

გეოპოლიმერული მჭიდრა მასალების მიღება თერმულად
მოდირიცირებული საქართველოს თიხოვანი ქანების საფუძველზე

ე. შაფაქიძე^{1,*}, მ. ავალიანი², მ. ნადირაშვილი¹,
ვ. მაისურაძე¹, ი. გეჯაძე¹, თ. პეტრიაშვილი¹

¹ ა. თვალჭრელიძის სახ. მინერალური ნედლეულის კავკასიის ინსტიტუტი
ი. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო
*ellennelia@gmail.com

² რ. აგლაძის სახ. არაორგანული ქიმიის და ელექტროქიმიის ინსტიტუტი
ი. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო

მიღებულია 2019 წლის 23 სექტემბერს

ანოტაცია

ცემენტის / ბეტონის წარმოება, როგორც ეკოლოგიურად ერთერთი ყველაზე მავნე სფერო, გამოუსწორებელ ზიანს აყენებს გარემოს. ამის გამო დიდი ინტერესია მიპყრობილი ცემენტის ალტერნატიული სახეობების, ე.წ. უკლინკერო მჭიდა მასალების, მიღების ტექნოლოგიების შემუშავებისაკენ. ასეთად მიჩნეულია გეოპოლიმერული მჭიდა მასალები. სტატიის მიზანს წარმოადგენს თერმულად მოდიფიცირებული საქართველოს თიხოვანი ქანების საფუძველზე გეოპოლიმერული მჭიდების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება, რისთვისაც გამოყენებულ იქნა ადგილობრივი ქანები: თიხური ფიქალი, არგილიტი და ადვილადღებადი თიხა. კვლევების შედეგად შემუშავდა თიხოვანი ქანების თერმული მოდიფიცირების რეჟიმი და მათი გამოყენებით მიღებულ იქნა გეოპოლიმერული მჭიდა მასალების სხვადასხვა შემადგენლობა. დადგინდა, რომ მიღებული მჭიდების თბოდაძულებების შედეგად მათი მექანიკური სიმტკიცე საგრძნობლად მატულობს.

1. შესავალი

მსოფლიო მოსახლეობის სწრაფი ტემპებით მატებამ, რის შედეგადაც გაიზარდა მოთხოვნები ინფრასტრუქტურების მიმართ, განაპირობა ცემენტის / ბეტონის, როგორც ძირითადი სამშენებლო მასალის, მოხმარების ზრდა. ჩვეულებრივი პორტლანდცემენტის (OPC) წარმოება, მიუხედავად მისი უნიკალურობისა, რიგი უარყოფითი თვისებებით ხასიათდება: ენერგორესურსებისა და ბუნებრივი ნედლეულის მაღალი მოხმარება და ნახშირორჟანგის დიდი რაოდენობით გამონაბოლქვი (რაც კირქვის დეკარბონიზების შედეგია). ამის გამო მსოფლიოს მეცნიერები მუდმივ ძიებაში იმყოფებიან, რათა გამონახონ საწვავისა და ნედლეულის ალტერნატიული წყაროები, ასევე შეიმუშაონ მჭიდა მასალების ახალი სახეობები,

რომლებიც პორტლანდცემენტის ანალოგებად გამოდგება და, რაც მთავარია, ეკოლოგიური მაჩვენებლებით მასზე უკეთესი იქნება.

გეოპოლიმერული მჭიდები და მათ საფუძველზე მიღებული მასალები ენერგოეფექტური სამშენებლო მასალების შექმნის ტექნოლოგიების ახალი მიმართულებაა, რომელსაც საფუძველი ჩაუყარა ფრანგმა მეცნიერმა ჟოზეფ დავიდოვიცმა [1]. მისი კლასიფიკაციით, არსებობს გეოპოლიმერული მჭიდა მასალების შემდეგი სახეები: ა) გეოპოლიმერული მჭიდა წიდის საფუძველზე, ბ) გეოპოლიმერული მჭიდა მთის ქანების საფუძველზე და ვ) გეოპოლიმერული მჭიდა წანატაცი ნაცრის საფუძველზე. გეოპოლიმერებს უკლინკერო მჭიდების სახელითაც მოიხსენიებენ.

გეოპოლიმერული მასალები პორტლანდცემენტთან შედარებით გამოირჩევიან: ეკოლოგიურობით, ხანმდეგობით და მჭიდას წარმოების პროცესში ნახშირორჟანგის დაბალი გამოყოფით ატმოსფეროში. 1 ტ გეოპოლიმერული მჭიდას წარმოებისას ატმოსფეროში გამოიყოფა 0.18 ტ CO₂, რაც 5-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე პორტლანდცემენტის მიღებისას. ხოლო მეტაკაოლინის გამოყენების შემთხვევაში CO₂-ის გამონაბოლქვი შეადგენს 0.5 – 0.7 ტ-ს [2].

