

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

თამარ ჯიბლაძე

ფსევდოპროტეინული საკვები საფარით აგროპროდუქტების  
პრეზერვაციისას მიმდინარე პროცესების ქიმიზმის კვლევა

სადოქტორო პროგრამა- ქიმია

შიფრი- 0531

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2024

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის ქიმიის დეპარტამენტში  
პალერმოს უნივერსიტეტის  
სოფლის მეურნეობის, სურსათისა და სატყეო მეცნიერებების დეპარტამენტში

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: აკადემიკოსი რამაზ ქაცარავა  
ასოც. პროფესორი თამარ ფალავანდიშვილი

რეცენზენტები: -----  
-----

დაცვა შედგება ----- წლის "-----" -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და  
მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის  
სხდომაზე,  
კორპუსი -----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 69

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში, ხოლო  
ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი -----

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალურობა და გამოყენების სფერო. კვება ყოველი ცოცხალი ორგანიზმის არსებობის უპირველესი პირობაა და განაპირობებს მის ჯანმრთელობას და შრომისუნარიანობას. კვების ინდუსტრიაში წამყვან როლს სოფლის მეურნეობა ასრულებს, რომლის განვითარების დონეზეა დამოკიდებული მოსახლეობის უზრუნველყოფა კვების ძირითადი პროდუქტებით, აგრეთვე მრეწველობის სხვადასხვა დარგის მომარაგება ნედლეულის საჭირო რაოდენობით, რომელიც დამუშავებული სახით მიეწოდება მომხმარებელს. სოფლის მეურნეობის პროდუქტების ხანგრძლივი შენახვა დიდი მნიშვნელობის ამოცანაა, მაგრამ მისი პრაქტიკული განხორციელება, პროდუქტების სამეურნეო, ტექნოლოგიური და სასურსათო თვისებების მაქსიმალური შენარჩუნებით, წონისა და ხარისხის დანაკარგების გარეშე, მეტად დიდ სიძნელესთან არის დაკავშირებული. აღნიშნული გარემოება განპირობებულია იმით, რომ მცენარეული პროდუქტები, როგორც ბიოლოგიური ობიექტი, წყლის მაღალი შემცველობის გამო, მეტად არამდგრადია შინაგანი და გარეგანი ფაქტორების მიმართ, რომელთა ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული სხვადასხვა სახის გარდაქმნა მნიშვნელოვნად აუარესებს პროდუქციის სასაქონლო თვისებებს და საგრძნობლად ადიდებს დანაკარგების საერთო რაოდენობას. ამით უნდა აიხსნას ის რომ, მეცნიერებისა და ტექნიკის უპრეცედენტო წინსვლის მიუხედავად, თანამედროვე ეტაპზე მსოფლიო მასშტაბით სოფლის მეურნეობის პროდუქტების დანაკარგები მნიშვნელოვნად მაღალია და თუ დღესდღეობით, მიუხედავად მიწათმოქმედების მაღალი კულტურისა, მთელი რიგი ქვეყნებისა განიცდის სურსათის დიდ ნაკლოვანებას, იგი გარკვეულწილად უნდა აიხსნას სოფლის მეურნეობის პროდუქტების შენახვის ორგანიზაციაში არსებული ნაკლოვანებებით. მალფუჭებადი პროდუქტების შენახვის ახალი სრულყოფილი ტექნოლოგიის დამუშავების საჭიროებამ განაპირობა სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალურობა. კვებისა და სოფლის მეურნეობის პროდუქტების საერთაშორისო ორგანიზაციის (FAO) მონაცემებით, დღეს მილიარდზე მეტი ადამიანი შიმშილობს, მაშინ როცა ყოველწლიურად 1.3 მილიარდი ტონა სურსათი ქრება და ვერ აღწევს მომხმარებლამდე. ამასთან, მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ ნედლეულის ღირსება

მხოლოდ ერთ-ერთი ფაქტორია მაღალხარისხოვანი კვების პროდუქტების მიღებისათვის. ნედლეულის ღირსება შეიძლება სავსებით გაუარესდეს მისი ალების, ტრანსპორტირების, სასაქონლო დამუშავების, შენახვისა და გადამუშავების დადგენილი ტექნოლოგიური წესების უგულვებელყოფის, დარღვევის ან არასრულფასოვნების შედეგად. მაღალხარისხოვანი ნედლეულის ხარისხი შეიძლება იმდენად გაუარესდეს, რომ იგი გამოუყენებელი გახდეს, როგორც შენახვის, ასევე ტექნიკური გადამუშავებისათვის. სასოფლო-სამეურნეო ნედლეულისა და პროდუქტების სასაქონლო დამუშავების ცალკეული პროცესის ჩატარება რაციონალური ტექნოლოგიური რეჟიმის მიხედვით უზრუნველყოფს ნედლეულის საწყისი თვისებების მაქსიმალურად შენარჩუნებას, პროდუქტების მიღებას მაღალი კვებითი და საგემოვნო მაჩვენებლებით. ნედლეულის პირველადი დამუშავების, შენახვისა და გადამუშავების ტექნიკური დონე მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავს ქვეყნის ეკონომიკურ მაჩვენებლებს.

ახალი ხილისა და ბოსტნეულის შეფუთვა მწარმოებლიდან მომხმარებლამდე გზის გასავლელად ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ნაბიჯია. ამისათვის გამოიყენება სხვადასხვა მასალისაგან დამზადებული ჩანთები, ყუთები, სამაგრები, კალათები, მუყაო, თხელი საფარი აფსკები. საკვების შეფუთვის მრავალი ფორმა არსებობს. მოწინავე შესაფუთი მასალები და ტექნოლოგიები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ მოსავლის ხარისხის შესანარჩუნებლად. ამჟამად, სწორედ მალფუჭებადი პროდუქტებისთვის შენახვის ახალ ფორმას წარმოადგენს საკვები საფარი აფსკები. ტრადიციული მეთოდები, როგორცაა დაკონსერვება, გაყინვა, შრობა, ვაკუუმირება, ქაფით ან ცვილით დაფარვა მოიცავს მთელ რიგ უარყოფით მომენტებს, ამიტომ ისინი ჩაანაცვლა ინოვაციურმა მიდგომებმა, რომლებიც ზოგადად მდგომარეობს პროდუქტების დაფარვაში თხელი პოლიმერული საფარით, რომელიც აკონტროლებს წყლისა და გაზების დიფუზიას, ხელს უშლის ბაქტერიებით და სხვა მიკროორგანიზმებით პროდუქტების ზედაპირის კოლონიზაციას, ასევე ვიტამინ C-ს და სხვა სასარგებლო კონპონენტების შემცველობის დაქვეითებას.

**სამუშაოს მიზანი და ძირითადი ამოცანები.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს:

- აგროპროდუქტების (ვაშლი, სტაფილო, ბანანი) შენახვის ვადის გახანგრძლივება ფსევდოპროტეინული საკვები საფარი აფსკით;

- შენახვის ოპტიმალური პირობების დადგენა ექსპერიმენტების მათემატიკური დაგეგმვის გზით.
- ექსტერიმენტულ მონაცემთა მნიშვნელობების სტატისტიკური ანალიზი (ANOVA) Minitab 2.1.0.0 პროგრამული უზრუნველყოფით;
- მასკანერებელი ელექტრონული მიკროსკოპით ფსევდოპროტეინული საკვები საფარის სისქის დადგენა.

კვლევა მოიცავს შემდეგ ამოცანებს:

**ამოცანა 1.** ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვის გზით შენახვის პროცესის ოპტიმალური პირობების შესწავლისათვის ფსევდოპროტეინის სხვადასხვა კონცენტრაციის სპირტხსნარების დამზადება საკვები საფარებისათვის.

**ამოცანა 2.** საკვლევი ნიმუშების (ვაშლი, სტაფილო) საკვები საფარით დაფარვა, შრობა და შენახვა.

**ამოცანა 3.** საკვლევი ნიმუშების საოპტიმიზაციო პარამეტრების (წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, სატიტრავი მჟავიანობა, ნედლი უჯრედანა, პექტინოვანი ნივთიერებები) შესწავლა.

I ეტაპი: საკვლევი პარამეტრების შესწავლა ექსპერიმენტებით.

II ეტაპი: საკვები საფარის სისქის დადგენა მასკანერებელი მიკროსკოპითა და ემპირიული მეთოდით.

III ეტაპი: ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვის მეთოდით ვაშლისა და სტაფილოს მიღებული მოდელების გამოყენებით ბანანის შენახვის გახანგრძლივება ფსევდოპროტეინული საკვები საფარით.

**ამოცანა 4.** კვლევის შედეგების ანალიზი, შეჯამება, სამუშაოს აპრობაცია.

I ეტაპი: ექსტერიმენტულ მონაცემთა მნიშვნელობების სტატისტიკური ანალიზი (ANOVA) Minitab 2.1.0.0 პროგრამული უზრუნველყოფით და შეჯამება.

II ეტაპი: სამუშაოს აპრობაცია კონფერენციებსა და სემინარებზე.

III ეტაპი: სტატიების გამოქვეყნება.

**კვლევის მეცნიერული სიახლე.** წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომის მეცნიერული სიახლეა საკვებ საფარ მასალად ბიოდეგრადირებადი, ბიოთავსებადი ეკოლოგიურად სუფთა (eco-friendly) ბიომიმეტიკის ფსევდოპროტეინის გამოყენება და მათემატიკური დაგეგმვის გზით აგროპროდუქტების შენახვის ოპტიმალური პირობების დადგენა (რაც საშუალებას იძლევა მცირე რაოდენობის

ცდების საფუძველზე შევისწავლოთ და დავადგინოთ საფარის ოპტიმალური კონცენტრაცია, შენახვის ტემპერატურა და შენახვის დრო).

