

АНАЛИЗА ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА КАМЕНА У СРБИЈИ ЗА ПОТРЕБЕ ПРОТИВЕРОЗИОНИХ РАДОВА

маст. инж. шум. Вукашин Рончевић^{1*}, маст. инж. шум. Никола Живановић¹,
др Гроздана Гајић¹

¹Универзитет у Београду, Шумарски факултет

*vukasin.roncevic@sfb.bg.ac.rs

АПСТРАКТ: Подручје Србије је геолошки веома разноврсно и богато, што пружа могућност експлоатације, испитивања и примене различитих грађевинских материјала неметаличног порекла, који се добијају од чврстих, неvezаних и полуvezаних стена. Као неизоставан грађевински материјал, неметаличног порекла, који се примењује у противерозионим радовима, издваја се грађевински камен. Грађевински камен се у Србији користи, у противерозионим радовима, пре свега као технички камен, а у незнатној мери и као украсни (архитектонски камен). У циљу адекватног одабира и употребе грађевинског камена, у области противерозионих радова, неопходно је утврдити његова минеролошко-петрографска, физичко-механичка и посебна својства. У раду је представљена упоредна анализа физичко-механичких карактеристика грађевинског камена у Србији, пореклом од хемогених и органогених седиментних стена, и утицаја услова средине на трајност камена, са примарним циљем адекватног одабира грађевинског камена за противерозионе радове.

Кључне речи: седиментне стене, грађевински камен, физичко-механичке карактеристике, противерозиони радови

ANALYSIS OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STONE IN SERBIA FOR THE NEEDS OF EROSION CONTROL WORKS

MSc Vukašin Rončević^{1*}, MSc Nikola Živanović¹, dr Grozdana Gajić¹

¹University of Belgrade, Faculty of Forestry

*vukasin.roncevic@sfb.bg.ac.rs

ABSTRACT: The area of Serbia is geologically very diverse and rich, which provides the possibility of exploitation, examination and application of various construction materials of non-metallic origin, which are obtained from solid, unbound and semi-bound rocks. As an essential construction material of non-metallic origin, which is applied in erosion control works, a building stone is distinguished. In Serbia, construction stone is used in erosion control works, primarily as a technical stone, and to a slight extent, as decorative (architectural stone). In order to adequately select and use the building stone, in the field of erosion control works, it is necessary to determine its mineral-petrographic, physico-mechanical and special properties. The paper presents a comparative analysis of the physico-mechanical characteristics of the building stone in Serbia, originating from the hemogenic and organogenic sedimentary rocks, and the influence of the environment on the durability of the stone, with the primary goal of adequately selecting the construction stone for erosion control works.

Key words: sedimentary rocks, building stone, physico-mechanical characteristics, antierosion works

Увод

Грађевински камен је један од материјала који се најчешће користе за потребе противерозионих радова на подручју Србије. С обзиром на услове средине у којима се примењује, камен мора задовољити одређене критеријуме како би се обезбедила његова трајност. Значајан фактор који утиче на трајност камена јесте адекватан одабир камена (Winkler, 1973). Према наводима Bilbije (1984) трајност неког грађевинског камена представља меру његове способности да се одупре пропадању и самим тим задржи почетну величину, облик, чврстину и изглед током дужег временског периода. Унутрашњи и спољашњи чиниоци утичу на трајност камена. Под унутрашњим чиниоцима мисли се на порозност камена, однос камена према води, топлотно ширење и скупљање камена, док под спољашње чиниоце спадају атмосфера и атмосферски загађивачи, разарајуће деловање мрза, наизменично сушења и влажења камена, растворљиве соли, физичко распадање под утицајем температуре и деловање живих организама на камен. Одабир грађевинског камена са аспекта трајности је заснован пре свега према томе како се показао у прошлости и према резултатима стандардних тестова (Bell, 1993). Грађевинском камен који је пореклом од хемогених и органогених седиментних стена, а који се примењује за изградњу у противерозионим радовима у Србији, јесте технички камен одређених физичко-механичких карактеристика, док се украсни камен врло ретко користи. Технички камен се у противерозионим радовима користи пре свега као материјал или конструктивни елемент у оквиру система интегралног уређења сливних подручја угрожених ерозионим процесима и бујичним поплавама.