საწარმოო ნარჩენების საფუძველზე წარმოებული გეოპოლიმერული სამშენებლო მასალების ღირებულება შეესაბამება ტრადიციულ ნედლეულზე მიღებული მასალების ღირებულებას. ამიტომ გეოპოლიმერული მჭიდა მასალები მოიაზრება, როგორც მათი ალტერნატივა.

გეოპოლიმერული მჭიდებისათვის ნედლეულად გამოიყენება 750 – 850 °C ტემპერატურაზე დამუშავებული ალუმოსილიკატური მასალები. საწყისი მასალების ტემპერატურული აქტივაცია განაპირობებს ცეოლითის მსგავსი მტკიცე პოლიმერული სტრუქტურების წარმოქმნას. ეს საშუალებას იძლევა, რომ 70 – 90 %-ით შემცირდეს სათბობენერგეტიკული ხარჯები და ნახშირორჟანგის გამონაბოლქვის რაოდენობა, პორტლანდცემენტის წარმოებასთან შედარებით. კიდევ უფრო ნაკლებია ენერგოდანახარჯები ბრძმედის გრანულირებული წიდის და წანატაცი ნაცრის გამოყენების შემთხვევაში, ვინაიდან ამ საწარმოო ნარჩენებს უკვე გავლილი აქვთ თერმული დამუშავება [3 – 5].

გეოპოლიმერები განიხილება როგორც მჭიდა სისტემები წმინდად დაფუძნებული ალუმოსილიკატური მასალების საფუძველზე, რომელთაც შეერევათ ტუტის ან ტუტე რეაქციის მქონე მარილების ხსნარები (როგორც წესი, ნატრიუმის ან კალიუმის ჰიდროოქსიდები, სილიკატები ან კარბონატები). ალუმოსილიკატური ოქსიდებისა და სილიკატების გახსნის შედეგად ტუტეში ადგილი აქვს მათ შემდგომ რეკონდენსაციას და ამორფული სამგანზომილებიანი კარკასული სტრუქტურის წარმოქმნას. ანუ გეოპოლიმერი – ეს არის სამგანზომილებიანი ალუმოსილიკატური მინერალური პოლიმერი [1]. იგივე ავტორის აზრით, ტუტეების მიერ აქტივირებული ყველა მჭიდა მასალა არ განიხილება, როგორც გეოპოლიმერი, არამედ – მხოლოდ ისეთი, როდესაც მიიღება ამორფული ან ნახევრადკრისტალური აგებულების მქონე ცეოლითის მსგავსი სტრუქტურა. გეოპოლიმერი მოიაზრება ასევე, როგორც ნანომასალა.

გამყარებულ პორტლანდცემენტის ქვას და გამყარებულ გეოპოლიმერს აქვთ სხვადასხვა ქიმიური შემადგენლობა და პრინციპულად განსხვავებული სტრუქტურა. პორტლანდცემენტის ჰიდრატაციის პროდუქტი კალციუმის სილიკატის ჰიდროგელია. ცემენტს აქვს ფენოვანი ტობერმორიტული სტრუქტურა, რომლის ფორმირება ხორციელდება კალციუმჟანგბადის ოქტაედრების ფირფიტებისა და SiO₄ და AlO₄ ტეტრაედრების ჯაჭვებისაგან, მაშინ როდესაც გეოპოლიმერის ქვა წარმოადგენს

კარკასულ ალუმოსილიკატს, შედგენილს SiO_4 და AlO_4 ტეტრაედრებისგან, რომელთაც საერთო წვეროები აქვთ [6].

გეოპოლიმერების წინამორბედს წიდატუტიანი ცემენტები წარმოადგენენ, რომელთა შემადგენლობები შემუშავებულ იქნა ვ. გლუხოვსკის, პ. კრივენკოსა და მათი კოლეგების მიერ კიევის საინჟინრო-სამშენებლო ინსტიტუტში [7, 8]. ჟ. დავიდოვიცი მიუთითებდა ამ კვლევების განსაკუთრებულ მნიშვნელობაზე გეოპოლიმერული მასალების ტექნოლოგიის განვითარების საქმეში.

გეოპოლიმერული მჭიდების მიღების საწყის ეტაპზე ალუმოსილიკატური მასალად გამოიყენებოდა კაოლინური თიხების $750 - 850^\circ\text{C}$ ტემპერატურაზე დამუშავების შედეგად მიღებული პროდუქტი – მეტაკაოლინი. გამოწვის დროს მიმდინარეობს კაოლინის დეჰიდრატაცია შემდეგი სქემით: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. გამოწვის შედეგად იზრდება ამორფული ფაზის შემცველობა, რაც ალუმოსილიკატებს რეაქციისუნარიანობას მატებს.

ალუმოსილიკატების რეაქციისუნარიანობა, ასევე, დამოკიდებულია მასალის დისპერსიულობაზე. როგორც წესი, პორტლანდცემენტის ოპტიმალური დისპერსიულობა $3500 - 4500 \text{ სმ}^2/\text{გ}$ -ის ფარგლებშია. უფრო მაღალი დისპერსიულობის დროს იზრდება წყალმოთხოვნა და ფორიანობა, რის გამოც მჭიდის სიმტკიცე კლებულობს. იმავდროულად დადგენილია, რომ მეტაკაოლინის დისპერსიულობის გაზრდა 15670 -დან $25550 \text{ სმ}^2/\text{გ}$ -მდე იწვევს სიმტკიცის მკვეთრ ზრდას [9]. ამ კვლევების მიხედვით, ამ დროს წარმოიქმნება ტუტის მიმართ მაღალ რეაქციისუნარიანი ალუმინი.