საკვები საფარები იყოფა ძირითადად სამ ტიპად მათი ელემენტების ბუნების გათვალისწინებით, როგორცაა ჰიდროკოლოიდები ან ბუნებრივი ფისები (პროტეინები, პოლისაქარიდები, ალგინატები), ლიპიდები (ცხიმოვანი მჟავები, აცილგლიცეროლები, ცვილები) და მათი ნარევები. საკვებ საფარ მასალებს უნდა გააჩნდეთ მკაფიო ბარიერი - ფიზიკურ-ქიმიური და მექანიკური მახასიათებლები ატმოსფერული აირების წინააღმდეგ. საკვები საფარი უნდა მოქმედებდეს როგორც ბარიერი სხვადასხვა ატმოსფერული გაზების, ტენიანობის ან წყლის ორთქლის, ჟანგბადის, ნახშირორჟანგის, მიკროორგანიზმების წინააღმდეგ, ხელს უნდა უწყობდეს საკვების სუნთქვასა და ჟანგვის რეაქციის სიჩქარის შემცირებას. დღეს უკვე ცნობილია, რომ ზემოთ ხსენებული სამი შემადგენელიდან, დამოუკიდებლად არცერთს არ შეუძლია უზრუნველყოს საჭირო დაცვა და ამიტომ ისინი ჩვეულებრივ გამოიყენება კომბინაციაში საუკეთესო შედეგების მისაღწევად. შესაბამისად, დღესდღეობით, საფარების უმეტესობა შედგება ერთზე მეტი მასალისაგან, დაბალმოლეკულურ ნაერთებთან ერთად, რომელიც მუშაობს როგორც პლასტიფიკატორი და აქტიური აგენტი - ბაქტერიციდი, ანტიოქსიდანტი, საკვები ღირებულების და სხვ. აგენტი, რათა უზრუნველყოს საკვები საფარის უფრო სრულყოფილი თვისებები. ჩვენს მიერ, საკვებ საფარად გამოყენებულია ერთკომპონენიანი (ფსევდოპროტეინის სპირტხსნარი) მარტივი სისტემა.

ფსევდოპროტეინებს ლიტერატურაში აღწერილ საკვებ საფარებთან შედარებით გააჩნიათ შემდეგი ღირსებები:

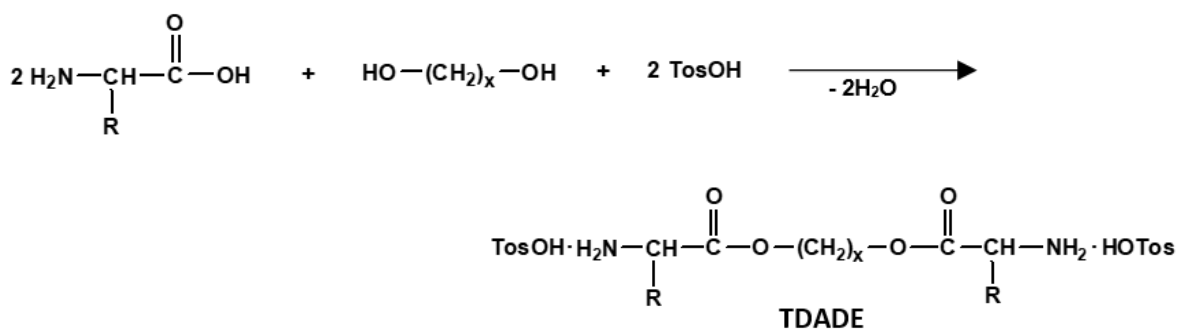
- იხსნებიან ეთანოლში ოთახის ტემპერატურაზე და მიღებული ხსნარები შესაძლებელია გამოვიყენოთ ორგანული პროდუქტების დასაფარად;
- ამოვლების მეთოდით აგროპროდუქტების დაფარვიდან რამდენიმე წუთში სპირტი ორთქლედება და მიიღება თხელი პოლიმერული საკვები საფარი;
- ამოვლების პროცესში სპირტი ასრულებს მადეზინფიცირებელ ფუნქციას - ანადგურებს პროდუქტის დამაზიანებელ მიკროორგანიზმებს; ამ ფუნქციის მართვა შესაძლებელია ამოვლების დროის ვარირებით;

- ფსევდოპროტეინული საფარი არის სინთეზური წარმოშობის, რაც განსხვავებით ბუნებრივი წარმოშობის პოლიმერებისაგან გამოირჩევა შესაძლო მიკრობულ/ვირუსულ კონტამინაციას;
- აფერხებს პროდუქტის ზედაპირზე მიკროორგანიზმების ინვაზიას;
- გამოირჩევა დაბალი მიდრეკილებით ზედაპირის მიკროორგანიზმებით კოლონიზაციისადმი;
- აქვს მაღალი მექანიკური სიმტკიცე (იუნგის მოდული 1-2 GPa!), რაც პროდუქტების უთხელესი აფსკით დაფარვის შესაძლებლობას იძლევა;
- ახასიათებს ძლიერი ადჰეზია მრავალი ზედაპირისადმი - როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული;
- აფსკებს გააჩნიათ შესაფუთი მასალებისათვის აუცილებელი მაღალი რესპირაციის უნარი, რაც დადასტურებულია მედიცინაში, ჭრილობის საფარი/სამკურნალო აფსკის სახით მათი გამოყენებისას;
- არის ჰიდროფობური (წყალგამძლე), რაც გამოირჩევა მის ნესტით ან ორთქლით ჩამორეცხვას;
- არის ერთკომპონენიანი, მარტივი სისტემა, თუმცა ეთანოლში ხსნადობა საშუალებას იძლევა, საჭიროების შემთხვევაში, გამოვიყენოთ მრავალი დანამატი საფარის შემდგომი მოდერნიზაციისათვის;
- განიცდის დაშლას ჰიდროლაზების კლასის ფერმენტების ფართო სპექტრით (პროტეაზები, აცილაზები, ესტერაზები, ლიპაზები და სხვ.)  $\alpha$ -ამინომჟავების გამოყოფით, რაც განაპირობებს მათ ცილისმაგვარ საკვებ უნარს. სხვაგვარად, არ არის აუცილებელი საფარის წინასწარ მოშორება პროდუქტის ზედაპირიდან - ისე იგი დაიშლება ორგანიზმში.

ფირის სახით ჩამოსხმული ფსევდოპროტეინი მყარ მდგომარეობაში მოგვეწოდა მწარმოებლისაგან Polymer Solution, LLC.

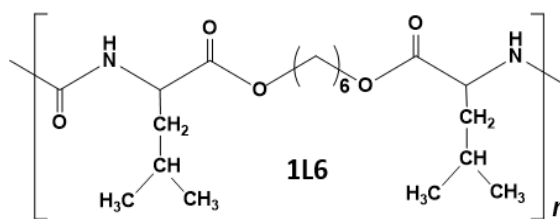
ფსევდოპროტეინების (PP) ოჯახი შემუშავდა აკადემიკოს რ. ქაცარავასა და თანამშრომლების მიერ. ფსევდოპროტეინები მიიღება საკვანძო მონომერების - ბის-ნუკლეოფილების -  $\alpha, \alpha'$ -დიამინოდიესტერები (DADE) (ურთიერთქმედებით სავადასხვა, კომერციულად ხელმისაწვდომ ბის-ელექტროფილებთან (დი-პ-ტოლუოლსულფონატები). საკვანძო მონომერები მიიღება ტოლუოლსულფომჟავას (T) მარილების სახით. ამიტომ მათ აღვნიშნავთ და შემდგომში მოვიხსენიებთ

TDADე სახელით. პოლიმერების სინთეზის მეთოდად გამოიყენება ინდუსტრიული თვალსაზრისით მარტივი და რაციონალური პოლიკონდენსაცია ფაზათა გაყოფის ზედაპირზე. TDADე მონომერები მიიღება (ნახაზი 1) მაღალი გამოსავლიანობით (95%-მდე). პროცესი არის მარტივი და ეკოლოგიურად სუფთა (eco-friendly). TDADე საფუძველზე შემუშავებულია სამი კლასის ფსევდოპროტეინი: პოლიესტერამიდები, პოლიესტერურათანები და პოლიესტერმარდოვანები.



**ნახაზი 1.** საკვანძო TDADე მონომერების სინთეზი და სტრუქტურა

წინამდებარე კვლევაში გამოყენებულია პოლიესტერმარდოვანა (PEU) ეტიკეტირებული, როგორც 1L6~8L6 (ერთ-ერთი ყველაზე იაფი თანაპოლიმერული ფსევდოპროტეინი, მიღებული ამინოჟავა ლეიცინის (R = CH<sub>2</sub>CH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), 1,6-ჰექსანდიოლის (x = 6), ცხიმოვანი და ნახშირბადის მჟავების საფუძველზე). მიზნობრივი PEU 1L6 (ნახაზი 2) მიიღება TDADე-ს ურთიერთქმედებით ტრიფოსფენთან (ნახაზი 1).



