

კონსტრუქციული მასალების დეფორმაციის ფიზიკურ- ქიმიური მიქანიკა ზედაპირულად-აქტიურ გარემოში

მ.ლორთქიფანიძე

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ზედაპირულად-აქტიურ გარემოში (ზაგ) მოთავსებული კონსტრუქციული მასალების (ძირითადად ბეტონის) დეფორმაციების განვითარების კინეტიკის თავისებურებების შესწავლა. ასეთი სახის კვლევები აუცილებელია (მომავალი გამოყენებითი კვლევის სტადიაზე) ამ მასალების საექსპლუატაციო მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად.

აღწერილია სპეციალურად კონსტრუქციული მასალებისათვის ამ მოვლენის დაწვრილებითი შესწავლა წარმოადგენილი თვალსაზრისის გათვალისწინებით. ამგვარი კვლევები საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ მოცემული ფუნქციის პარამეტრები, რომლებიც აღწერენ მასალის შად-ის დროში სვლის დამოკიდებულებას დეფორმირებული სხეულის გარე მახასიათებლებთან (მაგ. მათი ზომები, ზედაპირის მდგომარეობა და სხვა). ამ დამოკიდებულებების ცოდნა საშუალებას მოგვცემს წინასწარ განვსაზღვროთ კონკრეტულ ობიექტებში შად-ის დროში სვლა, რაც თავის მხრივ, მოგვცემს მისი გამოყენების შესაძლებლობას მომავალ გამოყენებით კვლევებში, რომლებიც მიმართულნი იქნებიან ანგარიშის დაზუსტებისკენ, ზაგ-ში კონსტრუქციების მუშაობისას, შად-ის განვითარებისთვის საკმარისი დატვირთვის პირობებში (მაგ. მიღშადნების მაღალი წნევის მიღებისთვის, ქვაბულების და სხვა ანგარიშებისთვის).

მყარი ტანის შეუქცევადი ცოცვადობის მოვლენა ზედაპირულად აქტიურ გარემოში, წარმოადგენს დაძაბული მდგომარეობის უნიკალურ ინსტრუმენტს კრიტიკულამდე ბზარის წარმოქმნისა და განვითარების კვლევის დროს.

ამ მოვლენის შემდგომმა კვლევებმა შესაძლებელია დიდი დახმარება გაუწიოს დაძაბული კონსტრუქციების უეცარი კატასტროფული რღვევების ბუნებისა და მექანიზმების გაგებაში.

მყარი ტანის სითხის ან აირწარმომქმნელთა გარემომცველ გარემოსთან ურთიერთობათა მრავალმხრივ სახეებს შორის რეზინდერის ეფექტს განსაკუთრებული ადგილი უკავია. ზოგიერთ შემთხვევაში ძნელია ზუსტად განისაზღვროს ზღვარი, რომელიც განასხვავებს მოვლენების ამ ჯგუფს სხვებისგან, რთულია მისი სუფთა სახით გამოყოფა გარემოს ჯამური მოქმედებისაგან. “რეზინდერის ეფექტი” უნდა გავიგოთ როგორც მოვლენათა ჯგუფი გარემომცველი გარემოს გავლენისა მყარი ტანის მექანიკურ თვისებებზე, რომელიც გამოიხატება მყარი ტანის გარემომცველ გარემოსთან ფაზათშორისო საზღვარზე თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის შემცირებაში [1,2].