Материјал и метод

Према постојећим сазнањима и резултатима испитивања квалитета камена Института за испитивање материјала Србије, објављеним у публикацијама у периоду 1956-1962 године и Студије о врстама, квалитету и резервама техничког грађевинског камена у Србији у постојећим каменоломима (Bilbija и Spasojević, 1959, 1961 и 1964), извршена је упоредна анализа физичко-механичких карактеристика грађевинског камена у Србији, у циљу адекватног одабира камена за потребе противерозионих радова. У анализу су уврштени узорци из 275 активних каменолома у периоду 1956-1962 године, на територији Србије. Добијене вредности испитивања камена значајне су са аспекта познавања квалитета камена из постојећих налазишта или за потребе отварања нових каменолома. Камен је добијен из седиментних стена хемогеног и органогеног порекла. У групу стена обухваћених анализом спадају кречњак, доломит, травертин, бигар и оникс. Физичко-механичке особине грађевинског камена анализирани у раду приказане су кроз вредности:

1. чврстоће камена на притисак:
 - 1) у сувом стању,
 - 2) у водом засићеном стању и
 - 3) после дејства мрза,
2. отпорности камена према хабању стругањем,
3. упијања воде,

4. постојаности камена на мразу,
5. запреминске масе камена:
 - 1) са шупљинама и порама и
 - 2) без шупљина и пора,
6. порозности камена.

Даља анализа обухвата сагледавање деловања услова средине на камен, у којима се камен у Србији користи за противерозионе радове. Због воде као основног чиниоца разарања стена, услови средине у којима се примењује камен су подељени према учесталости и трајању влажења камена на 3 категорије:

1. категорија - услови у којима се камен кваси падавинама и већином времена је под директним утицајем атмосферилија и временских прилика,
2. категорија - услови у којима је камен у зони сталне осцилације воде, наизменично под водом и под директним утицајем атмосферилија и временских прилика,
3. категорија - услови у којима је камен увек под водом, осим у изузетним приликама, и ретко под директним утицајем атмосферилија и временских прилика.

На основу анализе физичко-механичких карактеристика камена и услова средине у којима се користи, утврђене су погодности камена за употребу у противерозионим радовима у Србији.

Резултати и дискусија

Седиментне стене према својој намени и вредности имају далеко већи значај од магматских и метаморфних стена. Седиментне стене чине више од 75% земљине површине, међутим, од тог процента, седиментне стене хемогеног и органогеног порекла учествују са мање од 10%. Камен обухваћен анализом добијен је од калцијум-карбонатне стене, и то кречњака, доломита, травертина, бигра и оникса. У основи се ове стене састоје од CaCO_2 и других примеса, при чему се доломит одликује и високим садржајем MgCO_2 (Bilbija, 2009). Њихове физичко-механичке карактеристике имају велики значај приликом одабира за потребе градње, међутим треба узети у обзир и хемијске агенсе који утичу на карбонатне стене, који могу утицати значајно на промену њихових физичко-механичких карактеристика. Камен добијен од поменутих стена је класификован на основу вредности његових физичко-механичких карактеристика према општим критеријумима (табела 1).