**ნახაზი 2.** პოლიესტერმარდოვანა 1L6-ს სტრუქტურა

ფსევდოპროტეინების ჰიდროლიზური დეგრადაცია მიმდინარეობს საკვები α-ამინომჟავების და არატოქსიკური პროდუქტების გამოთავისუფლებით. მაგალითად, პოლიესტერმარდოვანას ჰიდროლიზური დაშლისას გამოიყოფა ნეიტრალური დეგრადაციის პროდუქტები.



**კვლევის საგანი და მეთოდები.** დისერტაციის ფარგლებში ჩატარებული კვლევის ობიექტებია ფსევდოპროტეინით დაფარული აგროპროდუქტები, კერძოდ ვაშლი, სტაფილო და ბანანი. დასმული ამოცანების გადასაწყვეტად და დასახული მიზნების მისაღწევად დამუშავებულია ქართველ და უცხოელ მეცნიერთა შრომები.

საკვლევი ნიმუშების შექმნისას და ლაბორატორიაში ფიზიკურ-ქიმიური კვლევის (სრულდება ქიმიური რეაქტივებისა და აპარატურის გამოყენებით) პროგრამის შედგენისას გათვალისწინებულია კვლევის ძირითადი ამოცანები, ანალიზის ჩასატარებლად საჭირო მეთოდები, განსასაზღვრი მახასიათებლების (პარამეტრების) ჩამონათვალი, სიზუსტის სასურველი დონე. ასევე გავითვალისწინეთ საკვლევი ნიმუშების მოყვანის ადგილმდებარეობა, მოსავლის პერიოდი და პერიოდულობა, საკვლევი ნიმუშების შენახვის პირობები, კვლევის ჩასატარებლად საჭირო ხელმისაწვდომი მოწყობილობები. საკვლევ ნიმუშებს ვინახავდით შესაბამისი პირობების დაცვით.

კვლევის ფარგლებში აგროპროდუქტების საკვლევ ნიმუშებში ხარისხის განსაზღვრის დადგენის მიზნით ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდით შესწავლილია შემდეგი მახასიათებლები: წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (Brix) (%), სატიტრავი მჟავიანობა (%), შაქარმჟავას ინდექსი, ნედლი უჯრედანა (%), პექტინოვან ნივთიერებათა შემცველობა (%), ხსნარში წყალბადის იონების აქტივობა (pH), წონითი დანაკარგები (%) და საფარის სისქე (მკმ).

გამოსაკვლევი ნიმუშების ფიზიკურ-ქიმიური კვლევა ძირითადად ჩატარდა საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტის ლაბორატორიებში, ასევე პალერმოს უნივერსიტეტის (სოფლის მეურნეობის, სურსათისა და სატყეო მეცნიერებების დეპარტამენტი) და ნიუ ვიჟენის უნივერსიტეტის ლაბორატორიებში; შესაბამისად ექსპერიმენტის შესასრულებლად გამოყენებულია მათი მატერიალურ-ტექნიკური ბაზა.

წარმოდგენილი კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით, PHDF-23-3114 სადოქტორო გრანტის ფარგლებში.

კვლევის მეთოდებად გამოყენებულია შემდეგი აპრობირებული მეთოდები: წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერების განსაზღვრა - რეფრაქტომეტრული მეთოდი ISO 2173:2003 შესაბამისად; სატიტრავი მჟავიანობის განსაზღვრა ISO 750:1998-ის

შესაბამისად პოტენციომეტრული ანუ რეფერენტული მეთოდით; pH-ის განსაზღვრა - pH-მეტრით ISO 10523:2008 სტანდარტის შესაბამისად; ნედლი უჯრედანას განსაზღვრა - გენებერგ-შტომანის მეთოდი; პექტინოვან ნივთიერებათა განსაზღვრა - წონითი მეთოდი კალციუმის პექტატის სახით; წონითი დანაკარგები - წონითი სხვაობის მეთოდი ტექნიკური სასწორის გამოყენებით 0.001 სიზუსტით; საფარის სისქის დადგენა - მასკანერებელი ელექტრონული მიკროსკოპია (SEM) (ნიუ ვიჟენის უნივერსიტეტი); ექსპერიმენტების სწორი წარმართვისათვის - მათემატიკური დაგეგმვის მეთოდი. მიღებული შედეგების სტატისტიკური ანალიზი - Minitab.2.1.0.0 პროგრამული უზრუნველყოფით (ANOVA) (პალერმოს უნივერსიტეტი). გამოთვლილია სტანდარტული ცდომილება; სარწმუნოების კოეფიციენტი  $P \leq 0.05$ .

#### **ღებულებების, დასკვნებისა და პრაქტიკული რეკომენდაციების სარწმუნოობა.**

მიღებული შედეგების, ღებულებებისა და დასკვნების სარწმუნოობა დასტურდება ნაშრომში მოყვანილი ნახაზებით, სურათებით, ცხრილებით, დასახული ამოცანების გადასაწყვეტად საჭირო ექსპერიმენტების ჩატარებით, მიღებული შედეგების ანალიზით, მოწინავე ქვეყნების შესაბამის პროცესებთან შედარებითა და მსგავსებით.

**სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა.** ინოვაციური მეთოდით - ფსევდოპტორეინული საკვები საფარით აგროპროდუქტების (ხილი და ბოსტნეული) ან სხვა კომერციული ღირებულების ორგანული პროდუქტების დაფარვა/შეფუთვა შესაძლებელია დანერგილ იქნეს საქართველოს სოფლის მეურნეობასა და კვების სექტორში, რაც გააუმჯობესებს ორგანული პროდუქტების შენახვის ხანგრძლივობას და შეამცირებს ნარჩენებსა და დანაკარგებს, რაც თავის მხრივ მნიშვნელოვანია, როგორც ქვეყნის ეკონომიური, ასევე ეკოლოგიური თვალსაზრისით.

**სამუშაოს აპრობაცია.** დისერტაციის მასალები მოხსენიებული იყო სამ საერთაშორისო კონფერენციაზე:

1) თ. ჯიბლაძე, თ. ფალავანდიშვილი, რ. ქაცარავა. აგროპროდუქტების პრეზერვაცია პოლიმერული ბიომიმეტიკით: პროცესის მათემატიკური დაგეგმვა. აკადემიკოს გივი ცინცაძის დაბადებიდან 90 წლისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო - სამეცნიერო კონფერენცია „ქიმია - მიღწევები და პერსპექტივები“. ტექნიკური უნივერსიტეტი, თეზისების კრებული 2023. გვ. 191.

2) T. Jibladze, T. Palavandishvili, R. Katsarava. Use of pseudoproteins in the preservation of agricultural products. 6-Th International Conference of Young Scientists. "Chemistry, Agrochemistry and Biology: Modern Trends and Achievements" Dedicated to anniversary of David Sarajishvili. Abstract Book 2023. pp. 58.

3) თ. ჯიბლაძე, თ. ფალავანდიშვილი, რ. ქაცარავა. ბიოდეგრადირებადი პოლიმერების გამოყენება აგრარულ სფეროში. გარემოს დაცვისა და საინჟინრო ეკოლოგიის კათედრის დამაარსებლის ქიმის მეცნიერებათა დოქტორის პროფესორ ვიქტორ დიმიტრის ძე ერისთავის დაბადებიდან 85 წლის იუბილესადმი მიძღვნილი კონფერენცია "გარემოს დაცვა და მდგრადი განვითარება". 2024. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი.

**სადისერტაციო ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა.** სადისერტაციო ნაშრომი გაფორმებულია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის გაფორმების ინსტრუქციის შესაბამისად, მოიცავს 129 ნაბეჭდ გვერდს და შედგება შემდეგი ნაწილებისაგან: სატიტულო და ხელმოწერის გვერდები, რეზიუმე ქართულ და ინგლისურ ენებზე, შინაარსი, შესავალი, ლიტერატურის მიმოხილვა, კვლევის მეთოდები, შედეგები და შედეგების განსჯა, დასკვნა. ნაშრომი ასევე შეიცავს 16 ცხრილს, 18 ნახაზს, 18 სურათს და გამოყენებულ ლიტერატურას.

## სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

სადისერტაციო ნაშრომის შესავალში წარმოდგენილია კვლევის მიზანი და მეთოდები, მიმოხილულია კვლევის შედეგები. სადისერტაციო ნაშრომის პირველ თავში, რომელიც ეძღვნება ლიტერატურის მიმოხილვას, ლიტერატურულ წყაროებზე დაყრდნობით, განხილულია ფსევდოპროტეინები, მათი მიღების მეთოდები, ფსევდოპროტეინული საფარის დამზადებისა და აგროპროდუქტების საფარით დაფარვის მეთოდები. აგრეთვე დეტალურადაა აღწერილი ორგანული პროდუქტების შეფუთვის საშუალებები.

ნაშრომის მეორე თავში მოცემულია ინფორმაცია კვლევის ფარგლებში გამოყენებული აპრობირებული მეთოდებისა და შესაბამისი მატერიალურ ტექნიკური ბაზის შესახებ. ნაშრომის ექსპერიმენტული ნაწილი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, ნიუ ვიქენისა და პალერმოს (იტალია) უნივერსიტეტების მატერიალურ-ტექნიკური ბაზის გამოყენებით.

მესამე თავში წარმოდგენილია კვლევის ფარგლებში ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები და მათი განსჯა და დასკვნა.