პრეზინდერის მიერ ახალი მოვლენის აღმოჩენა, ეხება ზედაპირულად აქტიურ გარემოს გავლენას მყარი ტანის მექანიკურ თვისებებზე. რუსეთის, უკრაინის, აშშ, გერმანიის, საფრანგეთის და სხვა ქვეყნების მრავალ ლაბორატორიაში დაგროვდა უამრავი მასალა ამ მოვლენის კანონზომიერებაზე, მექანიზმებზე და ბუნებაზე [3-6]. ამ სამუშაოებმა აჩვენეს რეზინდერის ეფექტის ფართო გავრცელება ბუნებასა და ტექნიკაში. ამ ფაქტის რიგმა სპეციფიკურმა თავისებურებებმა განაპირობეს ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების დანერგვა მრეწველობაში. მაგალითად, მასალების მექანიკური დამუშავებისას, მთის ქანების ბურღვისას, წვრილად დაფქვისას, მექანიზმების დეტალების დაცვაში მათი ნაადრევი რღვევისაგან. გამოვლენილი იყო ეფექტის მნიშვნელოვანი როლი მეტალების დაღლილობით რღვევისას, ხახუნისა და ცვეთისას და გეოლოგიური პროცესის მიმდინარეობისას და სხვა. შესაძლებელი გახდა მრავალმხრივი და მრავალრიცხოვანი მონაცემების მიღება მყარი ტანის ქცევაზე ზედაპირულად აქტიურ შენადნობებთან, ხსნარებთან და აირებთან კონტაქტის დროს. დადგინდა რეზინდერის ეფექტის საერთო თერმოდინამიკური ბუნება და კინეტიკური

თავისებურებები, რომლებიც შეიძლება გამოვლინდნენ განსაზღვრულ პირობებში ნებისმიერი შედგენილობის და სტრუქტურის მყარ ტანებში – მეტალებსა და შენადნობებში, კოვალენტური, იონური ან მოლეკულური ბმებისას, ერთგვაროვან და ფოროვან ტანებში, პოლი და მონო კრისტალურ პოლიმერებში და მინებში [7-11].

მყარ ტანში სიმტკიცის კლება და სიმყიფის ზრდა შესწავლილია მრავალ სისტემაში: მეტალურ მონო და პოლიკრისტალებში, რომლებიც იმყოფებიან კონტაქტში ან დაფერილნი არიან ზედაპირიდან ადვილადღნობად თხევად მეტალებთან, მეტალის თხელი ფენით; კოვალენტურ კრისტალებთან – გერმანიუმში, დაფერილნი ოქროს ან სხვა მეტალების ფენით; იონურ მონო– და პოლიკრისტალებთან – მარილების, ოქსიდების, ჰიდროქსიდების; მთის ქანებთან, რომლებიც წყალთან არიან კონტაქტში, ზედაპირულად აქტიური წყლის ნარევებით და ელექტროლიტებით, იონური შენადნობებით, გრაფიტთან; ორგანული შენაერთების მონო და პოლიკრისტალებთან (ნაფტალინი, ანტრაციდი და სხვა) კონტაქტში მყოფი სხვადასხვა პოლიმერულ ორგანულ სითხეებთან და მათ წყლის ნარევებთან; თერმოპლასტიკურ პოლიმერებთან.

ამასთან ერთად ვაკვირდებით შემდეგ სურათს; იმ მყიფე მასალებს რომელთა რღვევა ხდება დენადობის ზღვრის მიღწევამდე, ზედაპირულად აქტიურ გარემოში მივყავართ მყიფე რღვევამდე ნაკლები ძაბვისა და დეფორმაციისას. ამასთან დრეკადობის მოდელი, ანუ კუთხე კოორდინატებში “ძაბვა-დეფორმაცია” პრაქტიკულად არ იცვლება. ყველა შესწავლილ შემთხვევაში ადგილი ჰქონდა გრიფიტის თანაფარდობას, ანუ სიმტკიცე იყო პროპორციული ფაზათაშორისი ენერჯის სიდიდის კვადრატული ფესვისა

$$\sigma = a\sqrt{G\gamma c}, \quad (1)$$

სადაც G – დრეკადობის მოდულია; c – ახლადწარმოქმნილი მრღვევი ბზარის ზომა; a – უგანზომილებო მამრავლი, $a \approx 1$.