Чврстоћа камена на притисак

Чврстоћа камена на притисак се користи као квантитативни показатељ употребљивости. Стварна оптерећења камена су увек знатно испод граничних вредности чврстоће. Чврстоћа на притисак највећег броја стена виша је од чврстоћа бетона, опеке и дрвета. Према вредности притисне чврстоће камена у распону од 250-150 Мра, кречњак спада у групу стена високе чврстоће, и јављају се у 46% узорака, док се кречњак средње високе чврстоће, са вредностима од 100-150 Мра, јавља у 54% узорака. Дакле ради се о умерено порозном и компактном једром кречњаку. Код доломита те вредности се крећу изнад 250 Мра у 14%, док у групу стена високе и средње високе чврстоће спада 65% и 21%

доломита. Чврстоћа травертина и бигра се крећу у границама вредности за стене умерене чврстоће 50-100 Мра, а средње високе чврстоће за оникс, што је и очекивано. Травертин према чврстоћи спада у групу врло високе (>250 Мра), високе (150-200 Мра) и средње високе чврстоће (100-150 Мра) са учешћем од 14, 65 и 21%, редом. Бигар поседује ниску чврстоћу на притисак (10-50 Мра), док оникс са 67% узорака има средње високу, а са 33% умерену чврстоћу. Чврстоћа кречњака, доломита, бигра и оникса на притисак су мање када се стена доведе у водом засићено стање и након замрзавања, док је код травертина забележено повећање отпорности стене на притисак након замрзавања.

Отпорности камена према хабању стругањем

Испитивање отпорности камена према хабању стругањем омогућава да се стекне увид о трајности и могућем хабању камена током времена. Међутим важно је поменути да се за камен са истог локалитета и из исте лабораторије у којој је испитиван, у различитим временским раздобљима могу добити и до 25% различити резултати теста отпорности на хабање Bohme-a. Сматра се да овакве разлике произилазе из немогућности да се остваре исти услови испитивања. Кречњак се на основу резултата теста отпорности на хабање стругањем класификује у 3% узорака као изузетно тврд, у 77% као врло тврд и у 20% узорака као тврд, што одговара нешто вишим вредностима отпорности на хабање кречњака него што је уобичајено методом Bohme-a. Вредности испитаног доломита се крећу у опсегу категорије врло тврдог (9%) и тврдог камена (91%) што је и очекивано према наводима Bilbije (2009). Вредности отпорности на хабање травертина се крећу у распону од умерено тврдог, 67%, до изразито меканог, 33%. Оникс је умерене тврдоће.

Упијање воде и постојаност на мразу

Кречњак, доломит и оникс упијају врло мало воде у 94, 79 и 100% узорака, док је упијање воде код травертина нешто веће, те се његове вредности крећу у распону од малог упијања, 17%, умереног упијања, 33%, до осетног упијања у чак 50% узорака. Бигар има способност врло великог упијања воде. Све стене су према спроведеним испитивањима постојане на мразу.

Запреминска маса камена

Вредности запреминске масе са порама кречњака, доломита и оникса сврставају их у групу стена високе запреминске масе са порама у распону од $2,5\text{--}3\text{ g/cm}^3$. Травертин поседује нешто мању запреминску масу и она се креће у опсегу од $2,2\text{--}2,5\text{ g/cm}^3$, што га сврстава у групу средњих вредности запреминске масе. Бигар има ниску запреминску масу због велике порозности. Специфичне запреминске масе су незнатно веће код свих стена, осим код бигра код којег је разлика у маси значајна. Приликом градње увек се предност даје камену бројчано веће вредности запреминске масе са порама.

Порозност камена

Порозност кречњака се креће у границама од компактног у 45% узорака, преко мало порозног у 44% до умерено порозног у 11% узорака. Порозност доломита се креће у границама компактног, преко мало порозног до умерено порозног са учешћем по категоријама од 57%, 29% и 14%. Код травертина се ове вредности крећу у опсегу од знатно порозног до порозног камена у 33% и 67% случајева. Оникс је компактан до