## კვლევის შედეგები და განსჯა

### შენახვის ოპტიმალური პირობების დადგენა ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვის გზით

ჩვენს მიერ, საკვები საფარით დაფარული აგროპროდუქტების კვლევა დაიწყო 2022 წლის ოქტომბერში. ორგანოლექტიკური და ფიზიკურ-ქიმიური კვლევის მეთოდებით შევისწავლეთ ვაშლისა და სტაფილოს ბიოქიმიური ცვლილებები დინამიკაში. ჩატარებული ექსპერიმენტების მიზანია ხილისა და ბოსტნეულის შენახვის ოპტიმალური პირობების დადგენა ექსპერიმენტების მათემატიკური დაგეგმვის გზით.

კვლევის ობიექტებად შერჩეულია ვაშლის ჯიში „ზამთრის ბანანი“ და სტაფილოს ჯიში „ნანტი“, რომლებიც მგრძნობიარენი არიან შენახვის მიმართ.

ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვა მოიცავს: საოპტიმიზაციო პარამეტრისა და პროცესზე მოქმედი ფაქტორების შერჩევას; ასევე ცვლადების

ძირითადი დონისა და ვარირების ინტერვალის შერჩევას; მათემატიკური მოდელის მონახვასა და შემოწმებას ადექვატურობაზე.

ექსპერიმენტების მათემატიკური მეთოდით დაგეგმვის მიზნით შერჩეული იქნა საოპტიმიზაციო პარამეტრები (ვაშლისათვის - (Y) - წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (%), სატიტრავი მჟავიანობა (%), უჯრედისი (%), პექტინოვანი ნივთიერებები (%); სტაფილოსათვის - (Y) - წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (%), სატიტრავი მჟავიანობა (%), უჯრედისი (%) და მასზე მოქმედი ფაქტორები ( $X_1$  - ტემპერატურა °C,  $X_2$  - საკვები საფარის კონცენტრაცია, %,  $X_3$  - შენახვის დრო, კვირა).

საოპტიმიზაციო პარამეტრი, როგორც წესი, დამოკიდებულია მასზე მოქმედ ფაქტორებზე, რაც გამოისახება ტეილორის პოლინომით:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + b_{12}X_1X_2 + \dots + b_{(n-1)n}X_{n-1}X_n + b_{12}X_2^2 + \dots + b_{nm}X_n^2 \quad (1)$$

პოლინომში, რაც მეტია წევრთა რაოდენობა, იგი მით უფრო ზუსტად აღწერს პროცესს, მაგრამ ამ შემთხვევაში რთულდება განტოლების ამოხსნა, ამიტომ კმაყოფილებიან განტოლების წრფივი ნაწილით, რომელსაც ასეთი სახე აქვს:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + b_{12}X_1X_2 + \dots + b_{(n-1)n}X_{n-1}X_n \quad (2)$$

(2) განტოლება წარმოადგენს არასრულ კვადრატულ (რეგრესიის) განტოლებას. სიმბოლოები  $b_0, b_1, \dots, b_n$  ცალკეული ფაქტორების კოეფიციენტებია, ხოლო  $b_{12}, \dots, b_{(n-1)n}$  - ფაქტორების ერთდროული ზემოქმედების. მათი გამოთვლით და მე-2 განტოლებაში ჩასმით ვღებულობთ პროცესის მათემატიკურ მოდელს.

პროცესის მათემატიკური მოდელი, საშუალებას იძლევა, განისაზღვროს ფაქტორების გავლენა საოპტიმიზაციო პარამეტრებზე და მოიძებნოს პროცესის ოპტიმიზაციის გზა.

ჩვენს შემთხვევაში პროცესის მიმდინარეობაზე მოქმედი ფაქტორების რაოდენობაა  $k = 3$ . ექსპერიმენტების მათემატიკური დაგეგმისათვის ჩასატარებელი ცდების რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$N = 2^k = 2^3 = 8 \quad (3)$$

რამდენადაც საოპტიმიზაციო პარამეტრს ყოველ წერტილში აქვს შემთხვევითი ხასიათი, ყოველ წერტილში უნდა ჩატარდეს  $m$  პარალელური ცდა და პარალელური ექსპერიმენტების შედეგებიდან გამოვითვალოთ  $y$ -ის საშუალო მნიშვნელობა.

**ცხრილი 1.** ჩატარებული ცდების ძირითადი მახასიათებლები

ფაქტორები	$X_1, t^{\circ}C$	$X_2, C \%$	$X_3, დრო, კვირა$
ძირითადი დონე	4, 5	5	9
ვარიაციების ინტერვალი	4, 5	3	5
ზედა დონე	9	8	14
ქვედა დონე	0	2	4

**ცხრილი 2.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა ვაშლისთვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, %)

ცდის №	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$S_i^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	14
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	14.600	13.700	0.405
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	13.400	13.800	0.080
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	15.200	14.900	0.045
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	14.600	15.100	0.125
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	12.800	13.200	0.080
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	11.100	10.500	0.180
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	13.400	12.700	0.245
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	12.700	13.000	0.045

**ცხრილი 3.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა ვაშლისთვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - უჯრედისი, %)

ცდის №	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$S_i^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1.100	0.850	0.03125
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1.190	0.950	0.0288
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1.040	1.200	0.013
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1.050	0.880	0.014
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1.600	1.900	0.045
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1.780	2.100	0.051
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1.470	1.770	0.045
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1.600	1.700	0.005

**ცხრილი 4.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა ვაშლისთვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - პექტინოვანი ნივთიერება, %)

ცდის №	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	S <sub>i</sub> <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1.130	1.30	0,01445
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0.880	0.89	5E-05
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1.170	1.34	0.01445
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1.160	0.91	0.03125
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1.086	1.20	0.006498
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0.410	0.39	0.00020
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1.046	0.98	0.002178
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1.075	1.15	0.002813

**ცხრილი 5.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა ვაშლისთვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - ორგანული მჟავები, %)

ცდის №	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	S <sub>i</sub> <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0.39	0.45	0.00180
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0.35	0.30	0.00125
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0.43	0.47	0.00080
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0.43	0.39	0.00080
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0.29	0.32	0.00045
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0.19	0.21	0.00020
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0.42	0.40	0.00020
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0.418	0.39	0.000392

**ცხრილი 6.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა სტაფილოსათვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, %)

ცდის №	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	S <sub>i</sub> <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	11.00	11.7	0.2450
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	10.50	10.1	0.0800
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	11.00	10.6	0.0800
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	10.90	9.9	0.5000
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	9.50	8.7	0.3200
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	8.20	7.9	0.0450
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	10.75	9.8	0.4512
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	10.10	10.7	0.1800

**ცხრილი 7.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა სტაფილოსათვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - ორგანული მჟავები, %)

ცდის №	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	S <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0.1	0.095	0.0975
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0.08	0.076	0.0780
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0.136	0.129	0.1325
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0.13	0.135	0.1325
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0.09	0.085	0.0875
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0.039	0.042	0.0405
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0.12	0.127	0.1235
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0.09	0.084	0.0870

**ცხრილი 8.** ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა სტაფილოსათვის (საოპტიმიზაციო პარამეტრი - უჯრედისი, %)

ცდის №	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	S <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1.100	0.98	0.00720
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1.170	1.20	0.00045
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1.050	1.15	0.00500
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1.087	0.95	0.009385
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1.520	1.60	0.00320
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1.600	1.70	0.00500
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1.390	1.43	0.00080
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1.560	1.60	0.00080

ჩატარებული ცდების გეგმის ძირითადი მახასიათებლები მოცემულია **1-ელ ცხრილში**, ხოლო ექსპერიმენტის დაგეგმვის მატრიცა **2-8 ცხრილებში**. **1-ელ ცხრილში** წარმოდგენილი ძირითადი დონის პარამეტრები აღებულია წინასწარი სასინჯი ცდებით.

**ცხრილების (2-8)** 1-ელ სვეტში წარმოდგენილია ცდის ნომრები, ხოლო 2-9 სვეტებში - საოპტიმიზაციო პარამეტრებზე მოქმედი ფაქტორები და მათი ნამრავლები; ამ სვეტებში პროცესზე მოქმედი ფაქტორები შეტანილია კოდირებული ცვლადების სახით; +1 აღნიშნავს ზედა დონეს, ხოლო -1 ქვედა დონეს. მე-10 და მე-11 სვეტებში - ძირითადი და პარალელური ცდების შედეგებია (%); ბოლო მე-12 სვეტში კი საშუალო კვადრატული ცდომილებები პარალელურ ცდებში.



მათი რიცხვითი მნიშვნელობები გავიანგარიშეთ შემდეგი ფორმულით:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum (Y_{iu} - Y_i) \quad (4),$$

სადაც  $m$  პარალელური ცდების რაოდენობაა (10), გამოთვლილი ცდომილების მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილების მე-12 სვეტში.

იმის დასადგენად, არის თუ არა ყველა ცდაში ცდომილება დასაშვებ ზღვრებში, გამოვიყენეთ კოხრენის კრიტერიუმი, რომლის საანგარიშო მნიშვნელობა განისაზღვრება ტოლობით:

$$G_s = \frac{\max S_i^2}{\sum S_i^2} \quad (5),$$

სადაც,  $\max S_i^2$  ცდომილების მაქსიმალური მნიშვნელობაა, ხოლო  $\sum S_i^2$  არის მიღებული ცდომილებების ჯამი.

მიღებული რიცხვების შედარებამ კოხრენის კრიტერიუმის ცხრილურ მნიშვნელობასთან, გვიჩვენა, რომ დაცულია პირობა  $G_s < G_T$ , რაც იმას ნიშნავს, რომ ცდომილება დასაშვებ ზღვრებშია.