დრეკად-პლასტიკური მასალების რღვევა ხდება ნაკლები ძაბვისა და დეფორმაციებისას. აქტიური გარემოსთან კონტაქტის შედეგად ზედაპირული ენერჯის მნიშვნელოვანი შემცირებისას ისინი ხდებიან მყიფეები და დაბალსიმტკიცეები. პლასტიკურ არეში (1) გარდაიქმნება

$$\sigma' = a'\sqrt{G\gamma^* + c}, \quad (2)$$

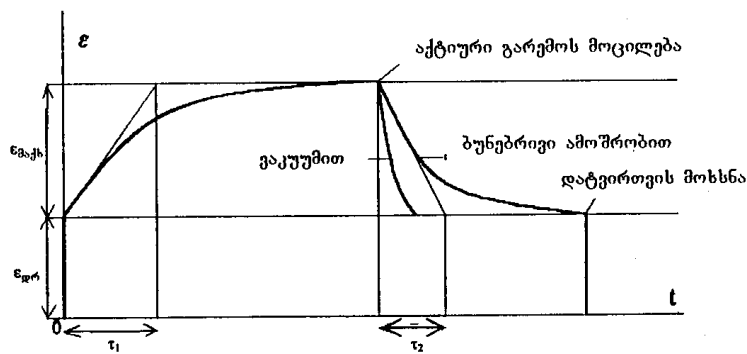
სადაც γ^* – ახალი ზედაპირის შექმნაზე და პლასტიკურ დეფორმაციებზე დახარჯული მუშაობა, ანუ “ეფექტური” ზედაპირული ენერჯია, რომელიც ჩვეულებრივ ერთი-ორჯერ მეტია ჭეშმარიტზე.

სხვა შესაძლო მექანიზმი წარმოადგინეს ჩარლზმა და ჰილინგმა, როდესაც ისინი იკვლევდნენ წყლის გავლენას მინის სიმტკიცეზე. მათ წარმოადგინეს დებულება, რომლის მიხედვითაც გარემოს მოქმედება კოროზიული ხასიათისაა. ამ მექანიზმს საფუძვლად უდევს ბზარის წვერის შესაძლო გახსნა (ძაბვების კონცენტრაციის გამო ძლიერი გადაძაბვა), რომელსაც აქვს ზედმეტი ქიმიური პოტენციალი და ამის გამო მაღალი ხსნადობა, და ამით ხსნიდნენ მეტალის სიმყიფეს მასზე მეტალური შენადნობების მოქმედებების დროს. მაგრამ შემდგომ თვით ამ იდეის ავტორებმა უარი განაცხადეს ამ წარმოდგენაზე. ბერნშტეინმა თავის ნაშრომში დამაჯერებლად აჩვენა, რომ მინაში ენერჯის აქტივაციის შემცირება ხდება მასში ბმების ჰიდროლიზური გახლეჩის შედეგად. ამ შემთხვევაში შეიძლება საუბარი ძაბვის მექანიკური მოქმედებისას ქიმიური რეაქციების აჩქარებისა და ქიმიური ბმების მექანიკური რღვევის გაიოლებაზე, ქიმიური რეაქციების მოქმედების ეკვივალენტობაზე (ფიზიკურ-ქიმიური ურთიერთქმედება).

ბოლო დროს უპირატესობა ეძლევა ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოქმედებისას ბზარის განვითარების ისეთ მექანიზმს, რომელიც მოლეკულური დინამიკის მოქმედებით კომპიუტერულად გათვლების ჩატარების საშუალებას იძლევა, ასეთი გათვლები ჩატარებული იქნა შჩუკინისა და იუშჩენკოს მიერ ბრტყელი ორგანზომილებიანი მოდელისათვის. მათ ნათლად უჩვენეს ვირტუალურ მყარ სხეულებში კავშირების რღვევის შესუსტება და შემსუბუქება ზედაპირულად აქტიური ატომის მონაწილეობისას [12].

მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს ის, რომ ზოგიერთი მასალის დასაშვები ამტანუნარიანობის კვლევისას მათი დატვირთვის შემდეგ, დრეკად დეფორმაციასთან ერთად, თანდათან ვითარდება დროში მიღევადი შენელებული არაწრფივი შექცევადი დეფორმაცია (შად) [13-15]. განსაკუთრებით დაწვრილებით ეს მოვლენა შესწავლილია ბეტონის მაგალითზე, რომელიც დეფორმირდებოდა ნორმალურ თბოტენიან პირობებში. ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, რომ ეს შად-ი გამოწვეულია მხოლოდ ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოქმედებით და აქვს შექცევადი ხასიათი, რომელიც გამოიხატება დამატებითი დეფორმაციის მთლიანად დაბრუნებით ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოცილების შემდეგ. სხვადასხვა შედგენილობის და სტრუქტურის მასალებზე (ბეტონი, ტუფი, თაბაშირი, მინა, ორგანული მინა, რეზინა, ნაფტალინი) ჩატარებულმა კვლევებმა გვიჩვენა, რომ ასეთი შექცევადი ცოცვადობის დეფორმაცია საერთო ხასიათისაა და ეს მოვლენა შეიძლება განვიხილოთ როგორც რეზინდერის ეფექტის ახალი ფორმა.

