>.

- Bromblet, P., Bernabe, E., Verges-Belmin, V. (1996) Petrophysical investigation on the origin of scaling of a microgranular magmatic rock associated to granite in the monuments from Brittany (France)- Environmental Protection and Conservation of the European Cultural Heritage— Degradation and Conservation of Granitic Rocks, European Commission, pp 73–78.
- Buj, O., Gisbert, J., McKinley, J.M. and Smith, B. (2011) Spatial characterization of salt accumulation in early-stage limestone weathering using probe permeametry. *Earth Surf. Process. Landforms*, 36: 383-394. <https://doi.org/10.1002/esp.2050>.
- Билбија, Н. (1981) Савремене методе површинске обраде гранитних стена - термичке методе Пословна заједница „Камергран“, Београд.
- Васковић, Н., Костић, Б. (2022) Основи петрологије. Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, п. 428.
- Војновић, Т. (2015) Модели технологије облагања фасада композитним панелима са лицем од камена, Докторска дисертација, Архитектонски факултет, Универзитет у Београду.
- Vandel, V., Marić, B. (1956) Dijabaz-Rožnačka formacija na Goliji, Radočelu, Čemernu i Troglavu. *Vesnik Zavoda za geol. i geof. istraž. NRS*, knj. XII, Bgd.
- Vasković, N. (1990) Petrološke karakteristike tercijarnih magmatskih i kontaktno-metamorfnih stena Avale. Magistarski rad – manuskript RGF, Beograd.
- Vasković, N., Jović, V. (1993) Geohemija tercijarnih vulkanskih stena Avale. *Geološki anali Balkanskog poluostrva* knjiga 57, 343-358 str, Beograd.
- Vasković, N., Matović, N. (1996) Tercijarne vulkanske stene Avale. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga LX, Beograd.
- Vázquez, P., Alonso, F., Esbert, R., Ordaz, J. (2010) Ornamental granites: relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network. *Constr Build Mater* 24:2536–2541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.002>.
- Vázquez, P., Carrizo, L., Thomachot-Schneider, C., Gibeaux, S., Alonso, F.J. (2016) Influence of surface finish and composition on the deterioration of building stones exposed to acid atmospheres. *Construction and Building Materials*. 106. 392-403. [10.1016/j.conbuildmat.2015.12.125](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.125).
- Vázquez, P., Esbert, R.M., Alonso, F.J., Ordaz, J. (2008) Evaluation of damage induced by salt crystallization in granitic building stones.
- Vázquez, P., Sánchez-Delgado, N., Carrizo, L. et al. (2018) Statistical approach of the influence of petrography in mechanical properties and durability of granitic stones. *Environ Earth Sci* 77, 287 <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7475-6>.
- VDI 3798 Blatt 1, (2020) Material cultural heritage - Documentation, examination, and preservation including consideration of environmental impacts, Engl. VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss.
- Veblen, D.R. Buseck, P.R. (1981) Hydrous pyriboles and sheet silicates in pyroxenes and uralites: Intergrowths, microstructures and reaction mechanisms. *Am. Mineral.*, 66: 1107-1134.
- Veblen, D.R., Buseck, P.R. (1980) Microstructures and reaction mechanism in biopyriboles. *Am. Mineral.*, 65:599-623.
- Vergès-Belmin, V. (Ed.) (2008) Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns = Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre. English-French ed. Monuments & Sites 15. Paris: ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) and ISCS (International Scientific Committee for Stone), Ateliers 30 Impression, Champigny/Marne, ISBN: 978-2-918086-00-0.
- Vidaković, D. (2013) Višekriterijumska analiza kvaliteta vazduha u urbanim sredinama u zavisnosti od vremenskih faktora, doktorska disertacija, Beograd.

- Viles, H. A. (2002) Implications of future climate change for stone deterioration. Geological Society, London, Special Publications, 205(1), 407-418.
- Viles, H. A. (2013) Durability and conservation of stone: coping with complexity. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(4), 367–375. doi:10.1144/qjegh2012-053.
- Viles, H.A., Cutler, N.A. (2012) Global environmental change and the biology of heritage structures. Glob Change Biol, 18: 2406-2418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02713.x>.
- Vlcko, J., Jezny, M., Pagacova, Z. (2005) Influence of thermal expansion on slope displacements. Landslides–risk analysis and sustainable disaster management. Springer Verlag, Berlin, pp 71–74.
- Vogel, D.E. (1975) Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Ville Bond township, Southcentral Quebec. Canadian Journal of Earth Sciences, 12, 2080–2085.
- Vogt, T. (1927) Sulitjelmafeltets geologi og petrografi. Norges Geolgiske Undersokelse, 121, 1–560. (in Norwegian with English abstract).
- Gaillardet, J., Dupre, B., Allegre, C.J. (1999) Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? Geochim. Cosmochim. Acta 63 (23), 4037–4051.
- Galán E., Ferrell R.E. (2013) Genesis of Clay Minerals. Developments in Clay Science, Volume 5, Pages 83-126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00003-1>.
- García-del-Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., Martínez-Martínez, J. (2008) The effect of surface finishes on outdoor granite and limestone pavers. Mater Constr 58(289–290):65–79.
- García-Talegón, J., Vicente, M., Ballesteros, E. (1999) Decay of granite monuments due to salt crystallization in a non-polluted urban environment. Materiales de Construcción. 49. 17.
- Garty, J. (1991) Influence of epilithic microorganisms on the surface temperature of building walls. Canadian Journal of Botany 68, 1349 - 1353.
- Gaylarde, C.C., Morton, L.H.G. (1999) Deteriogenic biofilms on buildings and their control: a review. Biofouling 14 (1), 59–74.
- Gburčik, V., Tošović, S. et al. (2002) Ekološki atlas Beograda (Environmental Atlas of Belgrade), Gradski zavod za zaštitu zdravlja i Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju Beograda, Beograd.
- Gočanin, M. (1935) Prethodna beleška o jurskim slojevima Šumadije. Glasnik Jugoslovenskog profesorskog društva, knj. XVI. sv. 1, Beograd.
- Goldich, S. (1938) A Study in Rock Weathering: Journal of Geology, v. 46, p. 17-58.
- Gorčanin M. (1938) O fosilonosnim slojevima kimeridža, titona, valendinskog i otrivskog kata u okolini Beograda, Vesnik geološkog instituta kraljevine Jugoslavije, knjiga VI, Beograd.
- Goswami, S. C. (1984) Quarrying of aggregates in and around gauhati: Impact on the environment. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 29(1), 265–268. <https://doi.org/10.1007/BF02594416>.
- Graue, B., Siegesmund, S., Oyhantcabal, P., Naumann R., Licha, T., Simon, K. (2013) The effect of air pollution on stone decay: The decay of the Drachenfels trachyte in industrial, urban, and rural environments-a case study of the Cologne, Altenberg and Xanten cathedrals. Environmental Earth Sciences. 69.10.1007/s12665-012-2161-6.
- Griffin, P.S., Indictor, N., Koestler, R. (1991) The Biodeterioration of Stone: a Review of Deterioration Mechanisms, Conservation Case Histories, and Treatment. International Biodeterioration. 28. 187-207. 10.1016/0265-3036(91)90042-P.
- Gudović, J. (1875) Izveštaj o starim rudnicima ispod avale i njene okoline [report on the old mines below Avala Mt. and its surroundings-in Serbian]. Ministry of Mining, the principality of Serbia, Beograd, 1-8.



- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., Senfaute, G., Piquet, J.P. (2005) Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case of the Rochers de Valabres slope (France). *Int J Rock Mech Min Sci* 42(3):331–349.
- Gupta, A.S., Rao, K.S. (2001) Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bull. Eng. Geol. Env.* 60, 201–221. <https://doi.org/10.1007/s100640100113>.
- Градски завод за заштиту здравља, (2002) Gradski zavod za zaštitu zdravlja (2002). Valorizacija područja generalnog plana Beograda – Ekološki atlas Beograda, Gradski zavod za zaštitu zdravlja; Direkcija za građevinsko zemljište i izgradnju Beograda, Beograd.
- Daly, C., Cox, P., Cuffe-Fitzgerald, A., Dubs, B., Pickerill, T. (2010) Monitoring Impacts of Climate Change on Built Heritage. Report for the Department of Environment Heritage and Local Government by ICOMOS Ireland [accessed October 2023]. Available at: [https://www.carrig.ie/uploads/9/3/2/9/93297164/icomos\\_monitoring\\_climate\\_change\\_impact\\_built\\_heritage\\_1.pdf](https://www.carrig.ie/uploads/9/3/2/9/93297164/icomos_monitoring_climate_change_impact_built_heritage_1.pdf).
- De Jayawardena, U.S., Izawa, E. (1994) A new Chemical Index of Weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. *Eng. Geol.* 36, 303–310.
- De la Torre, M.A., Gomez-Alarcon, G., Melgarejo, P., Saiz-Jimenez, C. (1991) Fungi in weathered sandstone from salamanca cathedral (Spain). *Science of the Total Environment* 107, 159–168.
- De la Torre, M.A., Gomez-Alarcon, G., Vizcaino, C., Garcia, T. (1993) Biochemical mechanisms of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. *Biogeochemistry* 19, 129–147.
- Dimitrijević, B. (1928) Hemijski karakter kersantita iz doline reke Palenke kod Ripnja. – Geološki anali Balkanskog poluostrva Knjiga 9. Deo 2. Beograd.
- Dimitrijević, B. (1931) Avala Petrografsko-Mineraloška studija sa geološkom kartom u razmeri 1:500 000. – Posebno izdanje Srpske kraljevske akademije, prirodnački i matematički spisi Knjiga 23. Beograd.
- Dinis, P., Garzanti, E., Vermeesch, P., Huvi, J. (2017) Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola). *Chem. Geol.* 467, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.07.030>.
- Doehne, E. (2002) Salt weathering: a selective review. *Geol Soc Lond* 205:51–64. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2002.205.01.05>.
- Doehne, E. and Price, C. (2010) Stone Conservation: An Overview of Current Research. Getty Conservation Institute, Los Angeles. [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/stoneconservation.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/stoneconservation.pdf).
- Dornieden, T., Gorbushina, A., Krumbein, W. (2000) Biodecay of cultural heritage as a space/time-related ecological situation - An evaluation of a series of studies. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 46. 261-270. 10.1016/S0964-8305(00)00107-4.
- Dos Santos, E.C., de Mendonca Silva, J.C., Duarte, H.A. (2016) Pyrite Oxidation Mechanism by Oxygen in Aqueous Medium, *J. Phys. Chem. C* 2016, 120, 2760–2768.
- Dubinska, E., Wiewiora, A. (1988) Layer-silicates in the contact zone between granite and serpentinite, Jordanow, lower Silesia, Poland. *Clay Minerals* 23, 459–470.
- Duffy, A.P., Cooper, T.P., Perry, S.H. (1993) Repointing mortars for conservation of a historic stone building in Trinity College, Dublin. Technical Note. *Mater Struct* 26:302–306.
- Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., Malpas, J. (2002) Re-assessment of chemical weathering indices: case study of pyroclastic rocks of Hong Kong. *Eng. Geol.* 63, 99–119.
- Đoković I., Marović M. (1990) Rupturni sklop šireg područja Avale i Ljute stene (sverna Šumadija). XII kongres geologa Jugoslavije, knjiga V, Tektonika, seizmologija i geofizika, Ohrid.

- Đoković I., Marović M., Pešić L., Trivić B., Toljić M. (1997) Dijapirizam kiselih plutona u vardarskoj zoni. *Geološki anali Balkanskog poluostrva* knjiga 61, sveska 1, 17-26. Beograd.
- Erić, S. (2019) *Applied mineralogy*. Eds. Gligoric Z., University of Belgrade, Faculty of Mining and geology, Belgrade, p. 180.
- Žegarac, B., Stanković, S., Jovanović Popović, M., i Dimitić, S. (1995) *Savremane fasade obložene kamenom*. Beograd: Arhitektonski fakultet univerziteta u Beogradu.
- Žujović, J.M. (1886) *Geologische uebersicht des Königreiches Serbien*. Wien.
- Žujović, J.M. (1888) *Lamprofiri u Srbiji*. – Glas III, S.K. akademije nauka, Beograd.
- Žujović, J.M. (1900) *Geologija Srbije, deo II, Eruptivne Stene*. Posebna dela Srpske kraljevske akademije, Beograd.
- Žujović, J.M. (1889) *Osnovi za geologiju Kraljevine Srbije, sa skicom geološke karte*. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga prva, Beograd.
- Zhao, J., Broms, B. B., Zhou, Y., Choa, V. (1994) A study of the weathering of the bukit timah granite part a: Review, field observations and geophysical survey. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 49(1), 97-106. <https://doi.org/10.1007/BF02595006>.
- Ilić, M. (1962) Položaj kvarclatita u ravoju našeg terciarnog vulkanizma. - Referati V Savetovanja geologa Jugoslavije. Deo II. Beograd.
- Ilić, M., Knežević V. (1968) Spiliti Tešića Majdana u selu Ripnju pod Avalom. *Zbornik radova Rudasko-geološkog fakulteta*, sv. 11-12. Beograd.
- Irfan, T.Y. (1999) Characterisation of weathered volcanic rocks in Hong Kong. *Q. J. Eng. Geol.* 32, 317–328.
- Ismail, A. I. M., Sadek Ghabrial D., Abd El Ghaffar, N. I. (2014) Effect of weathering on the engineering and petrological characteristics of metavolcanic rocks outcropping at Qusier area, Central Eastern Desert of Egypt and their utilization in construction purposes. *Life Sci J* 11(10):799-813]. (ISSN:1097-8135). <http://www.lifesciencesite.com>. 128.
- Ivković, A., Vuković, A., Nikolić, J., Kovačević, D., Palavestrić, Lj., Petrović, Lj., Jovanović, O., Trifunović, I., Sebinović, Lj. (1966) *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, List pančevo L34-114* [Basic Geological Map of SFRY 1:100000, sheet Pančevo – in Serbian]. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Jenny, H. (1941) *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Courier Corporation. 52 (5), 415.
- Joksimović, V., Kostić, N., Logar, V., Ričkovski, S. (1994) *Kora respadanja spilita Tešića Majdana (Avala)*. – *Geol. Anal. B. Pol. Knj.* 58. Deo 2. Beograd.
- Jović, V. (2000) *Površinsko raspadanje vulkanskih stena u Srbiji*. Savremena administracija, 302 str.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1984) *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Boca Raton, 315.
- Karamata S., Knežević V., Cvetković V., Srećković D. (1997) Upper Cretaceous andesitic volcanism in the surrounding of Belgrade. *Rom. J. Deposits*, 78, p. 73-78, Bucharest.
- Karamata S., Knežević V., Cvetković V., Srećković D., and Marcenko T. (1999) Upper Cretaceous trachydacites south of Belgrade -a contribution for the knowledge of the andesitic volcanism in the northern part of the Vardar zone composite terrane. *Acta Mineralogica Petrographica*, XL, Szeged.
- Karkanias, P. (2010) Preservation of anthropogenic materials under different geochemical processes: A mineralogical approach, *Quaternary International*, Volume 214, Issues 1–2, 2010, Pages 63-69, ISSN 1040-6182, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.10.017>.