ამის შემდეგ გამოვთვალეთ, ყველა ცდის ცდომილება, რომელიც რეალიზებულია მატრიცაში:

$$S_{\{y_i\}}^2 = \frac{\sum S_i^2}{f} \quad (6)$$

შემდეგი ეტაპია პროცესის მათემატიკური მოდელის - რეგრესიის განტოლების მონახვა, რომელსაც ზოგადად ასეთი სახე აქვს:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_2 X_3 \quad (7)$$

სადაც  $b_0, b_1, b_2, b_3 \dots$  რეგრესიის განტოლების კოეფიციენტებია, რომლებიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum \bar{Y}_i \quad (8)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum X_{ji} \bar{Y}_i \quad (9)$$

სადაც  $X_{ji}$  - შესაბამისი ფაქტორის კოდური ცვლადებია.

ამის შემდეგ, უნდა შეფასდეს რომელი კოეფიციენტებია მნიშვნელოვანი და რომელი არა. შეფასება ხორციელდება სტიუდენტის კრიტერიუმით, რომლის საანგარიშო მნიშვნელობის გამოსათვლელად ვისარგებლეთ შემდეგი ფორმულებით:

$$S_{\{b_i\}}^2 = \frac{S_{\{y_i\}}^2}{Nm} \quad (10)$$

$$S_{\{b_i\}} = \sqrt{S_{\{b_i\}}^2} \quad (11)$$

სტიუდენტის კრიტერიუმის საანგარიშო მნიშვნელობები ყველა კოეფიციენტისათვის განისაზღვრა ფორმულით:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{\{b_i\}}} \quad (12)$$

( $|b_i|$  - კოეფიციენტების აბსოლუტური მნიშვნელობებია).

დანართის მიხედვით მოვძებნეთ სტიუდენტის კრიტერიუმის თეორიული მნიშვნელობა თავისუფლების ხარისხისათვის  $f = N(m - 1) = 8(2 - 1) = 8$ , რომელიც 99%-ანი რწმუნებით ტოლია 3.36. თუ დაცულია პირობა  $t_i > t_{\alpha}$ , კოეფიციენტი მნიშვნელოვანია. წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი უმნიშვნელოა და განტოლების შესაბამისი წევრი უნდა გამოირიცხოს.

პროცესის მათემატიკური დაგეგმვის ბოლო ეტაპია, მიღებული მოდელის შემოწმება ადექვატურობაზე. იგი ხორციელდება ფიშერის კრიტერიუმით. ამისათვის ჯერ ისაზღვრება ადექვატურობის ცდომილება (დისპერსია) ყველა ცდისათვის შემდეგი განტოლებით:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum(\bar{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{N-d} \quad (13)$$

სადაც  $d$  - მნიშვნელოვან კოეფიციენტთა რიცხვია, ხოლო  $\bar{Y}_i$  გამოითვლება რეგრესიის განტოლებით, მას შემდეგ რაც ჩაისმება  $X_1$ ,  $X_2$  და  $X_3$ -ის კოდირებული მნიშვნელობები დაგეგმვის მატრიცის შესაბამისი სტრიქონებიდან.

ფიშერის კრიტერიუმის საანგარიშო მნიშვნელობა გამოითვლება ფორმულით:

$$F_s = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{y_i\}}^2} \quad (14)$$

მიღებულ რიცხვს ვადარებთ ფიშერის კრიტერიუმის თეორიულ  $F_{\alpha}$ , რომელსაც ვპოულობთ თავისუფლების ხარისხისათვის  $F_1 = N - d$  და  $F_2 = N(m - 1)$  მიხედვით. თუ დაცულია პირობა  $F_s < F_{\alpha}$ , განტოლება ადექვატურად აღწერს პროცესს. ჩვენ შემთხვევაში ( $F_1 = 8 - 4 = 4$  და  $F_2 = 8(2 - 1) = 8$ ), ფიშერის კრიტერიუმის თეორიული მნიშვნელობა, 99%-იანი რწმუნებით ტოლია  $F_{\alpha} = 7.0$ . ვინაიდან ფიშერის კრიტერიუმის საანგარიშო მნიშვნელობები ნაკლებია თეორიულ

რიულზე ( $1.7 < 7.0$ ), შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ჩვენს მიერ მიღებული მათემატიკური მოდელები ადექვატურად აღწერს საკვლევ პროცესს.

რეგრესიის განტოლებების კოეფიციენტების გაანგარიშების საფუძველზე შემუშავებული იქნა ვაშლის შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელი, თითოეული პარამეტრისათვის (ცხრილი 9, 10):

**ცხრილი 9. ვაშლის შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელები**

წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, %	$Y = 13.418 - 0.39375X_1 + 0.53125X_2 - 0.99375X_3$	(15)
უჯრედისი, %	$y = 1.37375 + 0.34125X_3$	(16)
პექტინოვანი ნივთიერება, %	$Y = 1.0073125 - 0.14919X_1 + 0.096563X_2 - 0.09019X_3 + 0.119063X_1X_2 + 0.091563X_1X_2X_3$	(17)
ორგანული მჟავები, %	$Y = 0.3655 - 0.03075X_1 + 0.053X_2 - 0.03575X_3 + 0.02425X_2X_3$	(18)

**ცხრილი 10. სტაფილოს შენახვის პროცესის მათემატიკური მოდელები**

წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, %	$Y = 10.084375 - 0.62813X_3 + 0.496875X_2X_3$	(19)
ორგანული მჟავები, %	$Y = 0.097375 - 0.01288X_1 + 0.0215X_2 - 0.01275X_3 + 0.00375X_1X_2 - 0.008X_1X_3$	(20)
უჯრედისი, %	$Y = 1.3179375 + 0.232063X_3$	(21)

რეგრესიის განტოლების კოეფიციენტების შეფასებით სტიუდენტის კრიტერიუმით, დადგინდა თითოეული პარამეტრისათვის,  $X_1$ ,  $X_2$  და  $X_3$  ცვლადების კოეფიციენტები მნიშვნელოვანია, ყველა მათგანი ახდენს გავლენას საოპტიმიზაციო პარამეტრის ცვლილებაზე, ყველაზე მეტ გავლენას მოახდენს დრო და საკვები საფარის სისქე.

100 დღიანი (14.3 კვირა) შენახვის შემდეგ საკვები საფარით დაფარული და დაუფარავი ნიმუშების ორგანოლექტიკური მეთოდით შეფასებით (სურათი 1, 2) კარგად ჩანს, რომ ფსევდოპროტეინული საკვები საფარი უნარჩუნებს მათ გარეგნულ სახეს.



სურათი 1. დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული ვაშლის ნიმუშები



სურათი 2. დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული სტაფილოს ნიმუშები

კვლევის მომდევნო ეტაპზე პროცესის ოპტიმიზაცია განვახორციელეთ სწრაფი აღმასვლის მეთოდით, რომელიც მიზნად ისახავდა პირველ ეტაპზე მიღებული მათემატიკური მოდელების მიხედვით გაკეთებული დასკვნების საფუძველზე საოპტიმიზაციო პარამეტრებისა და მასზე მოქმედი ფაქტორების შერჩევას, განსაზღვრული ბიჯების დადგენას, ცდების დაგეგმვასა და ჩატარებას ოპტიმალური პირობების დასადგენად.

პროცესში მიმდინარე ბიოქიმიურ ცვლილებებზე დასაკვირვებლად შერჩეულ იქნა სამი პარამეტრი: წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება, სატიტრაჟი მჟავიანობა, ნედლი უჯრედანა. პროცესის ოპტიმიზაცია სწრაფი აღმასვლის მეთოდით საიმედო და შედარებით ადვილი გასახორციელებელია. ვაშლის და სტაფილოს ნიმუშებში სწრაფი აღმასვლის მეთოდისათვის საფუძვლად ავიღეთ, რეგრესიის განტოლება, რომლის საოპტიმიზაციო პარამეტრია სატიტრაჟი მჟავიანობა (განტოლებები 18, 20). ოპტიმუმისაკენ მოძრაობა განხორციელდა გარკვეული ბიჯებით, რომლებიც გამოითვლება ყველა პარამეტრისათვის ცალცალკე.

პირველ ეტაპზე, ყველა პარამეტრისათვის დადგენილია ბიჯები რეგრესიის კოეფიციენტისა და ვარირების ინტერვალის ნამრავლით:

ვაშლის საკვლევი ნიმუშისათვის ტემპერატურის შემთხვევაში მივიღეთ:

$$\varphi_1 = b_1 \Delta X_1 = -0.03 \cdot 4,5 = -0.135 \quad (22)$$

ანალოგიურად, კონცენტრაციისა და დროისათვის:

$$\varphi_2 = b_2 \Delta X_2 = 0.05 \cdot 3 = 0,15 \quad (23)$$

$$\varphi_3 = b_3 \Delta X_3 = -0.035 \cdot 5 = -0,178 \quad (24)$$

ამის შემდეგ საწყის პარამეტრად შევარჩიეთ დრო, რომლის  $\varphi_3 = -0,178$  (წესისამებრ, რომლის მნიშვნელობა ყველაზე მაღალი, ან ყველაზე დაბალია) და ამ პარამეტრისათვის ავირჩიეთ ბიჯი  $\Delta X_i^* = -1,78$  კვირა (დაახლოებით 12-13 დღე), რომლის ვარირება ტექნიკურად ადვილია. გათვალისწინებულია ის გარემოება, რომ როგორც წესი, ბიჯი ნაკლები უნდა იყოს ამ პარამეტრის ვარირების ინტერვალზე ( $-1,78 < 5$ ) და სასურველია იყოს ამავე პარამეტრის  $\varphi_i$ -ს ჯერადი.