კაოლინის ერთდროული გამოწვა ნაცართან და წიდასთან ერთად საშუალებას იძლევა, რომ რეაქციისუნარიანი მეტაკაოლინის მიღების დრო რამდენიმე წუთამდე შემცირდეს [9 – 11].

მეტაკაოლინის ტუტე აქტივაციის შედეგად მიიღება მჭიდა მაღალი მექანიკური სიმტკიცით და ბადისებრი სტრუქტურით. მეტაკაოლინთან კალციუმის ჰიდროქსიდის $\text{Ca}(\text{OH})_2$ დამატების შემთხვევაში რეაქცია განსხვავებული სქემით მიმდინარეობს: იცვლება ბადისა და C-S-H გელის ფორმები [12].

ა. პალომოსა და თანაავტორების კვლევების მიხედვით [13], არსებობს ტუტე აქტივაციის ორი მოდელი. პირველი მათგანი ვრცელდება წიდატუტიან მჭიდებზე, როდესაც ბრძმედის წიდა ($\text{Si} + \text{Ca}$) აქტიურდება საშუალო ტუტე ხსნარით. ამ შემთხვევაში რეაქციის მთავარი პროდუქტია კალციუმის ჰიდროსილიკატები (CSH). მეორე მოდელის მიხედვით კი, ძლიერი ტუტე ხსნარებით აქტიურდება ალუმოსილიკატური ნაერთები, ისეთები, როგორიცაა მეტაკაოლინი, რომლის ძირითადი ოქსიდებია Al_2O_3 და SiO_2 . ამ დროს მიღებული მასალა ხასიათდება უფრო მაღალი მექანიკური სიმტკიცითა და პოლიმერული სტრუქტურით.

ვ. კალაშნიკოვის ხელმძღვანელობით შემუშავებულ იქნა გეოპოლიმერული მჭიდა [14], რომლის აქტივაცია ხდება ტუტის შედარებით დაბალი დოზირებით. ეს მჭიდა შეიცავს აგრეთვე 40% -მდე თიხას და სხვა დისპერსიულ მთის ქანებს.

რ. რახიმოვასა და თანამშრომლების მიერ ჩატარებულია სისტემური კვლევები გეოპოლიმერული და წიდატუტიანი მჭიდების სტრუქტურის წარმოქმნის შესწავლის მიზნით [15 – 17]. ამ მჭიდების შემადგენლობაში ძირითადი კომპონენტის სახით შეყვანილი იქნა ბრძმედის წიდა, ხოლო დანამატებად – სხვადასხვა სახის მთის ქანები და ტექნოგენური მასალები: ცეოლიტები, გამომწვარი თიხები, კერამიკული აგურის ლეწი, კვარცის ქვიშა და ა. შ.

ნ. ეროშკინას კვლევების შედეგად შემუშავებულია რიგი გეოპოლიმერული მჭიდებისა თერმულად დამუშავებული მაგმური ქანების (გრანიტი, დაციტი, ბაზალტი და სხვა) საფუძველზე [18 – 20].

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ალექსანდრე თვალჭრელიძის სახელობის მინერალური ნედლეულის კავკასიის ინსტიტუტი მიმდინარეობს კვლევები გეოპოლიმერული მჭიდების მისაღებად ადგილობრივი ნედლეულის საფუძველზე, რისთვისაც გამოყენებულ იქნა რუსთავის მეტალურგიული ქარხნის ბრძმედის ნაყარი წიდეები, ციხისუბნის (გურია) ტრაქიტი და მდინარე დურუჯის ხეობის (კახეთი) ფიქლები [21, 22]. ამ შედეგების მიხედვით, გეოპოლიმერული მჭიდების მიღება შესაძლებელია ადგილობრივი ბუნებრივი ნედლეულისა და ტექნოგენური მასალების საფუძველზე. შემუშავებულია ტემპერატურული რეჟიმი მეტაკაოლინის მისაღებად თიხური ფიქლების კალცინირების (თერმული დამუშავება) გზით [23].

როგორც ცნობილია, მეტაკაოლინი საუკეთესო მასალაა გეოპოლიმერების მისაღებად და ასევე ის წარმოადგენს საუკეთესო პუცოლანურ დანამატს ცემენტის / ბეტონისათვის [24].