- Karpuz, C., Paşamehmetoğlu, A.G. (1992) Rock Mechanics Characteristics of Ankara andesites in relation to their degree of weathering. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, 1992. 1.
- Keller, W.D. (1962) Principles of Chemical Weathering. Lucas, Columbia, Mo., 111 pp Correns, (1949). Correns, C. W. (1949). Growth and dissolution of crystals under linear pressure. Discussions of the Faraday Society, 5, 267. doi:10.1039/df9490500267.
- Kibblewhite, M., Tóth, G., Hermann, T. (2015) Predicting the preservation of cultural artefacts and buried materials in soil, Science of The Total Environment, Volume 529, Pages 249-263, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.036>.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and Rubel F. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Krumbein, W.E. (1988) Microbial interactions with mineral materials. In: Houghton, D.R., Smith, R.N., Eggins, H.O.W. (Eds.), Biodeterioration, Vol. 7. Elsevier Applied Science, London, New York, pp. 78-100.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. (1986) A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. Journal of Petrology, 27, 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.
- Le Maitre, R., Bateman, P., Dudek, A., et al. (1989) A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms, Oxford: Subcom Mission on the Systematics of Igneous Rocks. International Union of Geological Sciences, Paris.
- Le Maitre, R.W. (2002) Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks / Le Maitre RW (editor) et al. (R. W. (Roger W. Le Maitre, Ed.; Second edition.), Cambridge University Press, pp. 97.
- Леко, Д. (1909) Наше прилике: поводом VIII конгреса архитеката, Београд, Штампарија Р. Раденковића, 76.
- López-Arce, P., Varas-Muriel, M., Fernández-Revuelta, B., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Perez-Soba, C. (2010) Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification. Fuel and Energy Abstracts. 83. 170-185. 10.1016/j.catena.2010.08.009.
- Loughnan, F.C. (1969) Chemical Weathering of the Silicate Minerals. Elsevier Publ. Co. Inc., New York, 151p.
- Marković, B., i dr. (1985) Tumač za Beograd (OGK SFRJ 1:100000). Savez Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Marković, O., Obradović, S. (1957) Stratugrafski prikaz uzanog krednog pojasa između železničkih stanica Kneževac-Kijevo – okolina Beograda – na osnovu mikro I megafaunističkih podataka. Zbornik radova Geološkog instituta „Jovan Žujović“, knjiga IX, Beograd.
- Matias, J.M.S., Alves, C.A.S. (2002) The influence of petrographic, architectural and environmental factors in decay patterns and durability of granite stones in Braga monuments (NW Portugal). Geological Society, London, Special Publications, 205(1), 273–281. doi:10.1144/gsl.sp.2002.205.01.20.
- Matović, V., Erić, S., Srećković-Batočanin, D., Colomban, P., Kremenović, A. (2014) The influence of building materials on salt formation in rural environments. Environ Earth Sci (2014) 72:1939–1951 <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3101-4>.
- Matović, V., Vasković, N., Erić, S., Srećković-Batočanin, D. (2010) Interaction between binding materials—the cause of damage to gabbro stone on the monument to the unknown soldier (Serbia). Environmental earth sciences. 60. 1153-1164. 10.1007/s12665-009-0257-4.



- May, E., Lewis, F.J., Pereira, S., Tayler, S., Seaward, M.R.D., Allsopp, D. (1993) Microbial deterioration of building stone | a review. *Biodeterioration Abstracts* 7 (2), 109-123.
- Милутиновић, Д. (1894) Наука о грађи, Први део - природно и вештачко камење, Државна штампарија Краљевине Србије.
- McCabe, S., Smith, B., Jamison, C., Mullan, D., Mcallister, D. (2011) The 'Greening' of Natural Stone Buildings: Quartz Sandstone Performance as a Secondary Indicator of Climate Change in the British Isles? *Atmospheric and Climate Sciences*. 1. 165-171. 10.4236/acs.2011.14018.
- McCabe, S., Smith, B.J. and Warke, P.A. (2007) An holistic approach to the assessment of stone decay: Bonamorgy Friary, Northern Ireland. *Geological Society of London Special Publication* 271, 77–86.
- Misirlisoy, D., Günçe, K. (2016) Adaptive reuse strategies for heritage buildings: A holistic approach. *Sustain. Cities Soc.*, 26, 91–98.
- Momeni, A., Khanlari, G., Heidari, M., Bagheri, R., Bazvand, E. (2015) Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environ Earth Sci*. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4536-y>.
- Moon, H., Song, Y., Lee, S.Y. (1994) Supergene vermiculitization of phlogopite and biotite in ultramafic and mafic rocks, Central Korea. *Clays and Clay Minerals* 42(3), 259–268.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C. (1997) X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals. 2nd Edition, Oxford University Press, New York. ISBN: 9780195087130.
- Morales Demarco, M., Oyhantçabal, P., Stein, K.J. et al. (2011) Black dimensional stones: geology, technical properties and deposit characterization of the dolerites from Uruguay. *Environ Earth Sci* 63, 1879–1909 <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0827-5>.
- Mosch, S. (2009) Optimierung der exploration, Gewinnung und Materialcharakterisierung von Naturwerksteinen. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2009/mosch/mosch.pdf>.
- Mosch, S., Siegesmund, S. (2007) Statistische Bewertung gesteintechnischer Kenndaten von Natursteinen. *Z Dtsch Ges Geowiss* 158(4):821–868.
- Murakami, T., Utsunomiya, S., Yokoyama, T., Kasama, T. (2003) Biotite dissolution processes and mechanisms in the laboratory and in nature: Early-stage weathering environment and vermiculitization. *American Mineralogist*; 88 (2-3): 377–386. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2003-2-314>.
- Nagarajan, R., Armstrong-Altrin, J.S., Kessler, F.L., Hidalgo-Moral, E.L., Dodge-Wan, D., Taib, N. I. (2015) Provenance and tectonic setting of Miocene siliciclastic sediments, Sibuti formation, northwestern Borneo. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), 8549–8565.
- Nakajima, Y., Ribbe, P.H. (1980) Alteration of pyroxenes from Hokkaido, Japan, to amphibole, clays, and other biopyriboles. *N Jahrb Mineral Monatsh* 6:258–268.
- Neall, V.E. (1977) Genesis and weathering of andosols in Taranaki, New Zealand. *Soil Sci*. 123, 400–408.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 1523–1534.
- Nesbitt, H., Young, G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299 (5885), 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M. (1989) Formation and Diagenesis of Weathering Profiles. *The Journal of Geology*, 97, 129-147. <http://dx.doi.org/10.1086/629290>.
- Neuzil, C. E., Bredehoeft J. D., Wolff R. G. (1984) Leakage and fracture permeability in the Cretaceous shales confining the Dakota aquifer in South Dakota, in *Proceedings of the First C. V. Theis Conference on Geohydrology*, Oct. 5-6, 1982, Lincoln, Neb., edited by D. G. Jorgenson