სწორედ ამის შემდეგ დავიანგარიშეთ ფარდობა:

$$\beta = \frac{\Delta X_i^*}{\varphi_i} = \frac{-1,78}{-0,178} = 10 \quad (25)$$

დანარჩენი პარამეტრებისათვის ბიჯი დავიანგარიშეთ ფორმულით:

$$\Delta X_i^* = \beta \cdot \varphi_i = \beta \cdot b_i \cdot \Delta X_i \quad (26)$$

$$\text{ტემპერატურისათვის} - \Delta X_1^* = \beta \cdot \varphi_1 = 10 \cdot (-0,15) = -1,5 \quad (27)$$

$$\text{კონცენტრაციისათვის} - \Delta X_2^* = \beta \cdot \varphi_2 = 10 \cdot 0,178 = 1,78 \quad (28)$$

ვაშლისათვის პროცესის ოპტიმიზაცია განვახორციელებთ ფაქტორების ახალი ბიჯებით ( $\Delta t = -1, \Delta C = 1, \Delta \tau = -2$ ). საოპტიმიზაციო ცდების სერია დავიწყეთ დაგეგმვის ძირითადი დონიდან (ტემპერატურა  $4,5^\circ\text{C}$ , კონცენტრაცია - 5% და დრო 9 კვირა) და ყოველ მომდევნო ცდაში პარამეტრს დავუმატეთ ან დავაკელით ბიჯის სიდიდე, რასაც განსაზღვრავს ბიჯის ნიშანი. ყველა ეს სიდიდე გაერთიანებულია ცხრილში 11.

ცხრილი 11 და 12-ის ბოლო სვეტებში წარმოდგენილია საოპტიმიზაციო ცდების შედეგები ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ) ცალკეული საოპტიმიზაციო პარამეტრისათვის, საიდანაც შევარჩიეთ საუკეთესო შედეგი ვაშლისა და სტაფილოსათვის.

როგორც ვხედავთ, შენახვის ოპტიმალური შედეგი მიიღწევა მე-11 ცდაზე, რომლის შესაბამისი პარამეტრებია: საკვები საფარის კონცენტრაცია 7%, შენახვის დრო 6 კვირა, ტემპერატურა -  $2,5^\circ\text{C}$ . აღსანიშნავია, რომ ამ პირობებში ნაყოფის

ბიოქიმიური პარამეტრები თითქმის უცვლელად ინახება. ეს პარამეტრებია პროცესის ოპტიმალური პარამეტრები.

**ცხრილი 11.** საოპტიმიზაციო ცდების სერია ვაშლისათვის

ვარირების ინტერვალი და ფაქტორების დონე	$X_1$ t ტემპ. °C	$X_2$ C კონც. %	$X_3$ τ დრო, კვირა	$Y_1$ წყალ. ხსნ. მშრ. ნივთ.	$Y_2$ სატიტრაცი მუჟავიანობა	$Y_3$ ნედ. ლი უჯრედანა
ძირითადი დონე	4.5	5	9			
ვარირების ინტერვალი, $\Delta X_i$	4.5	3	5			
რეგრესიის კოეფიციენტი $b_i$	-0.0308	0.053	-0.0358			
ნამრავლი $\varphi_i = b_i \cdot \Delta X_i$	-0.135	0.15	-0.179			
ფარდობა $\beta = \frac{\Delta X_2^*}{b_2} = 10$			10			
ბიჯი $\Delta X_i = 10 \varphi_i$	-1	1	-1.5			
ცდები						
9	4.5	5	9	10.4	0.11	0.969
10	3.5	6	8.5	11.1	0.213	0.93
11	2.5	7	6	11.9	0.40	0.76
12	1.5	8	4.5	12.1	0.49	0.73

იგივენაირად ვიანგარიშეთ სტაფილოს შემთხვევაში და ყველა ეს სიდიდე გაერთიანებულია [ცხრილში 12](#).

როგორც ვხედავთ, შენახვის ოპტიმალური შედეგი ამ შემთხვევაშიც მიიღწევა მე-11 ცდაზე, რომლის შესაბამისი პარამეტრებია: საკვები საფარის კონცენტრაცია 7%, შენახვის დრო 8 კვირა, ტემპერატურა - 2,5°C. აღსანიშნავია, რომ ამ პირობებში ნაყოფის ბიოქიმიური პარამეტრები თითქმის უცვლელად ინახება. სწორედ ეს პარამეტრებია პროცესის ოპტიმალური პარამეტრები.

ჩატარებული კვლევებით დადგინდა, რომ ფსევდოპროტეინის საკვები პოლიმერული საფარით შესაძლებელია პროდუქტების კვებითი ღირსების ეფექტური შენარჩუნება ხანგრძლივი შენახვის პირობებში ([სურათი 3-5](#)).

**ცხრილი 12.** საოპტიმიზაციო ცდების სერია სტაფილოსათვის

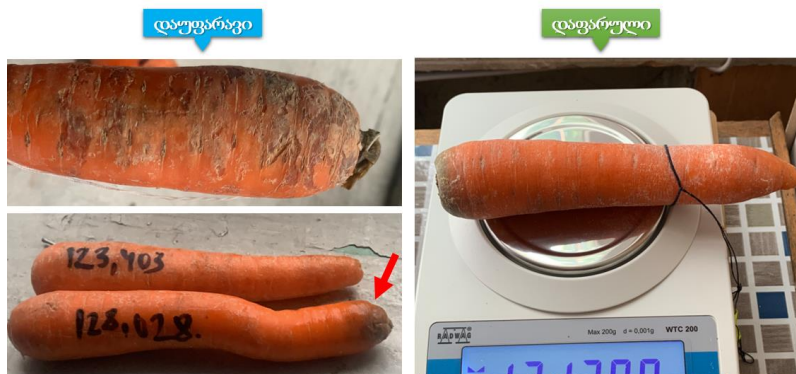
ვარიანების ინტერვალი და ფაქტორების დონე	$X_1$ t ტემპ. °C	$X_2$ C კონც. %	$X_3$ τ დრო, კვირა	$Y_1$ წყალ. ხსნ. მშრ. ნივთ.	$Y_2$ სატიტრაცი მუცვიანობა	$Y_3$ ნედ.ლი უჯრედანა
ძირითადი დონე	4.5	5	9			
ვარიანების ინტერვალი, $\Delta X_i$	4.5	3	5			
რეგრესიის კოეფიციენტი $b_i$	-0.013	0.022	-			
ნამრავლი $\varphi_i = b_i \cdot \Delta X_i$	-0.059	0.066	-0.064			
ფარდობა $\beta = \frac{\Delta X_2^*}{b_2} = 10$			10			
ბიჯი $\Delta X_i = 10 \varphi_i$	-1	1	-0.5			
ცდები						
9	4.5	5	9	6.2	0.059	0.96
10	3.5	6	8.5	7.3	0.079	0.79
11	2.5	7	8	7.9	0.132	0.70
12	1.5	8	7.5	8.0	0.134	0,68



**სურათი 3.** ვაშლისა და სტაფილოს ნიმუშები ექსპერიმენტის დასაწყისში



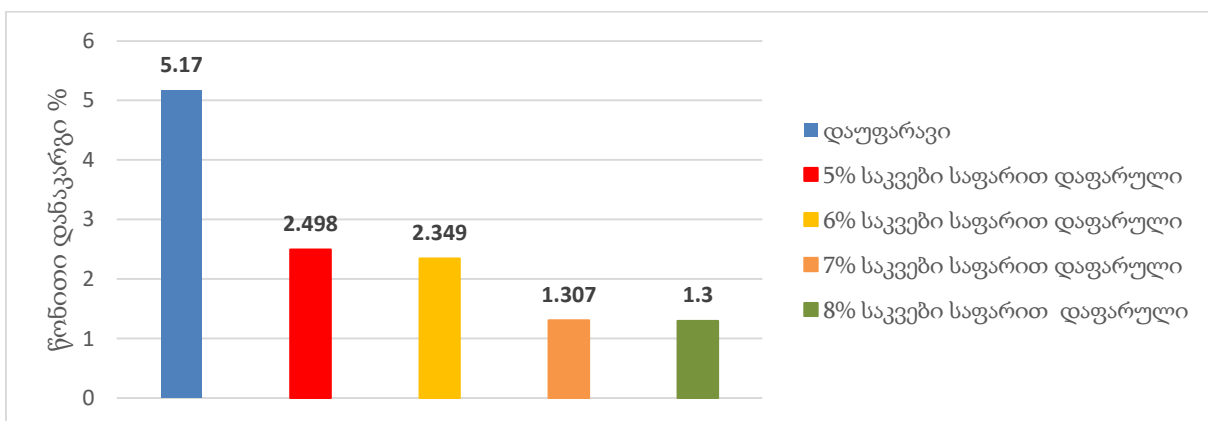
**სურათი 4.** დაზარალებული და საკვები საფარით დაფარული ვაშლის ნიმუშები 67 დღის შემდეგ