მეტაკაოლინის მონაწილეობით გეოპოლიმერული მჭიდას მიღების პროცესების თანმიმდევრობა ტუტეების ზემოქმედებით შემდეგნაირად გამოიყურება: ტუტე არეში ხდება ალუმოსილიკატური კომპონენტების ფრაგმენტაცია და წარმოიქმნება ალუმინატური და დაბალპოლიმერული სილიკატური ანიონები, რომელთაგან Si-O-Al-O-Si კავშირების მეშვეობით წარმოიქმნება სამგანზომილებიანი პოლიმერული კარკასი (ალუმოსილიკატური ჰიდროგელი). მის შემადგენლობაში შედიან ტუტე კათიონები, რომლებიც AlO_4 ტეტრაედრების მიერ SiO_4 ტეტრაედრებში ჩანერგვის შედეგად წარმოქმნილ უარყოფითი მუხტის კომპენსაციას ახდენენ. ალუმინის მონაწილეობა გეოპოლიმერული კარკასის წარმოქმნაში განაპირობებს დადებითი მუხტის დეფიციტს, რაც კომპენსირდება ტუტე კათიონების შესვლით კარკასის სტრუქტურაში [25]. ამის შედეგად ტუტე კათიონები მჭიდროდ ებმებიან ალუმოსილიკატურ კარკასში და მასალა იძენს მაღალ წყალმედევობას და მედეგობას გამოტუტვისადმი.

როგორც ჩანს, ალუმოსილიკატური მასალების გახსნა ტუტე არეში და სილიციუმისა და ალუმინის ანიონების გადასვლა თხევად ფაზაში წარმოადგენს გეოპოლიმერული მასალების გამყარების კინეტიკის მალიმიტირებელ სტადიას. ამიტომ რაც უფრო აქტიურია ალუმოსილიკატური კომპონენტი, მით უფრო მაღალი სიმტკიცის გეოპოლიმერული მასალა მიიღება. კაოლინითან შედარებით, მისი გამოწვის პროდუქტი – მეტაკაოლინი უფრო აქტიურად გამოყოფს ტუტე ხსნარში სილიციუმისა და ალუმინის ანიონებს [26].

მეტაკაოლინის ფართო გამოყენებას სამშენებლო მასალების წარმოებაში ხელს უშლის კაოლინიტის და კაოლინური თიხების შეზღუდული მარაგები მსოფლიოს ბევრ ქვეყანაში და, მათ შორის, საქართველოში. ბოლო დროს მიმდინარეობს კვლევები მეტაკაოლინის მისაღებად თერმულად აქტივირებული პოლიმინერალური თიხებისა და თიხური ფიქლების გამოყენების მიმართულებით [23, 27 – 29].

2. ძირითადი ნაწილი

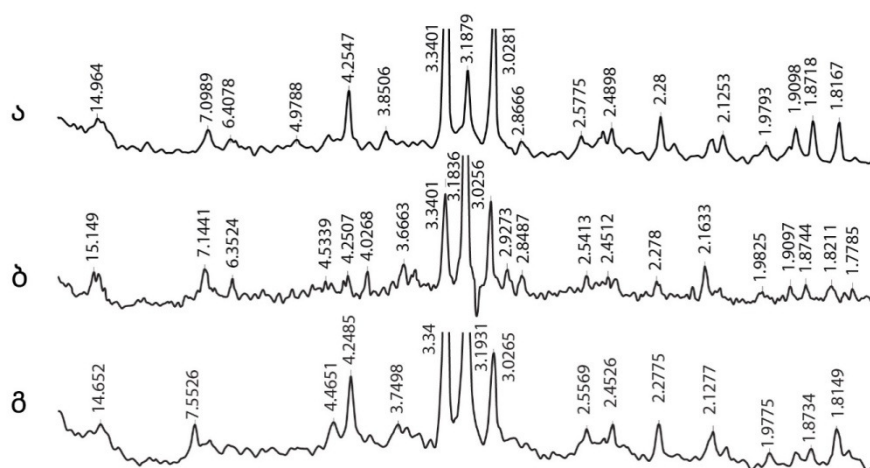
წინამდებარე სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს საქართველოს თიხოვანი ქანების თერმული მოდიფიცირებით მიღებული მასალების საფუძველზე დამზადებული

გეოპოლიმერული მჭიდების მიღების ტექნოლოგიის შემუშავება, რისთვისაც გამოყენებულ იქნა ადგილობრივი თიხოვანი ქანები: თიხური ფიქალი, არგილიტი და ადვილადღობადი თიხა.

ცხრილი 1. თიხოვანი ქანების ქიმიური შემადგენლობები (მასური %).