ნახაზზე მოცემულია ამ მოვლენის სახასიათო მრუდი.



- ედრ – დროში უცვლელი დრეკადი დეფორმაცია ზედაპირულად აქტიური გარემოს გარეშე;
- εმაქს – შად-ის მაქსიმალური დეფორმაცია ზედაპირულად აქტიურ გარემოში;
- τ1 – შად-ის რელაქსაციის პერიოდი ზაგ-ში;
- τ2 – უკუქცევის დეფორმაციის რელაქსაციის პერიოდი ზაგ-ის მოშორებისას

მყარი ტანებისა და მასალების მიღევადი შექცევადი არაწრფივი დეფორმაციების მრავალწლიანმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა ამ მოვლენის ფუნდამენტური ხასიათი, რაც გამოიხატება შემდეგში:

1. ამ მოვლენის წარმოქმნა და განვითარება მხოლოდ მყარი ტანისა და ზედაპირულად აქტიური გარემოს (თხევადი, ან აირის სახით, რომლებიც უზრუნველყოფენ ადსორბციის, ხემოსორბციის ან დასველების შედეგად მყარი ტანის თავისუფალი ზედაპირული ენერჯიის შემცირებას) უშუალო კონტაქტის პირობებში.
2. პროცესის შექცევადობა, რომელიც გამოიხატება მუდმივი დატვირთვის დროს შექცევადი არაწრფივი დეფორმაციის (შად-ის) თანდათანობით გაქრობაში ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოცილების შესაბამისად.

ჩვენს მიერ წამოყენებული და აღმოჩენილი მოვლენა მიღწეადი შად-ის შესახებ წარმოადგენს რეზინდერის ეფექტის ახალ ფორმას.

ზედაპირულად აქტიურ გარემოში მყოფი მასალის შექცევადი არაწრფივი დეფორმაციის კვლევის შედეგების ასახსნელად აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ პროცესის შემდეგი ძირითადი გამოსავალი მახასიათებლები, რომლებიც საერთოა კვლევის ყველა შემთხვევაში.

1. ნიშნის დატვირთვისას ზედაპირულად აქტიური გარემოს არ არსებობის პირობებში 0,5-0,8 ზღვრული სიმტკიცის ტოლი ძაბვით მყისიერად ვლენულობთ ჭეშმარიტ დრეკად დეფორმაციას, რომელიც მთლიანად შექცევადია, ხოლო თვით დეფორმაცია არ ვითარდება დროში.

2. ზედაპირულად აქტიური გარემოს შეყვანისთანავე იწყება და ვითარდება შად, რომელიც მიღწეადია დროში და ზაგ-ის მოცილებით მთლიანად შექცევადია.

3. შად-ის განვითარების კინეტიკა დროში მარტივი მიახლოებით აღიწერება ექსპონენციალური ფუნქციით ექსპონენტის მაჩვენებლით, რომელიც ტოლია მიმდინარე ჩატარებული ცდის დროის ფარდობის ერთგვარ დროის პარამეტრის მახასიათებელთან "რელაქსაციის პერიოდთან". ზოგიერთ შემთხვევაში პროცესის დასაწყისში ცოცვადობა ვითარდება უფრო სწრაფად, ვიდრე პროცესის ბოლოს. ეს თავისებურება შეიძლება აღწერილ იქნას ორი ექსპონენტის ჯამით, სადაც მეორეს აქვს მეტი რელაქსაციის პერიოდი.