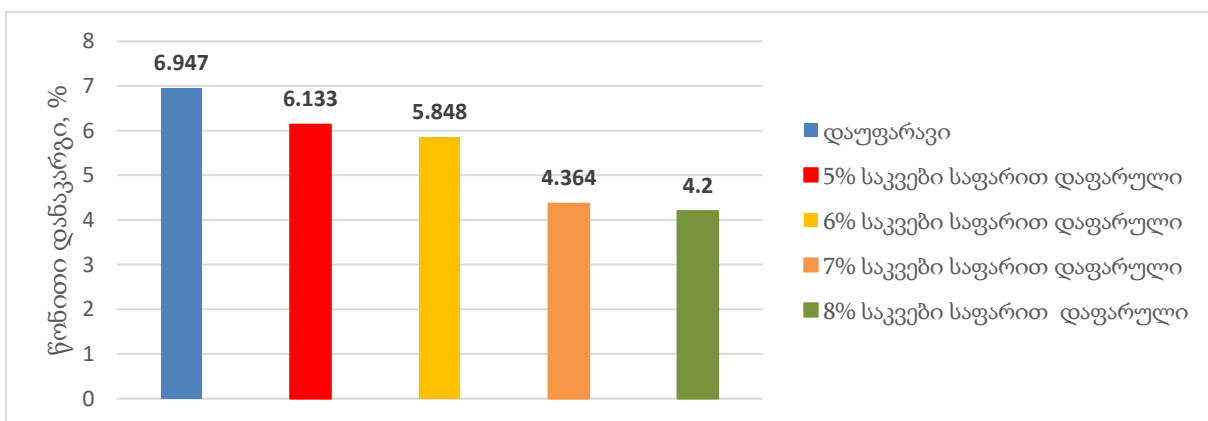
**სურათი 5.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული სტაფილოს ნიმუშები 67 დღის შემდეგ

### წონითი დანაკარგების შესწავლა

ჩვენს მიერ საკვები საფარის სხვადასხვა კონცენტრაციით დაფარულ საკვლევ ნიმუშებზე შესწავლილია წონითი დანაკარგები ვაშლისა და სტაფილოს 67 დღიანი დაკვირვების პერიოდში 0-4°C-ზე. მონაცემები განხილულია ნახაზებში 3-4.



**ნახაზი 3.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული ვაშლის ნიმუშების წონითი დანაკარგების (%) ცვლილება 67 დღიანი შენახვისას



**ნახაზი 4.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული სტაფილოს ნიმუშების წონითი დანაკარგების (%) ცვლილება 67 დღიანი შენახვისას



მიღებული შედეგებიდან ჩანს, რომ 7% და 8 %-იანი ფსევდოპროტეინის საკვები საფარით დაფარულ ნიმუშებში წონითი დანაკარგები ყველაზე მცირეა და შეადგენს 1.3%-ს ვაშლის ნიმუშებში, 4.4%-ს სტაფილოს ნიმუშების შემთხვევაში.

### ფსევდოპროტეინული საკვები საფარის გავლენა ბანანის შენახვის ხანგრძლივობაზე

ექსპერიმენტების მათემატიკური დაგეგმარების გზით დადგენილია, რომ ფსევდოპროტეინის 7%-იანი ხსნარი იძლევა საუკეთესო შედეგებს აგროპროდუქტების შენახვის ვადის გასაზრდელად, როგორცაა ვაშლი და სტაფილო. ვაშლისა და სტაფილოს მოდელირების მიდგომა გამოყენებულია სუბტოპიკული ხილის ბანანის 7%-იანი ფსევდოპროტეინული ხსნარით ნიმუშების დაფარვისათვის. ექსპერიმენტების ჩასატარებლად შერჩეულია საქართველოში შემოტანილი კავენდიშის ჯიშის ბანანი. ბანანების საკვები საფარით დასაფარად გამოყენებულია ჩაყურსვის მეთოდი. შესაბამისად, ამოვლების (ჩაყურსვის) მეთოდით, ბანანის კონები ყუნწების ჩათვლით, დაფარულია ფსევდოპროტეინის 7% ეთანოლის ხსნარით. საკვლევ პარამეტრებად შერჩეულია წონითი დანაკარგები, წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (Brix%), სატიტრავი მჟავიანობა (%), pH და შაქარმჟავა ინდექსი. პარამეტრებზე მოქმედი ფაქტორებია ტემპერატურა და შენახვის დრო. საკვლევ ბანანის ნიმუშების ბიოქიმიური ცვლილებების შესასწავლად და შენახვის ვადის დასადგენად, ექსპერიმენტები ჩატარებულია ორ სხვადასხვა ტემპერატურაზე:  $22.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  (ღია სივრცე) და  $11.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  (მაცივარი, ფარდობითი ტენიანობა  $70 \pm 18\%$ ). კვლევის პარამეტრები გაზომილია ყოველ მე-3 ( $22.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ) და მე-5 ( $11.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ) დღეს. როგორც ცნობილია, ტრანსპორტირებისას ბანანის ნაყოფი ინახება  $14^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე. მონაცემები წარმოდგენილია როგორც ორი გამეორების საშუალო არითმეტიკული ( $\pm$ სტანდარტული გადახრა) (ცხრილი 13,14). ცხრილში მოცემული განსხვავებული ლათინური ასოები განსაზღვრავს დამუშავების მეთოდების განსხვავებულობას.

**ცხრილი 13. 22.5±1.5°C ჩატარებული ექსპერიმენტების სტატისტიკური ანალიზი**

დამუშავების ტიპი	დრო	წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (%)	სატიტრაცი მჟავიანობა (%)	pH	შაქარმჟავა ინდექსი	წონითი დანაკარგი (%)
დაუფარავი	0	15.95 E(a) ± 0.778	0.69 A(a) ± 0.0354	3.76 C(a) ± 0.233	23.40 F(a) ± 0.0071	
დაუფარავი	3	17.55 DE(a) ± 0.778	0.63 A(a) ± 0.0354	4.40 BC(a) ± 0.219	28.09 EF(a) ± 0.3390	0.57 F(a) ± 0.000707
დაუფარავი	6	20.25 CDE(a) ± 0.636	0.56 AB(a) ± 0.0354	4.79 AB(a) ± 0.240	36.53 EF(a) ± 1.181	1.26 E(a) ± 0.000710
დაუფარავი	9	22.00 BCD(a) ± 1.56	0.48 BC(b) ± 0.0354	5.35 A(a) ± 0.163	46.32 D(a) ± 0.170	1.95 D(a) ± 0.000710
დაუფარავი	12	24.35 ABC(a) ± 1.63	0.42 BC(b) ± 0.0424	5.45 A(a) ± 0.240	58.08 C(a) ± 1.99	2.75 C(a) ± 0.000710
დაუფარავი	15	25.65 AB(a) ± 1.77	0.34 CD(b) ± 0.0424	5.49 A(a) ± 0.226	75.70 B(a) ± 4.25	3.78 B(a) ± 0.000710
დაუფარავი	18	27.00 A(a) ± 1.131	0.28 D(b) ± 0.0212	5.55 A(a) ± 0.247	98.31 A(a) ± 3.47	4.81 A(a) ± 0.013440
დაფარული	0	15.95 D(a) ± 0.778	0.69 A(a) ± 0.0354	3.76 C(a) ± 0.233	23.41 G(a) ± 0.0071	
დაფარული	3	16.35 CD(a) ± 0.495	0.67 AB(a) ± 0.0212	4.21 BC(a) ± 0.247	24.59 F(b) ± 0.0424	0.22 F(b) ± 0.000707
დაფარული	6	16.90 BCD(b) ± 0.141	0.65 ABC(a) ± 0.0141	4.58 AB(a) ± 0.283	26.01 E(b) ± 0.346	0.44 E(b) ± 0.000707
დაფარული	9	17.25 BCD(b) ± 0.071	0.63 ABC(a) ± 0.0141	4.71 AB(a) ± 0.170	27.89 D(b) ± 0.0141	0.66 D(b) ± 0.000707
დაფარული	12	17.75 ABC(b) ± 0.212	0.61 BC(a) ± 0.0000	4.84 AB(a) ± 0.141	29.10 C(b) ± 0.346	0.88 C(b) ± 0.000707
დაფარული	15	18.20 AB(b) ± 0.141	0.60 BC(a) ± 0.00707	4.99 A(b) ± 0.1061	30.59 B(b) ± 0.1273	1.11 B(b) ± 0.000710
დაფარული	18	18.90 A(b) ± 0.141	0.59 C(a) ± 0.00707	5.14 A(b) ± 0.0424	32.31 A(b) ± 0.148	1.44 A(b) ± 0.000710