Стена	Број узорака	Чврстоћа камена на притисак (Мра)			Опорност камена на хабање струјањем (Bohme) (cm ³ /50cm ²)	Упијање воде (%)	Постојаност камена на мразу	Запреминска маса камена (g/cm ³)		Порозност камена (%)
		У сувом	Водом заштићен	Након замрзавања				Са порама	Без пора	
Кречњак	251	Висока (150-250)* 46%**	Висока (150-250) 41,2%	Висока (150-250) 36%	Изузетно тврд (<5) 3%	Врло мало (<0,5) 94%	Постојан	Висока (2,5-3,0) 100%	2,6-3,0	Компактан (<1) 45%
			Средње висока (100-150) 44,4%	Средње висока (100-150) 49%	Врло тврд (5-10) 77%					Мало порозан (1-2,5) 44%
		Средње висока (100-150) 54%	Умерена (50-100) 14,4%	Умерена (50-100) 15%	Тврд (10-20) 20%	Мало (0,5-1) 6%				Умерено порозан (2,5-5) 11%
Доломит	14	Врло висока (>250) 14%	Висока (150-250) 71%	Висока (150-250) 85%	Врло тврд (5-10) 9%	Врло мало (<0,5) 79%	Постојан	Висока (2,5-3,0) 100%	2,7-2,8	Компактан (<1) 57%
		Висока (150-250) 65%		Средње висока (100-150) 29%	Средње висока (100-150) 15%					Тврд (10-20) 91%
		Средње висока (100-150) 21%								
Травертин	6	Средње висока (100-150) 17%	Средње висока (100-150) 17%	Средње висока (100-150) 17%	Умерено тврд (20-30) 67%	Мало (0,5-1,0) 17%	Постојан	Средња (1,5-2,5) 100%	2,6-2,7	Знатно порозан (5-10) 33%
		Умерена (50-100) 50%	Умерена (50-100) 50%	Умерена (50-100) 66%		Умерено (1,0-2,5) 33%				
		Ниска (10-50) 33%	Ниска (10-50) 33%	Ниска (10-50) 17%	Изразито мекан (>40) 33%					Осетно (2,5-5) 50%
Бигар	1	Ниска (10-50)	Ниска (10-50)	Ниска (10-50)	/	Врло велико (15-30)	Постојан	Ниска (1,0-1,5)	2,7	Екстремно порозан (>20)
Оникс	3	Средње висока (100-150) 67%	Средње висока (100-150) 33%	Средње висока (100-150) 33%	Умерено тврд (20-30) 100%	Врло мало (<0,5) 100%	Постојан	Висока (2,5-3,0) 100%	2,7	Мало порозан (<1) 100%
		Умерена (50-100) 33%	Умерена (50-100) 67%	Умерена (50-100) 67%						

* Распон у коме се јављају вредности појединих физичко-механичких особина камена.

** Процентуално учешће узорка камена одговарајућем распону вредности физичко-механичких особина.

Табела 1. Класификација вредности физичко-механичких карактеристика узоркованог камена у Србији, према општој подели.

Извор: аутор.

мало порозан, док бигар као што је и очекивано поседује екстремну порозност. Поред порозности, као један од основних показатеља физичког стања камена јавља се и степен густине камена или степен компактности чије вредности не прелазе 1.

Анализом физичко-механичких карактеристика камена су добијене вредности које одређују ближе квалитет камена, међутим због неких лошијих физичко-механичких карактеристика, малог броја испитаних узорака и високе тржишне цене, у односу на кречњак и доломит, травертин, бигар и оникс неће бити узети у даље разматрање приликом одабира камена за противерозионе радове.

Камен се у противерозионим радовима најчешће користи као ломљен и дробљен камен, за израду обалоутврда, насутих каменних брана, насипа, насипања дна речних и бујичних токова, бучница, прагова, преграда, потпорних зидова, у хитним мерама санације клизишта... (Гајић, 2018). Приближна оцена употребљивости стена на лицу места може се дати и на основу показатеља из табеле 2.

Табела 2. Критеријуми за приближну оцену употребљивости грађевинског камена.