- and D.C. Signor, pp. 113-120, National Water Well Association, Worthington, Ohio. (3) (PDF) Groundwater Flow in Low-Permeability Environments.
- Ng, C.W.W., Guan, P., Shang, Y.J. (2001) Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 34 (2), 133–151.
- Nixon R.A. (1979) Differences in incongruent weathering of plagioclase and microcline—Cation leaching versus precipitates. *Geology*; 7 (4): 221–224. doi: <https://doi.org/10.1130>.
- Несторовић, Н. (1927) Грађевинске конструкције-ручна књига за техничаре и грађевинаре, Државна штампарија Краљевине Срба, Хрвата и Словенаца, Београд.
- Нешковић, М. (2021) Београдска тврђава – од војног утврђења до споменика културе, ЗЗСКГБ.
- Новаковић, Н., Матовић, В. (2019) Управљање природним ресурсима на примеру Тешћа мајдана, Зборник радова са конференције „Културно наслеђе-ризици и перспективе“, Завод за заштиту споменика културе града Београда у сарадњи са Институтом за архитектуру и урбанизам Србије, ISBN 978-86-89779-65-3, Београд, стр.81-90.
- Normal 1/88 (1990) [https://www.inforestauro.org/wptest/wpcontent/uploads/2012/02/biblio\\_norma\\_06.pdf](https://www.inforestauro.org/wptest/wpcontent/uploads/2012/02/biblio_norma_06.pdf).
- Novaković, N., Dabić, P., Matović, V. (2023) Atmospheric exposure vs burying: influences on damage intensity of built-in kersantite in the monument of the Small Staircase (Belgrade, Serbia). *Environ Earth Sci* 82, 114 <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10794-6>.
- Novaković, N., Franković, M., Matović, V., Šarić, K., Erić, S. (2016) "Decay products of the kersantite building stone in the monument of the Small Staircase at the Kalemegdan Park (Belgrade, Serbia)", *Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone* (1), Glasgow, pp.125- 132.
- Novaković, N., Matović, V., Franković, M. (2015) Stanje kersantita ugrađenog u fasade zgrade Narodnog muzeja u Beogradu, *Zbornik radova sa Devetog naučno-stručnog Međunarodnog savetovanja „Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja”*, Savez građevinskih inženjera Srbije, Zlatibor, 411-418.
- O’Brien, P.F., Bell, E., Santamaria, S.P., Boyland, P., Cooper, T.P. (1995) Role of mortars in the decay of granite. *Sci. Total. Environ.* 167 (1–3), 103–110. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04573-J](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04573-J).
- Obradović J. (1967) Sedimentološko petrološka studija flišnih sedimenata Šumadije. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga XXXIII, Beograd.
- Okewale, I. A. (2020) Applicability of chemical indices to characterize weathering degrees in decomposed volcanic rocks. *CATENA*, 189, 104475. doi: 10.1016/j.catena.2020.104475.
- Okewale, I.A., Coop, M.R. (2018) Suitability of different approaches to analyze and predict the behavior of decomposed volcanic rocks. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 144 (9), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001944](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001944).
- Ondrasina, J., Kirchner D., Siegesmund, S. (2003) Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: A long-term experiment. *Geological Society of London Special Publications*. 205. 10.1144/GSL.SP.2002.205.01.02.
- Orti, F., Gündogan, I., Helvacı, C. (2002) Sodium sulphate deposits of Neogene age: the Kirmir Formation, Beypazari Basin, Turkey. *Sediment Geol* 146:305–333.
- Paine, S.G, Linggood, F.V., Schimmer, F., Thrupp, T.C. (1933) The Relationship of micro-organisms to the decay of stone. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, Vol. CCXXII-B486, B 97-127.
- Pamić, J. (2002) The Sava-Vardar zone of the Dinarides and Hellenides versus the Vardar Ocean. *Eclogae Geologicae Helveticae*. 95. 99-114.

- Parekh, P.P., Khwaja, H.A., Khan, A.R., Naqvi, R.R., Malik, A., Khan, K., Hussain, G. (2002) Lead content of petrol and diesel and its assessment in an urban environment, *Environ Monit Assess*, 74(3):255-62.
- Parker, A. (1970) An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Mag.* 107 (6), 501–504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>.
- Patil, S., Kasthurba., AK. (2020) Weathering of stone monuments: Damage assessment of basalt and laterite. *Materials Today: Proceedings*. 43. 10.1016/j.matpr.2020.10.022.
- Patil, S.M., Kasthurba, A.K., Patil, M.V. (2021) Characterization and assessment of stone deterioration on Heritage Buildings, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 15, e00696, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00696>.
- Pavlović, M., Eremija, M., Stevanović, P (1977) Gružanski basen. *Geologija Srbije II-3, Stratigrafija, Kenozoik*. Zavod za regionalnu geologiju i paleontologiju, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- Pavlović, Z., i dr. (1980) Tumač za list Smederevo (OGK SFRJ 1:100000). Savez Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Павловић, М. (2016) Мало степениште Београдске тврђаве, Гласник ДКС 40, Београд: 174-179.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R. (1976) Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00384745>.
- Perri, F. (2020) Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: An overview. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 556, 109873 <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109873>.
- Perri, F., Ietto, F., Le Pera, E., Apollaro, C. (2016) Weathering processes affecting granitoid profiles of Capo Vaticano (Calabria, southern Italy) based on petrographic, mineralogic and reaction path modelling approaches. *Geol. J.* 51, 368–386. <https://doi.org/10.1002/gj.2635>.
- Perry, S.H., Duffy, A.P. (1997) The short-term effects of mortar joints on salt movement in stone. *Atmos Environ* 31(9):1297–1305.
- Petković, K. (1939) Beleške o nalasku novog mesta sa donjokredskom faunom u Košutnjaku- okolina Beograda, *Geološki anali Balkanskog pluostrva*, knjiga XVI, Beograd.
- Petković, K., Marković, B. (1951) Otrivska I baremska cefalopodska fauna iz glinsko-laporovitih slojeva Straževice kao dokaz prisustva batijalnih tvorevina ovih odeljaka u okolini Beograda, *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga XXXIV, Beograd.
- Petković, V. (1910) Detaljna geološka karta okoline Beograda, *Zapisci SGD za 1949 1952 godine*, Beograd.
- Petković, V. (1912) Tektonska skica okoline Beograda. *Glasnik geografskog društva I*, sveska1, Beograd.
- Petković, V. K. (1925) Istrojiska geologija Beograd Petković M.V., 1970: Kredini i miocenski foraminiferi Beograda i okoline. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga XXXV, Beograd.
- Petković, V. K. (1925) Istrojiska geologija Beograd Petković M.V., 1970: Kredini i miocenski foraminiferi Beograda i okoline. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga XXXV, Beograd
- Pletikosić, L. (2007) *Primjena kamena u graditeljstvu / Završki*, Ivica (mentor); Zagreb, Građevinski fakultet, Zagreb.
- Pochon, J., Jaton, C. (1967) The role of microbiological agencies in the deterioration of stone. *Chemistry and Industry* 9, 1587-1589.
- Pochon, J., Jaton, C. (1968) Biological factors in the alteration of stone. In: Wolters, A.H., Elphick, C.C. (Eds.), *Biodeterioration of Materials*. Elsevier, Amsterdam, pp. 258-268.



- Pope, G. A., Thomas, C. M., Thomas, R. P. (2002) Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone, *Geomorphology*, Volume 47, Issues 2–4, Pages 211–225, ISSN 0169-555X, [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00098-3).
- Prelević, D., Foley, S. F., Romer, R. L., Cvetković, V., Downes, H. (2005) Tertiary ultrapotassic volcanism in Serbia: constraints on petrogenesis and mantle source characteristics. *Journal of Petrology* 46, 1443–1487.
- Prelević, D., Wehrheim, S., Reutter, M., Romer, R., Boev, B., Božović, M., Van den Bogaard, P., Cvetković, V., Schmid, S. (2017) The Late Cretaceous Klepa basalts in Macedonia (FYROM)—Constraints on the final stage of Tethys closure in the Balkans. *Terra Nova*. 29. 10.1111/ter.12264.
- Price, C. A. (1996) *Stone conservation: An overview of current research*. Santa Monica, Calif.: Getty Conservation Institute. Paul Getty Trust. 7-9.
- Price, D. G. (1995) Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28(3), 243–252. doi:10.1144/gsl.qjegh.1995.028.p3.0.
- Price, J.R., Velbel, M.A. (2003) Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chem. Geol.*, 202, 397–416. doi: 10.1016/j.chemgeo.2002.11.001.
- Příkryl, R., Viles, H. A. (2002) Understanding and managing of stone decay: (SWAPNET 2001). *Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network Conference*, Prague, Czech Republic: Charles University: The Karolinum Press.
- Příkryl, R. (2007) Understanding the earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an over-view. In: PRÍKRYL, R. & SMITH, B. J. (eds) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications, 271, 9–21 (2) (PDF) Natural stones for monuments: Their availability for restoration and evaluation.
- Protić, M. (1956) *Mineraloško-geološka studija oolitnih ruda gvožđa SRBIJE*. Geološki anali Balkanskog Pol. knj. XXIV, Beograd.
- Protić, M. (1969) *Prilog petrologiji donjokrednih klastičnih sedimenata okoline Beograda*. Geol. anali B. P. knj. XXXIV, Beograd.
- Radovanović, S. (1902) *PROFIL NA DESNOJ STRANI TOPČIDERSKE REKE*. Zapisnici.
- Rakićević, T. (1960) *Klima Beograda*. Zbornik radova Geografskog instituta, 7, 126–150.
- Rama, N.M., Eklund, O., Frjd, S., Smatt, J., Laiho, T. (2019) Characterization of Altered Mica from Sokli, Northern Finland. *Clay Clay Miner.* 67 (5), 428–438. <https://doi.org/10.1007/s42860-019-00041-0>.
- Recommended Best Practices, (2010) Building Stone Institute. (2010). Recommended best practices. Retrieved from <https://www.naturalstoneinstitute.org>.
- Reiche, P. (1943) Graphic representation of chemical weathering. *Journal of Sedimentary Research*, 13, 58–68. <https://doi.org/10.1306/D4269198-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Reiche, P. (1945) *A Survey of Weathering Processes and Products*, University of New Mexico Publications in Geology, No. 1. University of New Mexico Press, Albuquerque, Geological Magazine, 83(2), 101–102. doi:10.1017/S001675680008290X.
- Ren, M., Wang, W., Huang, Z., Li, S., Wu, Q., Yu, H., Yuan, G., Sargent, P. (2022) Effect of alteration on the geochemistry and mechanical properties of granite from Pingjiang, Hunan Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 81(3), 1–15. [60]. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10197-z>.
- Richthofen, F. B. (1868) *The natural system of volcanic rocks*. *Memoirs of the California Academy of Sciences*. San Francisco. Vol. 1, Pt.2, p.1–94.
- Rigaku (2007) *PDXL 2: Integrated Powder X-ray Diffraction Software (version 2.8.4.0)*. Rigaku Corporation, Tokyo, Japan. <https://www.rigaku.com/support/software/pdxl>.

- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P., Hatzipanagiotou, K. (2015) Assessment of the engineering behavior of ultramafic and mafic rocks using chemical indices, *Engineering Geology*, Volume 196.
- Robinson, D.A., Moses, C.A. (2011) Rock surface and weathering: process and form. *The SAGE Handbook of Geomorphology*. SAGE, London, 291-309.
- Rojo, A., Alonso, F.J., Esbert, R. (2003) "Hydric properties of some Iberian ornamental granites with different superficial finishes: a petrophysical interpretation". *Mater. Construcc.* 53, 269, pp. 61-72.
- Roldan, P.S., Alcântara, I.L., Rocha, J.C., Padilha, C.C.F., Padilha, P.M. (2004) Determination of Copper, Iron, Nickel and Zinc in fuel kerosene by FAAS after adsorption and pre-concentration on 2-aminothiazole-modified silica gel, *Ecletica, Quimica*, Volume 29, número 2.
- Ross, G.J., Rich, C.I. (1973) The Effect of particle thickness on potassium release from phlogopite. *Clays and Clay Minerals* 21, 77–82.
- Ross, G.J., Wang, C., Orkan, A.I., Rees, H.W. (1982) Weathering of chlorite and mica in a New Brunswick podzol developed on till derived from chlorite–mica schist. *Geoderma* 27, 255–267.
- Roter Blagojević, M. (2012) Stvaranje modernog kulturnog identiteta Beograda, *Limes plus* 12, Hesperia edu, str. 50.
- Ruffolo, S.A., La Russa, M.F., Rovella, N., Ricca, M. (2023) The Impact of Air Pollution on Stone Materials. *Environments*, 10, 119. <https://doi.org/10.3390/environments10070119>.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez-Navarro, C. (2007) The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environ Geol* (52), p. 269-281.
- Ruxton, B.P. (1968) Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *J. Geol.* 76, 518–527. <https://doi.org/10.1086/627357>.
- Sanjurjo, J., Alves, C., Vidal-Romani, J.R. (2016) Assessing the weathering of granitic stones on historical urban buildings by geochemical indices. *Earth Sciences Research Journal*. 20. F1-F13. [10.15446/esrj.v20n2.49560](https://doi.org/10.15446/esrj.v20n2.49560).
- Satterthwaite, D. (2008) Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environ Urban* 20(2):539–549. <https://doi.org/10.1177/0956247808096127>.
- Schaffer, R.J. (1932) The weathering of natural building stones. Department of scientific and industrial research building research, special report No. 18, London, pp. 230.
- Scherer, G.W., Jiménez González, I. (2005) Characterization of Swelling in Clay-Bearing Stone in Stone decay and conservation, pp. 51-61, SP-390, ed. A.V. Turkington, Geological Soc. Am.
- Schiavon, N. (2002) Biodeterioration of calcareous and granitic building stones in urban environments. Geological Society, London, Special Publications, 205(1), 195–205. [doi:10.1144/gsl.sp.2002.205.01.15](https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2002.205.01.15).
- Schiavon, N. (2007) Kaolinisation of granite in an urban environment. *Environmental Geology*. 52. 399-407. [10.1007/s00254-006-0473-0](https://doi.org/10.1007/s00254-006-0473-0).
- Schiavon, N., Chiavari, G., Schiavon, G., Fabbri, D. (1995) Nature and decay effects of urban soiling on granitic building stones, *Science of The Total Environment*, Volume 167, Issues 1–3, Pages 87-101, ISSN 0048-9697, [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04572-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04572-1).
- Schmid, S.M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Ustaszewski, K. (2008) The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1), 139-183.
- Schoema, J.J. (1989) Mica and vermiculite in South Africa. *Journal of South African Institute of Mineralogy and Metallurgy* 89, 1–12.

- Schroeder, P.A., Melear, N.D., West, L.T., Hamilton, D.A. (2000) Meta-gabbro weathering in the Georgia Piedmont, USA: implications for global silicate weathering rates. *Chemical Geology* 163, 235–245.
- Scott, A.D. (1968) Effect of particle size on interlayer potassium exchange in micas. In: *Proceedings of Ninth Transaction International Congress Soil Science*, vol. 2, Adelaide, pp. 649–669.
- Shaked, T., Lee Bar-Sinai, K., Sprecher, A. (2021) Adaptive robotic stone carving: Method, tools, and experiments, *Automation in Construction*, Volume 129, 103809, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103809>.
- Siedel, H., Siegesmund, S., Sterflinger, K. (2011) Characterization of Stone Deterioration on Buildings. 10.1007/978-3-642-14475-2\_6.
- Siegesmund, S., Brimblecombe, P. (2013) *Environmental Earth Sciences: Topical Issue: Urban Use of Rocks-The Bernhard-Smith - Volume Guest Editors: Siegfried Siegesmund & Peter Brimblecombe*.
- Siegesmund, S., Ruedrich, J., Weiss, T. (2004) Marble deterioration In: Prikryl R (ed.) *Dimension Stone 2004*. Taylor & Francis Group, London, pp. 211–217.
- Siegesmund, S., Snethlage, R. (2014) *Stone in Architecture-Properties, Durability*, Springer, ISBN 978-3-642-45154-6 ISBN 978-3-642-45155-3 (eBook), DOI 10.1007/978-3-642-45155-3, Springer Heidelberg New York, Dordrecht London.
- Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. (2002) Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 1–7. doi:10.1144/gsl.sp.2002.205.01.01.
- Singh, M., Sharma, M., Tobschall, H. J. (2005) Weathering of the Ganga alluvial plain, northern India: Implications from fluvial geochemistry of the Gomati River. *Applied Geochemistry*, 20(1), 1–21.
- Sleater, G. (1973) *A Review of Natural Stone Preservation*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Smith, B. (2003) Background controls on urban stone decay; lessons from natural rock weathering. In P. Brimblecombe (Ed.), *The effects of air pollution on the Built Environment (Air pollution views vol. 2)* (pp. 31-61). Imperial College Press, London.
- Smith, B. J., Gomez-Heras, M., McCabe, S. (2008) Understanding the decay of stone-built cultural heritage. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 32(4), 439-461. <https://doi.org/10.1177/0309133308098119>.
- Smith, B., Prikryl, R. (2007) Diagnosing decay: The value of medical analogy is understanding the weathering of building stones. 10.1144/GSL.SP.2007.271.01.01.
- Smith, B.J., McCabe, S., McAllister, D. et al. (2011) A commentary on climate change, stone decay dynamics and the ‘greening’ of natural stone buildings: new perspectives on ‘deep wetting’. *Environ Earth Sci* 63, 1691–1700 <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0766-1>.
- Snethlage, R. (2005) *Leitfaden zur Steinkonservierung*. Fraunhofer IRB, Stuttgart.
- Snethlage, R., Wendler, E. (1997) Moisture cycles and sandstone degradation, in *Saving Our Architectural Heritage: The Conservation of Historic Stone Structures*, edited by N. S. Baer and R. Snethlage, pp. 7 – 24, John Wiley, London.
- Sokol, K. (2018) *Ultrakalijski magmatizam Tešića majdana (Ripanj): Petrologija, geochemija i geodinamički značaj*, master rad, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu.
- Sokol, K., Prelević, D., Romer, R., Božović, M., Van den Bogaard, P., Stefanova, E., Kostić, B., Čokulov, N. (2020) Cretaceous ultrapotassic magmatism from the Sava-Vardar Zone of the Balkans. *Lithos*. 105268. 10.1016/j.lithos.2019.105268. (ISSN 0024-4937).