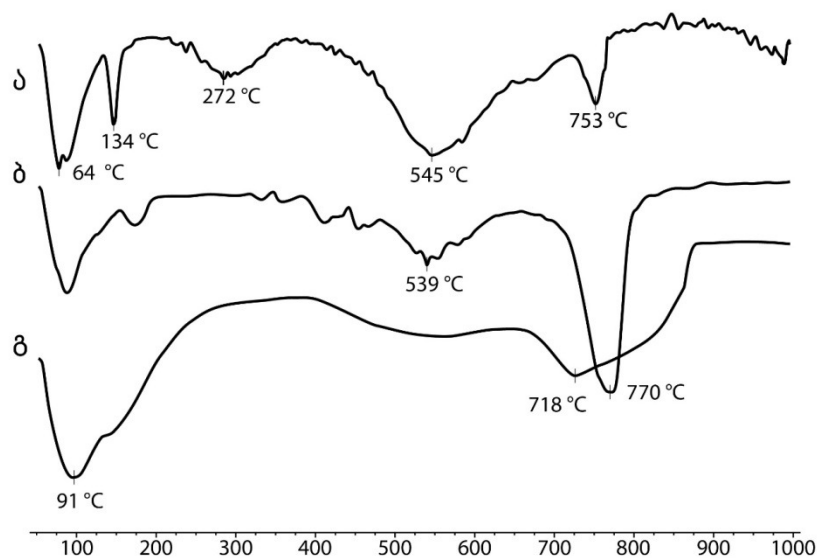
#	ხურებითი დანაკარგი	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Mn ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
1	4.50	59.95	0.89	17.30	3.45	3.65	0.59	1.53	2.43	0.30	2.20	2.20
2	7.01	47.19	–	15.90	13.36	–	0.10	6.30	4.10	1.39	2.86	1.30
3	10.60	52.84	–	15.07	6.47	–	–	7.06	2.49	1.36	1.19	2.17

ცხრილში 1 მოყვანილია თიხოვანი ქანების ქიმიური შემადგენლობები. # 1 – თიხური ფიქალი (ყვარელი), # 2 – არგილიტი (თელეთი) და # 3 – თიხა (გარდაბანი). მათ რენტგენოგრამებზე (სურათი 1) ფიქსირდება თიხური მინერალები (14.66 – 14.96, 7.14, 4.25, 3.66, 2.86, 2.327), კვარცი (3.34), მინდვრის შპატები (3.87) და კარბონატი (3.03 Å).



სურათი 1. თიხოვანი ქანების რენტგენოგრამები:

ა – ფიქალი, ბ – არგილიტი და გ – თიხა.



სურათი 2. თიხოვანი ქანების DTG მრუდები:

ა – ფიქალი, ბ – არგილიტი და გ – თიხა.

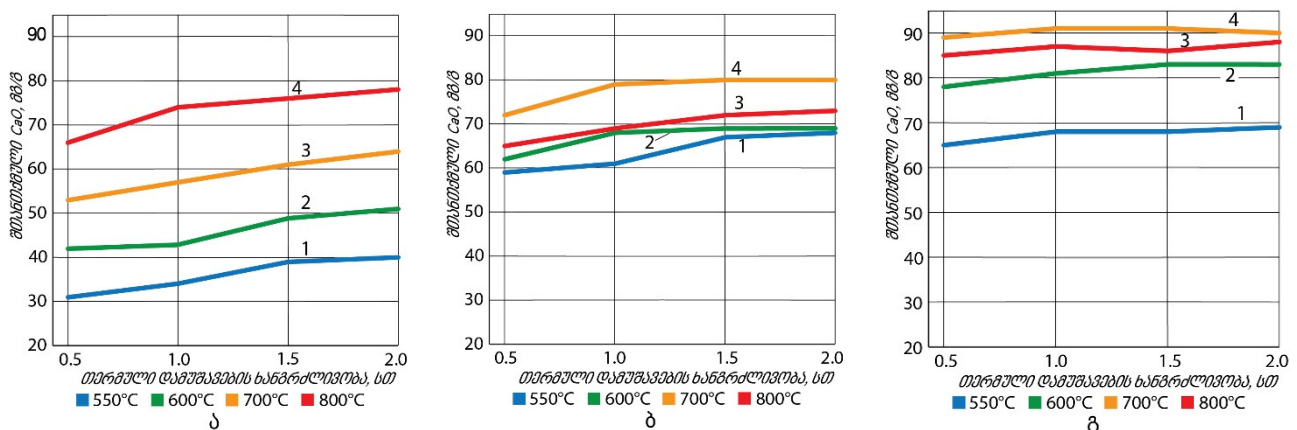
თიხოვანი ქანების მოდიფიცირების ტემპერატურული ინტერვალის დასადგენად ჩატარდა თერმოგრაფიმეტრული ანალიზი (DTG). შედეგების მიხედვით (სურათი 2), ენდოფექტი 100 – 150 °C ტემპერატურულ ინტერვალში ყველა მრუდზე ფიქსირდება, რაც მექანიკურად ბმული წყლის დაკარგვას უკავშირდება. 650 – 850°C ინტერვალში კი გამოიკვეთება ენდოფექტი, რომელიც, სავარაუდოდ, უკავშირდება თიხური მინერალების კრისტალური მესერის დაშლას და მათ გადასვლას აქტიურ ამორფულ ფაზაში (მეტაკაოლინის წარმოქმნა). აქედან გამომდინარე, შეირჩა ქანების თერმული დამუშავების ტემპერატურად 700 °C.