Карактеристика	Квалитетан камен	Камен лошег квалитета
Звук	Јасан	Туп, потмуо
Отпорност камена на удар	Тешко се разбија	Лако се разбија
Отпорност ивица	Тешко се одлама	Лако одлама
Хабање	Мало	Јако
Скрама од корозије	Не постоји или је танка	Дебела кора
Боја	Изразита	Без сјаја
Сјај	Сјај минерала као огледало	Мутан
Додир под руком	Тврд, храпав	Мек, масан
Структура	Кристаласта, зрнаста	Земљаста, као креда или глина
Површина прелома	Шкољкаста, глатка, једнолика	Исцепана, храпава, неједнолика
Текстура	Масивна, компактна	Шкриљаста, цепљива, влакнаста
Склоп	Једнолик	Неједнолик
Веза зрна	Чврста	Слаба
Тврдоћа при парању	Тешко се пара	Лако се пара

Извор: Muravljev, 1995.

Поред физичко-механичких карактеристика камена, као значајан фактор трајности камена, важно је навести утицај услова средине у којима се камен примењује и механизам њиховог деловања на камен.

У подручјима где се камен **кваси искључиво атмосферским падавинама**, у одсуству воде камен ће бити изложен пре свега разарајућем деловању промена температуре која узрокују унутрашње напрезање камена. Напрезања се јављају као последица запреминских промена, различитих минерала који сачињавају стену, током загревања и хлађења, као и због разлике у температури површинског и унутрашњег дела камена. У том погледу значајно је одабрати кречњак и доломит са што мање примеса других минерала, нарочито оних са мањом чврстоћом од основне стене. Такође, у равничарским подручјима без изражене вегетације, камен је често изложен утицају солске ерозије, при чему се његове вредности отпорности на хабање могу узети као показатељ његове постојаности при таквим условима. Вредности отпорности кречњака и доломита на хабање су такве да спадају у групу изузетно тврдог, врло тврдог и тврдог камена, те их је сходно томе препоручљиво користити у поменутим условима.

Наизменично потапање и излагање камена атмосферилијама и временских приликама се јавља као последица присуства воде у ваздуху и непосредног контакта камена са текућом или стајаћом површинском или подземном водом у зони осцилације нивоа воде. Растварање камена се догађа у периоду задржавања воде у камену, док се распадање дешава током процеса сушења, при чему само натапање није толико штетно. У оваквим условима, општећења камена се јављају као последица појаве напона у камену, квашењем и задржавањем воде у камену, деловања мрза и кристализације соли (Bilbija 1984). Основни показатељи отпорности камена на овакво дејство воде су порозност камена, његова способност упијања воде и чврстоћа на притисак. Порозност камена одређује његову способност да упије воду, и зависи од величине и међусобне повезаност пора, тако да укупна порозност може бити велика, а упијање воде мало и обратно, у односу на проценат укупне порозности стене. Такође је важно навести и капиларно ширење воде кроз стенске поре. Наизменично влажење и сушење камена и деловање мрза утичу на повећање порозности и слабљење чврстоће стене на притисак. Кречњак и доломит обухваћени анализом компактни су и мале порозности, што обезбеђује њихову трајност. Такође имају и висок степен чврстоће на притисак, чак и након влажења и замрзавања тако да не подлежу лако физичком распадању.

Посебан вид распадања карактеристичан за зону наизменичног квашења и сушења камена јесте хемијско распадање код којег долази до растварања кречњака или доломита у унутрашњости камена и изношења CaCO_3 и Mg CO_3 раствора на површину где долази до исцветавања и очвршћавања соли, што доводи до затварања пора очвршћавања камена у тој зони. Ово међутим доводи и до слабљења отпорности камена на притисну чврстоћу. Притисна чврстоћа камена не би смела да падне испод 80 Мпа у хидроградњи (Bilbija, 2009), што одговара условима какви најчешће владају у противерозионим радовима, што кречњак и доломит, у погледу чврстоће, сврстава у камен повољан за градњу у поменутих условима.