- Sousa, L. (2013) Petrophysical properties and durability of granites employed as building stone: A comprehensive evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73. 10.1007/s10064-013-0553-9.
- Sousa, L., Siegesmund, S., Wedekind, W. (2018) Salt weathering in granitoids: an overview on the controlling factors. *Environmental Earth Sciences*. 77. 10.1007/s12665-018-7669-y.
- Sousa, L.M., Río, L.M.S.D., Calleja, L., Argandoña, V.G.R.D., Rey, A.R. (2005) Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Eng Geol* 77:153–168. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.001>.
- Sousa, L.M.O., Gonçalves, B.M.M. (2012) Differences in the quality of polishing between sound and weathered granites. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1347–1359. doi:10.1007/s12665-012-2035-y.
- Srećković Batočanin, D., Kostić, B. (nepublikovano) Okolorudne promene, Izdavač: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
- Srodon, J. (1999) Nature of mixed-layer clays and mechanisms of their formation and alteration. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 27, 19–53.
- Steiger, M., Asmussen, S. (2008) Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O and the generation of stress, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 72, Issue 17, Pages 4291-4306, ISSN 0016-7037, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.053>.
- Steiger, M., Charola, A.E., Sterflinger, K. (2014) Weathering and Deterioration. In: Siegesmund, S., Snethlage, R. (Eds.), *Stone in architecture, Properties, Durability*, Fifth edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg p. 225–316.
- Steiger, M., Charola, A.E., Sterflinger, Katja. (2011) *Stone in Architecture*. 10.1007/978-3-642-14475-2\_4.
- Stevanović, P. (1988) Geološka osnova Beogradske tvrđave i njene okoline. U: Čubrilović, V. (ur.), *Beogradska tvrđava u prošlosti, sadašnjosti i budućnosti, naučni skupovi knj. XXXVI, Odeljenje istorijskih nauka knj. 9, SANU, Beograd, str. 75-90*
- Stoch, L., Sikora, W. (1976) Transformation of micas in the process of kaolinisation of granites and gneisses, *Clays Clay Miner* 24: 156-162.
- Strzelczyk, A.B. (1981) Microbial biodeterioration: stone. In: Rose, A.H. (Ed.), *Economic Microbiology*, Vol. 6. Academic Press, London, pp. 62-80.
- Svahn, H. (2006) *Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation: Final Report for the Research and Development Project: Literature Study*. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:raa:diva-3633>.
- Szymański, W., Szkaradek, M. (2018) Andesite weathering and soil formation in a moderately humid climate: A case study from the Western Carpathians (southern Poland). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 13. 93-105. 10.26471/cjees/2018/013/010.
- Tematio, P., Tchaptchet, W., Nguetnkam, J., Mbog, M., Yongue, R. (2017) Mineralogical and geochemical characterization of weathering profiles developed on mylonites in the Fodjomekwet-Fotouni section of the Cameroon Shear Zone (CSZ), West Cameroon. *J. Afri. Earth Sci.* 131 (Jul.), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.003>.
- Terzić, M. (1971) *Spiliti Bele Reke i Resnika, kod Beograda. Geološki anali Balkanskog poluostrva, knjiga XXXVI, Beograd.*
- Terzić, M., Karamata, S. (1968) *Kredne andezitske stene Avale. Rudarsko geološki fakultet, Beograd.*
- Theodoridou, M., Török, Á. (2019) In situ investigation of stone heritage sites for conservation purposes: a case study of the Székesfehérvár Ruin Garden in Hungary. *Prog Earth Planet Sci* 6, 15. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0268-z>.

- Thomachot-Schneider, C., Gommeaux, M., Fronteau, G., Oguchi, C.T., Eyssautier, S., Kartheuser, B. (2011) A comparison of the properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium). *Environ Earth Sci* (63), p. 1447- 1461, DOI: 10.1007/s12665-010-0743-8.
- Tiennot, M., Jean-Didier, M., Bourgès, A. (2017) Influence of Anisotropic Microcracking Due to Swelling on the Fracture Toughness of a Clay-Bearing Sandstone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50. 10.1007/s00603-017-1273-4.
- Tiennot, M., Mertz, J.D., Bourgès, A. (2018) Sensitivity of kersantite toughness to moisture: influence of the phyllosilicates. *Environ Earth Sci* 77, 483. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7666-1>.
- Toljić, M. (1995) Geološka građa Avale. Magistarski rad, manuscript RGF, Beograd.
- Toljić, M. (2006) Geološka građa centralne vardarske zone između Avale i Kosmaj, Universitet u Beogradu, Srbija (162 p).
- Toljić, M., Matenco, L., Stojadinovic, U., Willingshofer, E., Ljubović-Obradović, D. (2018) Understanding fossil fore-arc basins: Inferences from the Cretaceous Adria-Europe convergence in the NE Dinarides. *Global and Planetary Change*. 171. 10.1016/j.gloplacha.2018.01.018.
- Torabi-Kaveh, M., Rizi, F.S., Tajbakhsh, G. et al. (2023) The use of chemical and textural indices to predict geotechnical properties of granites with different degrees of weathering. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82, 362. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03387-x>.
- Torraca, G. (2005). *Porous building materials - materials science for architectural conservation*. 2nd ed. Rome, Italy: Iccrom. 1nd ed. 1982.
- Tunçay, T., Dengiz, O. (2016) Chemical weathering rates and geochemical-mineralogical characteristics of soils developed on heterogeneous parent material and toposequence. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 11(2), 583–598.
- Turkington, A.V., Paradise, T.R. (2005) Sandstone Weathering: A Century of Research and Innovation. *Geomorphology*, 67, 229-253. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.028>.
- Ündül, Ö., Tugru, I A. (2012) The influence of weathering on the engineering properties of Dunites, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 45 (pg. 225-239) 10.1007/s00603-011-0174-1.
- Unkašević, M. (1994) *Klima Beograda*, Naučna knjiga, Beograd, pp. 123.
- Urosevic, M., Sebastián, E., Cardell, C. (2013) An experimental study on the influence of surface finishing on the weathering of a building low-porous limestone in coastal environments. *Engineering Geology*. 154. 131–141. 10.1016/j.enggeo.2012.12.013.
- Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S., Schaltegger, U., Krenn, E., Frank, W., Fügenschuh, B. (2010) Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: From continent-continent collision to back-arc extension. *Tectonics*. 29. 10.1029/2010TC002668.
- Ustaszewski, K., Schmid, S.M., Lugović, B, Schuster, R., Schaltegger, U., Bernoulli, D., Schefer, S. (2009) Late Cretaceous intra-oceanic magmatism in the internal Dinarides (northern Bosnia and Herzegovina): Implications for the collision of the Adriatic and European plates. *Lithos*, 108 (1-4), 106-125.
- Fang, Q., Hong, H., Algeo, T., Huang, X., Sun, A., Churchman, G., Chorover, J., Chen, S., Liu, Y. (2019) Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China. *Geoderma*. 344, 82–98. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.008>.
- Fanning, D.S., Keramidas, V.Z., El-Desoky, M.A. (1989) Micas. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in Soil Environment*, second ed. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 551–634.