4. შექცევადი ცოცვადობის უკუქცევის კინეტიკა ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოცილებისას, ისევე როგორც ცოცვადობისას ახლოა ექსპონენტისთან. ამ შემთხვევაში გამოსაკვლევი მასალის თვისებების აღდგენის სიჩქარე დამოკიდებულია ზედაპირულად აქტიური გარემოს მოცილების ინტენსივობასთან (ბუნებრივი გამრობა, ვაკუუმით და სხვ.).

5. მაღალი დატვირთვების შემთხვევაში, როდესაც ეს დატვირთვები უახლოვდება სიმტკიცის ზღვარს, შად-თან ერთად ვითარდება აგრეთვე ჩვეულებრივი შეუქცევადი ცოცვადობა, რომელიც არ ქრება გარემოს მოცილების შედეგად, ის მით მეტია, რაც მეტია მოდებული ძაბვა.

პროცესის ფიზიკური მოდელის აღწერისას, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ შად-ის მთელი დაგროვილი შექცევადი ცოცვადობის დეფორმაცია უზრუნველყოფილია ჩანასახოვანი ბზარების (გრიფიტის) წარმოქმნითა და კრიტიკულ ზომამდე განვითარებით, მათდამი შეიძლება მიყენებულ იქნას ჩანასახწარმოქმნის თერმოდინამიკური თეორია.

აღნიშნული თეორიის თანახმად, იმ დაძაბულობის დროს, (ჭარბი თავისუფალი ენერგია), რომლებიც უფრო მცირეა, ვიდრე ბზარების ზგეური ზრდის შესაბამისი დაძაბულობა (ახალი ფაზა), ხდება კრიტიკულზე მცირე ჩანასახობრივი ბზარების (ახალი ფაზის ჩანასახები) ფლუქტუაციური წარმოშობა და თავისთავადი დახურვა. მაგრამ თუ ბზარების კედლებზე ხდება მოცემული მასალის მიმართ ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების აღსორბცია, მაშინ ბზარების უკუქცევა ძნელდება და კრიტიკულზე ნაკლები გარკვეული ზომის ბზარი სტაბილიზირდება და თანდათანობით იზრდება. ასეთი კრიტიკულზე მცირე ბზარის ზრდის სიჩქარე განისაზღვრება ორი გარემოებით: ბზარის წვეროში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების მოდინების სიჩქარით (ბლანტი დინება, ბზარის კედლებზე ზედაპირული დიფუზია, ან ბზარზე აირის გავრცელება კნუდსენის რეჟიმით), ანდა ბზარის წვეროზე კავშირების თერმოფლუქტუაციური წყვეტის კინეტიკით, რასაც, მაგალითად, ადგილი აქვს სილოქსანური კავშირების წყვეტისას წყლისა და მოდებული ძაბვის ერთდროული მოქმედების დროს [12].

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ზედაპირულად-აქტიურ გარემოში (ზაგ) მოთავსებული კონსტრუქციული მასალების (ძირითადად ბეტონის) დეფორმაციების განვითარების კინეტიკის

თავისებურებების შესწავლა. ასეთი სახის კვლევები აუცილებელია (მომავალი გამოყენებითი კვლევის სტადიაზე) ამ მასალების საექსპლუატაციო მახასიათებლების გასაუმჯობესებლად [16].

დაგეგმილია სპეციალურად კონსტრუქციული მასალებისათვის ამ მოვლენის დაწვრილებითი შესწავლა წარმოდგენილი თვალსაზრისის გათვალისწინებით. ამგვარი კვლევები საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ მოცემული ფუნქციის პარამეტრები, რომლებიც აღწერენ მასალის შად-ის დროში სვლის დამოკიდებულებას დეფორმირებული სხეულის გარე მახასიათებლებთან (მაგ. მათი ზომები, ზედაპირის მდგომარეობა და სხვა). ამ დამოკიდებულებების ცოდნა საშუალებას მოგვცემს წინასწარ განვსაზღვროთ კონკრეტულ ობიექტებში შად-ის დროში სვლა, რაც თავის მხრივ, მოგვცემს მისი გამოყენების შესაძლებლობას მომავალ გამოყენებით კვლევებში, რომლებიც მიმართულნი იქნებიან ანგარიშის დაზუსტებისკენ, ზაგ-ში კონსტრუქციების მუშაობისას, შად-ის განვითარებისთვის საკმარისი დატვირთვის პირობებში (მაგ. მილშადენების მაღალი წნევის მილებისთვის, ქვაბულების და სხვა ანგარიშებისთვის).