შემდგომი კვლევები მიმართული იყო მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების პუცოლანური აქტიურობის დასადგენად. პუცოლანური აქტიურობა – ეს არის ამორფიზებული კაჟმიწაშემცველი ბუნებრივი ან ხელოვნური მასალების უნარი, შეეხება $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -ს და წარმოქმნას მდგრადი ჰიდრატული ფაზები. რაოდენობრივად ის გამოიხატება 1 გ ნივთიერების მიერ შთანთქმული CaO -ით მგ-ებში.

თერმულად დამუშავებული თიხური ქანების რექციისუნარიანობა CaO -ის მიმართ აიხსნება იმით, რომ 600 – 800 °C-ზე გახურების შედეგად თიხების ძირითადი კომპონენტი – ინერტული კაოლინიტი ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) კარგავს წყალს, ირღვევა მისი კრისტალური მესერი და იგი გარდაიქმნება აქტიურ კაოლინის ანჰიდრიდად – მეტაკაოლინად ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), რომელსაც ამორფული სტრუქტურა აქვს.

თერმულად დამუშავებული თიხოვანი ქანების პუცოლანური აქტიურობა განისაზღვრა გოსტ რ 56593-2015-ის (Mineral admixtures for concrete sand mortars. Test methods) სტანდარტით. მისი მოთხოვნების მიხედვით, დანამატი ითვლება მაღალი პუცოლანური თვისებების მქონედ, თუ ნაჯერი ხსნარიდან შთანთქმული CaO -ის რაოდენობა აღემატება 70 მგ/გ-ს, საშუალოდ – 30 – 70 მგ/გ და სუსტად – 30 მგ/გ-მდე.

გამოცდის შედეგების მიხედვით (სურათი 3), 700 °C-ზე 1 სთ დაყოვნებით დამუშავებულ ქანებს საკმაოდ მაღალი პუცოლანური აქტიურობა ახასიათებთ.



სურათი 3. მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანების მიერ ნაჯერი ხსნარიდან CaO -ის შთანთქმის კინეტიკა: ა – ფიქალი, ბ – არგილიტი და გ – თიხა.

ქანების თერმული დამუშავება (მოდიფიცირება) ჩატარდა მუფელის ღუმელში გახურების სიჩქარით 250 – 300 °C/სთ და 1 სთ დაყოვნებით მაქსიმალურ – 700 °C ტემპერატურაზე. გაცივება ხდებოდა ბუნებრივად – ოთახის ტემპერატურაზე.

გეოპოლიმერული მჭიდა კომპოზიტების მისაღებად გამოყენებულ იქნა ბრძმედის გრანულირებული წიდა და მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანები, რომლებიც დაიფქვა ლაბორატორიულ ბურთულებიან წისქვილში 1 სთ განმავლობაში დაფქვის

სიწმინდით 8000 – 9000 სმ²/გ-მდე. მიღებულ ნარევეს ემატებოდა ტუტე კომპონენტის ხსნარები: ნატრიუმის ტუტე NaOH), სოდა Na₂CO₃ ან თხევადი მინა Na₂O(SiO₂)_n ნორმალური კონსისტენციის ცომის მიღებამდე.

დაყალიბდა 2 × 2 × 2 სმ ზომის ნიმუშები, რომელთა ფორმიდან ამოღება მოხდა დაყალიბებიდან მესამე დღეს. ნაწილი ნიმუშებისა ინახებოდა ჰაერზე, ნაწილი – წყალში და ნაწილი – ჰაერტენიან გარემოში + 20 °C ტემპერატურაზე 28 დღელამის განმავლობაში.

ნაწილი ნიმუშებისა ფორმიდან ამოღების შემდეგ დაექვემდებარა თბოდამუშავებას შემდეგი რეჟიმით: 80 °C-ზე დაყოვნება 20 სთ განმავლობაში. გაგრილების შემდეგ კი გამოიცადა წნეხზე. გეოპოლიმერული მჭიდების შემადგენლობები და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ტესტირების შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 2.

ცხრილი 2. გეოპოლიმერული მჭიდების შემადგენლობები და ფიზიკურ-მექანიკური ტესტირების შედეგები.

#	შემადგენელი კომპონენტები, %		ტუტე კომპონენტი (მშრალი ნივთიერება) 100 %-ის ზემოთ, %	სიმტკიცე კუმშვაზე 28 დღელამის შემდეგ გამყარების პირობების მიხედვით, კგ/სმ ²			სიმტკიცე კუმშვაზე თბოდამუშავების შემდეგ, კგ/სმ ²
				ჰაერი	წყალი	ჰაერტენიანი	
1	წიდა (80)	* ფიქალი (20)	NaOH (10)	410	452	440	690
2	წიდა (80)	* ფიქალი (20)	Na ₂ CO ₃ (10)	210	245	240	537
3	წიდა (80)	* ფიქალი (20)	Na ₂ O(SiO ₂) _n (10)	187	334	212	488
4	წიდა (80)	* არგილიტი (20)	NaOH (10)	469	480	418	695
5	წიდა (80)	* არგილიტი (20)	Na ₂ CO ₃ (10)	335	420	390	685
6	წიდა (80)	* არგილიტი (20)	Na ₂ O(SiO ₂) _n (10)	536	472	450	856
7	წიდა (80)	* თიხა (20)	NaOH (10)	460	510	478	630
8	წიდა (80)	* თიხა (20)	Na ₂ CO ₃ (10)	175	223	217	575
9	წიდა (80)	* თიხა (20)	Na ₂ O(SiO ₂) _n (10)	75	88	85	150
10	წიდა (80)	* თიხა (20)	NaOH (4) + Na ₂ CO ₃ (6)	215	254	230	266
11	წიდა (80)	* თიხა (20)	NaOH (4) + Na ₂ O(SiO ₂) _n (10)	850	940	935	1025
12	წიდა (80)	* თიხა (20)	Na ₂ CO ₃ (4) + Na ₂ O(SiO ₂) _n (10)	112	145	156	320