- Fassina, V., Favaro, M., Crivellari, F., Naccari, A. (2001) The stone decay of monuments in relation to atmospheric environment. *Ann. DiChim*, 91, 767–774.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)0232.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)0232.3.CO;2).
- Fei Y (1995) Thermal Expansion. In: Ahrens TJ (ed) *Mineral Physics and Crystallography – A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union.
- Filipović I., i dr. (1980) Tumač za list Obrenovac (OGK SFRJ 1:100000). Savez Geološki Zavod SFRJ, Beograd.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. (2002) Damage diagnosis on stone monuments - weathering forms, damage categories and damage indices. In: Prikryl, R., Viles, H. (Eds.), *Understanding and managing stone decay, Proceeding of the International Conference „Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET)“*, Prague, p. 11-56.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Kownatzki, R. (1992) Classification and mapping of weathering forms. In: *Proceedings of the seventh international congress on deterioration and conservation of stone*, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, 15–18 October 1992, pp 1109–1116.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Kownatzki, R. (1995) Weathering forms-classification and mapping. In: *Verwitterungsformen - Klassifizierung und Kartierung. - Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung, Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie*, Berlin, p. 41-88.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Kownatzki, R. (1995) Weathering forms-classification and mapping. In: *Verwitterungsformen - Klassifizierung und Kartierung. - Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung, Förderprojekt des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie*, Berlin, p. 41-88.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., Kownatzki, R. (1997) Weathering forms at natural stone monuments – classification, mapping and evaluation. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 3, No. 2, Stuttgart, p. 105-124.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., La Bouchardiere, D. (2002a) Damage index for stone monuments. In: Galan E, Zezza F (eds) *Protection and conservation of the cultural heritage of the mediterranean cities, proceedings of the 5th international symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Sevilla, Spain.
- Fitzner, B., Heinrichs, K., La Bouchardiere, D. (2002b) Limestone weathering on historical monuments in Cairo, Egypt. *Geological society, special publication*, London, pp 217–239.
- Flatt, R.J. (2002) Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *J Cryst Growth* 242:435–454. doi:10.1016/S0022-0248(02)01429-X.
- Flatt, R.J., Scherer, G.W. (2002) Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: a critical review. In: Vandiver PB, Gordway M, Mass JL (Eds) *Proceedings of Materials Research Society*, 712, *Materials Issues in Art and Archeology VI*, Mater Res Soc, Warrendale, PA, pp 29–34.
- Fookes, P.G., Lee, E.M. (2007) Climate variation: a simple geological perspective. *Geology Today*, 23: 66-73. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2007.00603.x>.
- Franković, M. (2022) Fizičko-hemijsko raspadanje krečnjaka ugrađenih u objekte Beogradske tvrđave i mogućnost konsolidacije, Beograd, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Franzen, C., Fischer, T. (2022) Removal of iron crusts from sandstone sculptures in a fountain. *Environmental Earth Sciences*, 81:216, <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10302-2>.



- Frasca, M., Yamamoto, J. (2004) Accelerated Weathering of Granite Building Stone by Sulfur Dioxide Exposure., Conference: 10th International congress on deterioration and conservation of stone At: Stockholm, Sweden).
- Fredrich, J. T., Wong, T. (1986) Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks, *J. Geophys. Res.*, 91(B12), 12743–12764, doi:10.1029/JB091iB12p12743.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R. (2016) Causes of scaling on bush-hammered heritage ashlar: a case study—Plaza Mayor of Madrid (Spain). *Environ Earth Sci* 75:932 DOI 10.1007/s12665-016-5688-0.
- Freire-Lista, D.M., Fort, R., Varas-Muriel, M.J. (2015) Freeze-thaw fracturing in building granites. *Cold Reg Sci Technol* 113:40–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.008>.
- Funatsu, T., Seto, M., Shimada, H., Matsui, K., Kuruppu, M. (2004) Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness of clay bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6):927 – 938.
- Harnois, L. (1988) The CIW index: A new chemical index of weathering: *Sedimentary Geology*, v. 55, p. 319–322.
- Harrassowitz, H. (1926) Laterit, Materiel und Versuch erdgeschichtlicher Auswertung, *Fortschr. Geologie und Palaeontologie*, 4, 253–266.
- Harraz, H.Z., Hamdy, M.M. (2010) Interstratified vermiculite–mica in the gneiss–metapelite–serpentine rocks at Hafafit area, Southern Eastern Desert, Egypt: From metasomatism to weathering. *Journal of African Earth Sciences* 58, pp. 305–320.
- Hartley, A. (1974) A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 7, 69 – 100.
- Hidmet.gov.rs. 2023 Hidmet.gov.rs. 2023: Republički hidrometeorološki zavod RS, Klimatske karakteristike Srbije, [online] dostupno na: [http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija\\_produkci.php](http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_produkci.php) [pristupljeno 01.12.2023.].
- Hillier, S., Marwa, E., Rice, C.M. (2013) On the mechanism of exfoliation of ‘Vermiculite’. *Clay Miner.* 48 (4), 563–582. <https://doi.org/10.1180/claymin.2013.048.4.01>.
- Hoda, S.N., Hood, W.C. (1972) Laboratory alteration of trioctahedral micas. *Clays and Clay Minerals*, 20, 343–358.
- Hofmann, A., Siegesmund, S. (2007) The dimension stone potential of Thailand—overview and granite site investigations. *Geol Soc Lond Spec Publ* 271(1):43–54.
- Hunt, B.J., Grossi, C.M. (2016) Assessing the Impact of Natural Stone Burial upon Performance for Potential Conservation Purposes. 13th Intl. Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Vol. 2, pp 817-824.
- Caneva, G., Salvadori, O. (1989) Biodeterioration of stone. In: Larraini, L., Pieper, R. (Eds.), *The Deterioration and Conservation of Stone*. UNESCO, Paris, pp. 182-234.
- Castillo Akcil, A., Koldas, S. (2006) Acid Mine Drainage (Amd): Causes, Treatment and Case Studies *J. Cleaner Prod.* 14, 1139– 1145.
- Castillo-Miranda, J. O., Torres-Jardón, R., García-Reynoso, J. A., Mar-Morales, B. E., Rodríguez-Gómez, F. J. and Ruiz-Suárez, L. G. (2017) Mapping recession risk for cultural heritage stone in Mexico City due to dry and wet deposition of urban air pollutants, *Atmósfera* 30(3), 189-207 doi: 10.20937/ATM.2017.30.03.01.
- Çelik, M.Y., Sert, M. (2021) An assessment of capillary water absorption changes related to the different salt solutions and their concentrations ratios in the Döğer tuff (Afyonkarahisar-Turkey) used as building stone of cultural heritages, *Journal of Building Engineering*, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102102.