მყარი ტანის შეუქცევადი ცოცვადობის მოვლენა ზედაპირულად აქტიურ გარემოში, წარმოადგენს დაძაბული მდგომარეობის უნიკალურ ინსტრუმენტს კრიტიკულამდე ბზარის წარმოქმნისა და განვითარების კვლევის დროს.

ამ მოვლენის შემდგომმა კვლევებმა შესაძლებელია დიდი დახმარება გაუწიოს დაძაბული კონსტრუქციების უეცარი კატასტროფული რღვევების ბუნებისა და მექანიზმების გაგებაში.

ლიტერატურა

1. Ребиндер П.А. Избранные труды. Физико-химическая механика. М.: Наука. 1979.
2. Ребиндер П.А., Лихтман В.И., Горюнов Ю.В., Щукин Е.Д., Перцов Н.В., Кочанова Л.А., Брюханова Л.С. Явление понижения сопротивления пластическому деформированию и самопроизвольного диспергирования. Диплом на открытие №28. Открытия в СССР. 1964.
3. Перцов Н.В., Щукин Е.Д. Физико-химическое влияние среды на процессы деформации, разрушения и обработки твердых тел//Физ. и хим. обработка мат. 1970. Т.2;60; Щукин Е.Д., Перцов Н.В. Там же. 1978. Т.14. №5.
4. Conciatori D., Brühwiler E. Water adsorption in concrete at low temperature. 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. 11-13 September. Canada. 2006.
5. Castro-Gomes J.P., Pereira de Oliveira L.A. and Gonilho-Pereira C.N. Discussion of Aggregate and Concrete Water Absorption and Permeability Testing Methodology. XXX IAHS World Congress on Housing Housing Construction – An Interdisciplinary Task. September 9-13. 2002. Coimbra. Portugal.
6. Bažant Z.P. Thermodynamics of hendered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete. Cement and concrete research. V.2. Pergamon Press. 1972.
7. Charles R.I., Hillig W.B. Symposium Proceedings/ Union Scientifique Continentale du Verre. Charcroi. Belgium. 1962.
- 8.Траскин В.Ю., Перцов Н.В., Коган Б.С. Влияние воды на механические свойства и дисперсную структуру горных пород/В кн.: Вода в дисперсных системах. М.: Наука. 1989.
9. Glickman E. A MONOGRAPH "Reversible Temper Brittleness in Iron Based Alloys & Steels", Moscow. 1987.
10. Nathan M., Glickman E., Khenner M., Averbuch A.and Israeli M. Electromigration Drift Velocity in Cu Interconnects Modeled with the Level Set Method. 77, 3355-3357. 2000.
11. E. Glickman, Stress, Surface Energy and Segregation Effects in Liquid Metal Embrittlement: Role of Grain Boundary Grooving and Local Plasticity, Defect and Diffusion Forum, 2003.
12. Щукин Е.Д., Ющенко В.С. Физ-хим. мех. мат. 1966. Т.2.

13. Балавадзе В.К. Новое о прочности и деформативности бетона и железобетона. Тбилиси: Мецниереба. 1986.
14. Лордкиპანიძე М.М. Прочностные и деформативные характеристики бетона с позиций адсорбционной теории о природе его ползучести//Бетон и железобетон. 1992. №12.
15. Lordkipanidze M. Phenomen of Delayed Reversible Deformation (Inverse Creep) of Solids in Surface-Active Media. Steel-3 in Gas Hydrogen. ISSN 1061-933K. Colloid Journal. 2006. V.68. N2.
16. Motsonelidze A., Lordkipanidze M. Mathematical Model of Adsorption Theory of Concrete Collection. Physicotechnical Problems in Mining Production. №4. ISBN 966-02-2693-4. 2011.

მამრავ ლორთქიფანიძე, ტექნ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
E-mail: tami@dsl.ge