* 700 °C-ზე მოდიფიცირებული თიხოვანი ქანები.

როგორც ტესტირების შედეგებიდან ჩანს (ცხრილი 2), ნიმუშების (80 °C-ის პირობებში 20 სთ ხანგრძლივობით) თბოდამუშავების შედეგად გეოპოლიმერული მჭიდების მექანიკური სიმტკიცე საგრძნობლად მატულობს, ნორმალურ პირობებში გამყარებულ მჭიდებთან შედარებით. განსაკუთრებით აღსანიშნავია # 11 – ნიმუში წიდას და თიხის საფუძველზე, რომელშიც ტუტე კომპონენტად გამოყენებულ იქნა ნატრიუმის ტუტისა და თხევადი მინის ნარევი (სიმტკიცე – 1025 კგ/სმ²).

ეს გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ თბოდამუშავება აჩქარებს გეოპოლიმერიზაციისა და ჰიდრატაციის პროცესებს. გარდა ამისა, ტემპერატურის აწევა ხელს უწყობს კალციუმის ჰიდროსილიკატის გელის გარდაქმნას კრისტალურ ფაზად. კერძოდ, Si⁴⁺, Al³⁺ და Ca²⁺ იონების ხსნადობა იზრდება ტემპერატურის მატებასთან ერთად, და, შესაბამისად, პუცოლანური და გეოპოლიმერული რეაქტივების სიჩქარეც მატულობს, რაც სიმტკიცის გაზრდას განაპირობებს [30].

3. დასკვნა

კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

1. გეოპოლიმერული მჭიდა მასალების მიღება შესაძლებელია 700 °C-ზე თერმულად მოდიფიცირებული ადგილობრივი თიხოვანი ქანების საფუძველზე.
2. ტუტე კომპონენტად შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას როგორც ნატრიუმის ტუტის, ასევე – სოდისა და თხევადი მინის ხსნარები ან მათი კომბინაცია.
3. გეოპოლიმერული მჭიდების (80 °C-ის პირობებში 20 სთ ხანგრძლივობით) თბოდამუშავების შედეგად მათი მექანიკური სიმტკიცე საგრძნობლად მატულობს.
4. თბოდამუშავების შემდეგ აღარ არის საჭირო მჭიდის ნიმუშების 28 დღელამით დაყოვნება, როგორც ამას გამყარების ნორმალური პირობები გულისხმობს.

მადლიერება

კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით (საგრანტო პროექტი # FR-18-783).

დამოწმებანი

- [1] J. Davidovits. Soft mineralurgy and geopolymers. In: Proceeding of the Geopolymer 88th International Conference, 1988, Compiegne, Universite de Technologie, 49-56.
- [2] J. Davidovits. Carbon-dioxide greenhouse-warming: What future for portland cement. In: Proceedings of the Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment, 1993, Chicago, Portland Cement Association, 1-21.
- [3] A. Palomo, A. Marcias, M. T. Blanco, F. Puertas, M. W. Grutzeck, M. T. Blanco. Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers. In: Proceedings of the 9th International Conference on the Chemistry of Cements, 1992, 505-511.
- [4] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S. Bhattacharyya. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. Constr. Build. Mater., 2015, 85, 78-90.
- [5] R. A. Robayo-Salazar, J. Mejia, R. Mejia de Gutierrez. Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. J. Clean. Prod., 2017, 166, 242-252.
- [6] P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer. Geopolymer technology: The current state of the art. J. Mater. Sci., 2007, 42, 2917-2933.
- [7] В. Д. Глуховский, В. А. Пахомов. Шлакощелочные цементы и бетоны, 1978, Киев, Будівельник.
- [8] В. Д. Глуховский, П. В. Кривенко, Г. В. Румына, В. Л. Герасимчук. Производство бетонов и конструкций на основе шлакощелочных вяжущих, 1988, Киев, Будівельник.
- [9] W. Hongling, L. Haihong, Y. Fengyuan. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. Colloids & Surfaces A, 2005, 268, 1/2/3, 1-6.