- Charola, A. E. (2000) Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American Institute for Conservation* 39, p. 327-343.
- Charola, A.E., Bläuer, C. (2015) Salts in Masonry: An Overview of the Problem, *Restoration of Buildings and Monuments*, <https://doi.org/10.1515/rbm-2015-1005>, Birkhäuser.
- Chorley, R.J. (1969) The role of water in rock disintegration. *Introduction to Fluvial Processes*, Methuen, 53-73.
- Ciccu, R. (1993) Stone Quarrying: The Italian Experience. In *Proceedings of the 13 th Mining Congress of Turkey, İstanbul, Turkey*, (pp. 341-354).
- Colman, S. M. (1982) Chemical weathering of basalts and andesites; evidence from weathering rinds (2330-7102).
- Corbett, G.J., and Leach, T.M. (1998) Southwest Pacific gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization: Special Publication 6, Society of Economic Geologists, 238 p. (2) (PDF) PACIFIC RIM EPITHERMAL Au-Ag.
- Crnković, B. i Šarić, Lj. (2012) *Građenje prirodnim kamenom*, UPI-2M PLUS d.o.o., ISBN: 978-953-7703-06-6.
- Cvetković, V., Prelević D., Downes, H., Jovanović, M., Vaselli, O., Pecskaž, Z. (2004) Origin and geodynamic significance of Tertiary postcollisional basaltic magmatism in Serbia (Central Balcan Peninsula). *Lithos* 73, 161–186.
- Cvetković, V., Prelević, D., & Schmid, S. (2016) Geology of South-Eastern Europe. In P. Papić (Ed.), *Mineral and thermal waters of Southeastern Europe* (pp. 1–29). Springer International Publishing.
- Cvetković, V., Šarić, K., Grubić, A., Cvijić, R., Milošević, A. (2014) The Upper Cretaceous ophiolite of North Kozara – remnants of an anomalous mid-ocean ridge segment of the Neotethys?, *Geologica Carpathica*, p. 117.
- Cvijić, J. (1909) *Jezerska plastika Šumadije*. Glasnik SAN, knjiga LXXIX, Beograd.
- Cvijić, J. (1924) *Geomorfologija, deo I*. Izdanje Državne štamparije, Beograd.
- Cvijić, J. (1926) *Geomorfologija, deo II*. Izdanje Državne štamparije, Beograd.
- Šekularac, N., Debljović Ristić, N., Mijović, D., Cvetković, V., Barišić, S., Ivanović-Šekularac, J. (2019) The Use of Natural Stone as an Authentic Building Material for the Restoration of Historic Buildings in Order to Test Sustainable Refurbishment: Case Study. *Sustainability*, 11, 4009. <https://doi.org/10.3390/su11154009>.
- Warscheid, TH. (1996) Impacts of microbial biofilms in the deterioration of inorganic building materials and their relevance for the conservation practice. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* 2 (6), 493–504.
- Warscheid, Th., Braams, J. (2000) Biodeterioration of stone: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46, 343-368.
- Warscheid, Th., Krumbein, W.E. (1994) Biodeteriorationsprozesse an anorganischen werkstoffen und mogliche gegenmaßnahmen Werkstoffe und Korrosion, 45(2), pp. 105–113.
- Warscheid, Th., Krumbein, W.E. (1996) Biodeterioration of inorganic nonmetallic materials | general aspects and selected cases. In: Heitz, H., Sand, W., Flemming, H.C. (Eds.), *Microbially Induced Corrosion of Materials*. Springer, Berlin, pp. 273-295.
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M., Siegesmund, S. (2012) Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental Earth Sciences*. 69. 10.1007/s12665-012-2158-1.
- Weiler, K. (2016) Contested Evaluations: Authenticity and the “Living Traditions” of Master Builders and Stonemasons in India. In: Weiler, K., Gutschow, N. (eds) *Authenticity in Architectural*

Heritage Conservation. Transcultural Research – Heidelberg Studies on Asia and Europe in a Global Context. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30523-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30523-3_6).

Wilson, M.J. (1970) A study of weathering in a soil derived from a biotite–hornblende rock: I. Weathering of biotite. *Clay Minerals* 8, 291–303.

Wilson, M.J. (1986) Mineral weathering processes in podzolic soils on granitic materials and their implications for surface water acidification. *Journal of the Geological Society* 143, 691–697.

Winkler, E.M. (1994) *Stone in Architecture: Properties, Durability*, Springer Science & Business Media, ISBN 3540576266, 9783540576266.

Winkler, E.M. (1997) *Stone in architecture properties, durability*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-662-10072-1.

Winkler, E.M. (1973) *Stone Properties, Durability in Man's Environment*, Springer-Verlag, ISBN 10: 0387810714 ISBN 13: 9780387810713.

<https://www.habiternosterritoires-bfc.fr/glossaire.htm> 2023 - приступљено 21.09.2023.

[www.sepa.gov.rs](http://www.sepa.gov.rs), 2023 - приступљено 12.10.2023.



## 22. ЛИСТА КОРИШЋЕНИХ СИМБОЛА И СКРАЋЕНИЦА

MS – Мало степениште

TM – Тешића мајдан

NM – Народни музеј

KL – Класна лутрија

$\rho_b$  – привидна запреминска маса

$\rho_r$  – стварна запреминска маса

$A_b$  – упијање воде при атмосферском притиску

C – коефицијент капиларног упијања воде

$DI_{lin}$  – линеарни индекс распадања

$DI_{prog}$  – прогресивни индекс распадања

pH – мера активности водоникових јона ( $H^+$ ) у раствору која одређује кисели или базни карактер раствора

RH – релативна влажност ваздуха

T – температура

$E_h$  – оксидационо-редукциони потенцијал

$W_c$  – количина капиларно апсорбоване воде у интервалу 24 h

ZZSKGB – Завод за заштиту споменика културе града Београда

$P_o$  – отворена порозност

$P_t$  – укупна порозност

XRPD – рендгенска дифракција праха

SEM-EDS – скенирајућа електронска микроскопија са енергетско - дисперзивном спектрометријом

XRF- рендгенска флуоресцентна спектрометрија

LA-ICP-MS – метода масене спектрометрије индуковане спрегнутом плазмом са ласерском аблацијом

ICOMOS – Међународни савет за споменике и споменичке целине (*International Council on Monuments and Sites*)

## Биографија

### Невенка (Милош) Новаковић

Невенка Новаковић је рођена у Зворнику 05. новембра 1980. године. Основну школу је завршила у Бањи Ковиљачи, а Трећу београдску гимназију у Београду. Основне академске студије на Архитектонском факултету Универзитета у Београду уписала је 1999. године, а дипломирала 2006. године, стекавши звање дипломирани инжењер архитектуре. Као студент била је сарадник Републичког завода за заштиту споменика културе, што је определило за даље бављење заштитом градитељског наслеђа. Одмах након дипломирања запослила се у Заводу за заштиту споменика културе града Београда, у одељењу за Београдску тврђаву, која има статус културног добра од изузетног значаја за Републику Србију, где и данас ради као архитекта, виши конзерватор. Школске 2015/16 године уписала је докторске академске студије на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Геологија, модул Петрологија и геохемија.

У Заводу за заштиту споменика културе града Београда задужена је за осмишљавање рада групе, развој визије Београдске тврђаве, прављење планова ревитализације целокупног простора, увођење нових садржаја. Објекти којима се бави у свом свакодневном раду су делимично или потпуно изграђени од камена. Самостално израђује пројекте конзервације, рестаурације и ревитализације објеката. Врши надзор над спровођењем радова на културним добрима. Сарађује са стручњацима из свих релевантних институција у земљи и иностранству. Као организатор пројеката синтетише рад великог броја учесника у процесу рестаурације (археолози, геолози, технолози, статичари, извођачи радова). Учествује у групи стручњака који се баве израдом рецептура компатибилних материјала за послове рестаурације. Члан је следећих професионалних организација:

- Потпредседница међународног научног комитета за камен и порозне грађевинске материјале ISCS-ICOMOS, претходно експертски члан са правом гласа
- Члан извршног одбора ICOMOS Србија
- Инжењерске коморе Србије
- Члан Комисије за стандарде – КС У346 конзервација културног наслеђа при Институту за стандардизацију Србије.
- Члан Комисије за стандарде и сродне документе КС У059, Зграде и инжењерско-грађевинске објекте, при Институту за стандардизацију Србије

Значајно научно искуство и резултате у области проучавања литолошких и физичко-механичких својстава камена, временске трајности и могућности заштите постигла је као главни и одговорни пројектант више од 30 пројеката реконструкције, рестаурације и конзервације најзначајнијих објеката и делова фортификација на Београдској тврђави и Београду, изграђених од камена. Руководила је међународним тимовима на пројектима реконструкције објеката од међународног значаја. Била је координатор и главни пројектант пројекта реконструкције Споменика Победнику, једног од симбола и највреднијих споменика Београда.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Невенка Новаковић

Број индекса Г808/15

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Површинско распадање керсантиа из Тешића мајдана у корелацији са начином обраде на примеру Малог степеништа (Београдска тврђава)

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину другихлица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторскограда**

Име и презиме аутора Невенка Новаковић

Број индекса Г808/15

Студијски програм Геологија

Наслов рада: Површинско распадање керсантита из Тешића мајдана у корелацији са начином обраде на примеру Малог степеништа (Београдска тврђава)

Ментор: др Весна Матовић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Површинско распадање керсантита из Тешића мајдана у корелацији са начином обраде на примеру Малог степеништа (Београдска тврђава)

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање. Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално– без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално– делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.