Камен потопљен у води заштићен је од атмосферилија, међутим подложен је штетном деловању наноса који вода носи и који троши камен, те с тога његова отпорност на хабање у таквим условима има значајну улогу. Такође важно је навести и утицај удара крупнијих комада наноса ношених водом, о камен уграђен у различите противерозионе објекте, за који би било значајно утврдити вредности отпорности камена на удар. За ломљен камен који се насипа у дну речних и бујичних токова важно је истаћи, поред величине, и вредност запреминских тежина камена са порама, због веће отпорности на покретање уколико је камен веће запреминске тежине са порама, чије су вредности уско везано са порозношћу камена. Кречњак и доломит имају високе вредности запреминске тежине што их сврстава у повољан материјал за примену у поменутих условима, у виду ломљеног камена.

Закључци

На основу анализе физичко-механичких карактеристика грађевинског камена пореклом од седиментних стена хемогеног и органогеног порекла, приликом које је извршена категоризација вредности физичко-механичких особина према општој класификацији, утврђена је погодност примене камена у противерозионим радовима у Србији. Поред тржишне вредности самог камена и малог броја узорака, који превасходно искључују тревертин, бигар и оникс из употребе у противерозионим радовима, сама анализа је показала да су кречњак и доломит бољих физичко-механичких карактеристика него тревертин, бигар и оникс. Такође, издвојене су три категорије услова средине у којима се камен примењује за противерозионе радове у Србији и које утичу на његову трајност,

према учесталости и трајању влажења камена. За сваку од категорија издвојене су физичко-механичке карактеристике камена, значајне за трајност камена у одговарајућим условима средине, према механизму деловања услова средине и карактеристикама самог камена. На основу анализираних вредности поменутих особина камена, за различите услове средине, утврђено је да се кречњак и доломит у Србији препоручују за примену у противерозионим радовима. Свакако, у циљу што бољег одабира камена за примену у противерозионим радовима, поред у раду истражених, неопходно је спровести и истраживања осталих значајних показатеља квалитета камена и фактора услова средине који утичу на његову трајност.

Литература

1. Bell, F.G. Geo, (1993): Department of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban, South Africa, 21: 187. <https://doi.org/10.1007/BF00775905>,
2. Bilbija N., Spasojević J., (1959): Rezultati ispitivanja prirodnog kamena 1956. i 1957. god. Institut za ispitivanje materijala NR Srbije, publikacija br. 12, Beograd.
3. Bilbija N., Spasojević J., (1961): Rezultati ispitivanja prirodnog kamena 1958. i 1959. god. Institut za ispitivanje materijala NR Srbije, publikacija br. 19, Beograd.
4. Bilbija N., Spasojević J., (1964): Rezultati ispitivanja prirodnog kamena 1960, 1961. i 1962. god. Institut za ispitivanje materijala SR Srbije, publikacija br. 20, Beograd.
5. Bilbija, N., (1984): Tehnička petrografija, svojstva i primena kamena, univerzitetski udžbenik, Naučna Knjiga Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi,
6. Bilbija, N., (1987): Vremensko propadanje kamena u građevinama sa posebnim pogledima na fizičko vremensko propadanje i mogućnost njegovog predviđanja laboratorijskim ispitivanjem, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu,
7. Bilbija, N., Matović V., (2009): Primenjena petrografija, svojstva i primena kamena, drugo dopunjeno izdanje, Građevinska knjiga, Beograd,
8. Gajić, G., (2018): Materijali u protiverozionim radovima, skripta, Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd,
9. Muravljov, M., (1995): Građevinski materijal, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Naučna knjiga, Beograd.
10. Winkler, E. M., (1973): Stone properties: Durability in man's environment, New York: Springer-Verlag,