- [10] O. Bortnovsky, Z. Sobalik, Z. Tvaruzka, J. Dedecce, Z. Prudkova, M. Svoboda. Structure and stability of geopolymers synthesized from kaolinitic and shale residues. In: Proceedings of the World Congress Geopolymer, 2005, Saint-Quentin, 81-84.
- [11] A. Buchwald, H. Hilbig, C. Kaps. Alkali-activated metakaolin-slag blends – Performance and structure in dependence on their composition. Mater. Sci., 2007, 42, 9, 3024-3032.
- [12] M. Luz Granizo, S. Alonso, M. T. Blanco-Varela, A. Palomo. Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction. J. Am. Ceram. Soc., 2004, 85, 1, 225-231.
- [13] A. Palomo, M. W. Grutzeck, M. T. Blanco. Alkali-activated fly ash cement for future. Cement & Concrete Res., 1999, 29, 8, 1323-1329.
- [14] В. И. Калашников. Глиношлаковые строительные материалы, 2000, Пенза, Издательство Пензенского Государственного университета архитектуры и строительства.
- [15] Р. З. Рахимов, Н. Р. Хабибуллина, М. М. Рахимов. Бетоны на основе композиционных шлакощелочных вяжущих. Строительные материалы, 2005, 8, 16-17.
- [16] Н. Р. Рахимова. Использование доменных шлаков и боя керамического кирпича в производстве шлакощелочных вяжущих. Экология и промышленность России, 2008, 4, 10-12.
- [17] Н. Р. Рахимова. Влияние вида и содержания цеолитсодержащих добавок на прочность камня композиционных шлакощелочных вяжущих с содовым затворителем. Вестник Томского ГАСУ, 2007, 2 (15), 191-198.
- [18] Н. А. Ерошкина. Исследование вяжущих, полученных при щелочной активизации магматических горных пород. Строительство и реконструкция, 2011, 1 (33), 61-64.
- [19] Н. А. Ерошкина, В. И. Калашников, М. О. Коровкин. Вяжущее, полученное из магматических горных пород с добавкой шлака, и бетон на его основе. Региональная архитектура и строительство, 2011, 2, 62-65.
- [20] Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов, 2014, Пенза, Издательство Пензенского Государственного университета архитектуры и строительства.
- [21] ე. შავაკიძე, მ. ნადირაშვილი, ვ. მაისურაძე, ი. გეჯაძე, ე. ხუჭუა, თ. პეტრიაშვილი. ახალი სახის მჭიდების – გეოპოლიმერების მიღების შესაძლებლობის კვლევა ბრძმედის ნაყარი წილის და ბუნებრივი ქანის საფუძველზე. საქართველოს მეცნ. ეროვ. აკად. მაცნე (ქიმიის სერ.), 2016, 42, 2, 206-211.
- [22] ე. შავაკიძე, მ. ნადირაშვილი, ვ. მაისურაძე, ი. გეჯაძე, მ. ავალიანი, თ. პეტრიაშვილი, გ. თოდრაძე, ე. ხუჭუა. გეოპოლიმერული მჭიდების მიღება კალცინირებული თიხური ფიქლების საფუძველზე. საქართველოს კერამიკოსთა ასოც. ჟურნ. „კერამიკა და მოწინავე ტექნოლოგიები“, 2018, 20, 2 (40), 31-38.
- [23] E. Shapakidze, M. Nadirashvili, V. Maisuradze, I. Gejadze, T. Petriashvili, M. Avaliani, G. Todradze. Elaboration of optimal mode for heat treatment of shales for obtaining metakaolin. Eur. Chem. Bull., 2019, 8, 1, 31-33.
- [24] K. Srinivasu, M. L. N. Krishna Sai, N. A. Venkata Sairam Kumar. Review on use of metakaolin in cement mortar and concrete. Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol., 2014, 3, 7, 14697-14701.

- [25] В. И. Корнеев, А. С. Брыков. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ: Геополимеры и их отличительные особенности. Цемент и его применение, 2010, Март / Апрель, 51-55.
- [26] Ch. Panagiotopoulou, E. Kontori, Th. Perraki, G. Kakali. Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. J. Mater. Sci., 2007, 42, 2967-2973.
- [27] А. Р. Гайфуллин, Р. З. Рахимов, Н. Р. Рахимова. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня. Инженерно-строительный журнал, 2015, 7, 66-73.
- [28] E. Shapakidze, R. Skhvitaridze, I. Gejadze, V. Maisuradze, M. Nadirashvili, E. Khuchua. Study of alluvium shales (Falling rocks of Caucasian ridge generated as a result of sill-mudflows) as a pozzolanic additive for cement. J. Georgian Ceram. Ass. "Ceramics", 2016, 1 (35), 1-5.
- [29] A. Sarukhanishvili, R. Skhvitaridze, E. Shapakidze, M. Kapanadze, T. Loladze, D. Eristavi, M. Mshvildadze, I. Giorgadze, Sh. Verulava. Innovative solution of utilization of the clay slates accumulated in the gorge of the river Duruji. IBSU J. Tech. Sci. Technol., 2016, 5, 2, 27-32.
- [30] P. C. Hewlett. Lea's Chemistry of Cement Concrete, 1998, New York, John Wiley & Sons.