**ცხრილი 14. 11.5±1.5°C ჩატარებული ექსპერიმენტების სტატისტიკური ანალიზი**

დამუშავების ტიპი	დრო	წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (%)	სატიტრაცი მჟავიანობა (%)	pH	შაქარმჟავა ინდექსი	წონითი დანაკარგი (%)
დაუფარავი	0	15.95 C(a) ± 0.778	0.69 A(a) ± 0.0354	3.76 D(a) ± 0.233	23.29 D(a) ± 0.0636	
დაუფარავი	5	16.50 C(a) ± 0.849	0.67 AB(a) ± 0.0354	4.17 CD(a) ± 0.339	24.81 D(a) ± 0.0424	0.31 F(a) ± 0.000707
დაუფარავი	10	17.60 BC(a) ± 0.424	0.63 ABC(a) ± 0.0354	4.72 BC(a) ± 0.127	28.19 CD(a) ± 0.912	0.73 E(a) ± 0.000707
დაუფარავი	15	19.40 AB(a) ± 0.71	0.57 ABCD(a) ± 0.0141	5.23 AB(a) ± 0.000	34.03 BC(a) ± 0.396	1.25 D(a) ± 0.000707
დაუფარავი	20	20.10 A(a) ± 0.71	0.54 BCD(a) ± 0.0283	5.34 AB(a) ± 0.028	37.74 AB(a) ± 0.07	1.78 C(a) ± 0.000707
დაუფარავი	25	21.00 A(a) ± 0.28	0.50 CD(b) ± 0.0495	5.43 A(a) ± 0.021	42.61 A(a) ± 3.69	2.30 B(a) ± 0.000707
დაუფარავი	30	21.35 A(a) ± 0.212	0.47 D(b) ± 0.0424	5.53 A(a) ± 0.007	45.59 A(a) ± 3.66	3.87 A(a) ± 0.000710
დაფარული	0	15.95 A(a) ± 0.778	0.69 A(a) ± 0.0354	3.76 A(a) ± 0.233	23.29 G(a) ± 0.0636	
დაფარული	5	16.35 A(a) ± 0.636	0.68 A(a) ± 0.0283	3.81 A(a) ± 0.247	24.05 F(b) ± 0.0636	0.10 F(b) ± 0.000707
დაფარული	10	16.60 A(a) ± 0.707	0.66 A(a) ± 0.0283	3.88 A(a) ± 0.247	25.16 E(b) ± 0.007	0.21 E(b) ± 0.000707
დაფარული	15	17.05 A(a) ± 0.636	0.65 A(a) ± 0.0212	4.18 A(b) ± 0.262	26.44 D(b) ± 0.1202	0.32 D(b) ± 0.000707
დაფარული	20	17.45 A(a) ± 0.636	0.63 A(a) ± 0.0212	4.25 A(b) ± 0.262	27.92 C(b) ± 0.071	0.53 C(b) ± 0.000707
დაფარული	25	17.85 A(b) ± 0.636	0.61 A(a) ± 0.0283	4.33 A(b) ± 0.2620	29.37 B(b) ± 0.1700	0.74 B(b) ± 0.000707
დაფარული	30	18.15 A(b) ± 0.636	0.59 A(a) ± 0.0141	4.57 A(b) ± 0.2690	30.76 A(b) ± 0.339	1.05 A(b) ± 0.000710

ბანანის წონითი დანაკარგების ზრდა დაიწყო როგორც დაუფარავ, ისე დაფარულ ნიმუშებში, შენახვის მესამე დღიდან 22.5±1.5°C-ზე და შენახვის მეხუთე დღიდან 11.5±1.5°C-ზე, თუმცა, მნიშვნელოვანი განსხვავებაა ზრდის სიჩქარის მიხედვით დაუფარავსა და დაფარულ ნიმუშებს შორის. ანალიზის შედეგებით ნაჩვენებია, რომ წონითმა დანაკარგებმა დაუფარავ ნიმუშებში მე-18 დღეს

22.5±1.5°C-ზე შეადგინა 4.81%, ხოლო დაფარულ ნიმუშებში - 1.44% (3.37%-ით ნაკლები); 30-ე დღეს 11.5±1.5°C-ზე დაუფარავ ნიმუშებში 3.87%, ხოლო დაფარულ ნიმუშებში - 1.05% (2.82%-ით ნაკლები). წონითი დანაკარგი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი სიდიდეა, რომელიც ამცირებს აგროპროდუქტების ხარისხს. მოცემულ შემთხვევაში, ფსევდოპროტეინული საკვები საფარი ხელს უშლის წყლის დაკარგვას ნიმუშების ზედაპირზე უხილავი ნახევრადგამტარი თხელი ფენის წარმოქმნით, რაც იწვევს წონითი დანაკარგების შემცირებას.

წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება დაუფარავ ბანანში 22.5±1.5°C-ზე 18 დღის განმავლობაში გაიზარდა 15.95%-დან 27.00%-მდე, ხოლო დაფარულ ნიმუშში - 15.95%-დან 18.15%-მდე (8.1%-ით ნაკლებია საკონტროლოსთან შედარებით); 11,5±1,5°C-ზე 32 დღის განმავლობაში დაუფარავ ნიმუშებში - 15.95%-იდან 21.35%-მდე, ხოლო დაფარულ ნიმუშებში - 15.95%-დან 18.90%-მდე (3.2%-ით ნაკლებია საკონტროლოსთან შედარებით). ამრიგად, წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერების შემცველობის ზრდა დაფარულ ბანანებში უფრო დაბალი იყო, ვიდრე დაუფარავ ნიმუშები. აღსანიშნავია, რომ საკვლევ ნიმუშებში შაქრების ზრდა მოსავლის შემდგომი მომწიფების პროცესში სახამებლის ჰიდროლიზმა და შესაბამისად შაქრების დაგროვებამ გამოიწვია.

საკვლევ ნიმუშებში საწყისი სატიტრავი მჟავიანობა 0.69%-ს შეადგენდა, რომლის ცვლილებაც სხვადასხვა ტემპერატურაზე შენახულ დაუფარავ და დაფარულ ნიმუშებში განსხვავებულია. სატიტრავი მჟავიანობის მინიმალური მნიშვნელობა 0.28%-ია (შემცირდა 0.41%-ით), რაც შენახვის მე-18 დღეს 22.5±1.5°C-ზე დაუფარავ ნიმუშებშია ნაჩვენები, ხოლო 11.5±1.5°C-ზე დაფარულ ნიმუშში სატიტრავი მჟავიანობა 0.1%-ით შემცირდა 0.69%-დან 0.59%-მდე შენახვის 30-ე დღეს.

ბანანის რბილობის მაქსიმალური pH (5.55) დაფიქსირდა დაუფარავ ნიმუშში შენახვის მე-18 დღეს 22.5±1.5°C-ზე, ხოლო მინიმალური pH (3.76) - საწყის ნიმუშებში. 22.5±1.5°C-ზე დაუფარავ ნიმუშებში pH 3.76-დან გაიზარდა 5.55-მდე, ხოლო დაფარულ ნიმუშებში 3.76-დან 5.14-მდე (0.41-ით ნაკლებია საკონტროლოსთან შედარებით). 11.5±1.5°C-ზე შენახულ ბანანებში დაუფარავ ნიმუშებში pH 3.76-დან გაიზარდა 5.53-მდე, ხოლო დაფარულ ნიმუშებში 3.92-დან 4.57-მდე (0.96-ით ნაკლებია საკონტროლოსთან შედარებით).

სხვადასხვა ტემპერატურაზე შენახული ბანანის ნიმუშების შექარმჟავას ინდექსის შესწავლისას მათი ხარისხისა და სიმწიფის დონის დასადგენად, ნაჩვენებია მნიშვნელოვანი განსხვავება დაფარულსა და დაუფარავ ბანანის ნიმუშებს შორის. დაფარულ ნიმუშებში, შექარმჟავა ინდექსი შესაბამისობაშია ბიოლოგიური თავისებურებებიდან გამომდინარე დადგენილ ნორმასთან (შექარმჟავა ინდექსის სკალასთან).  $22.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ -ზე შექარმჟავა ინდექსი მერყეობდა 23.41-დან 32.31-მდე, ხოლო  $11.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე - 23.29-დან 30.76-მდე. ორივე შემთხვევაში, შექარმჟავა ინდექსის ასეთი მნიშვნელობები მიუთითებს მჟავე გემოს არარსებობაზე, რაც შესაბამისად ბანანის საგემოვნო თვისებაა. დანარჩენ ნიმუშებში შექარმჟავა ინდექსის მნიშვნელობები სცილდება ტიპურ დადგენილ ფარგლებს (სკალას) და მათში შექრის მაღალი შემცველობა არ არის ტკბილი გემოსა და მაღალი საგემოვნო თვისებების პირდაპირპროპორციული, რადგან სატიტრავი მჟავიანობა დაბალია. ამ შედეგებმა დაადასტურა ბანანის ნიმუშების დაბალი ხარისხი და დაბალი საგემოვნო თვისებები დაუფარავ ნიმუშებში  $22.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ -ზე 9 დღის შემდეგ, ხოლო  $11.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ -ზე - 20 დღის შემდეგ.

ამრიგად, კვლევამ აჩვენა, რომ პოლიმერული საფარი ბანანის საკვლევ ნიმუშებს უნარჩუნებს არა მხოლოდ ბიოქიმიურ პარამეტრებს, არამედ გავლენას ახდენს საგემოვნო თვისებებზეც (სურათი 6-8). წონითი დანაკარგები, წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (Brix), რბილობის pH და შექარმჟავა ინდექსი გაიზარდა, ხოლო სატიტრავი მჟავიანობა შემცირდა, მაგრამ გაცილებით ნაკლებად დაფარულ ნიმუშებში დაუფარავ (საკონტროლო) ნიმუშებთან შედარებით. საკვლევ პარამეტრების ზრდა-შემცირების ნელი ტემპი, აგრეთვე შენახვის ვადის ზრდის ტენდენცია დაფარულ ნიმუშებში საკონტროლო ნიმუშებთან შედარებით ადასტურებს ფსევდოპროტეინის ეფექტურობას შენახვის ვადის გახანგრძლივების თვალსაზრისით.



**სურათი 6.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული ბანანის ნიმუშები შენახვის დასაწყისში:  
 ა)  $22.5 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე, ბ)  $11.5 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე



**სურათი 7.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული ბანანის ნიმუშები  $22.5 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე შენახვის ვადის ბოლოს (21 დღე)

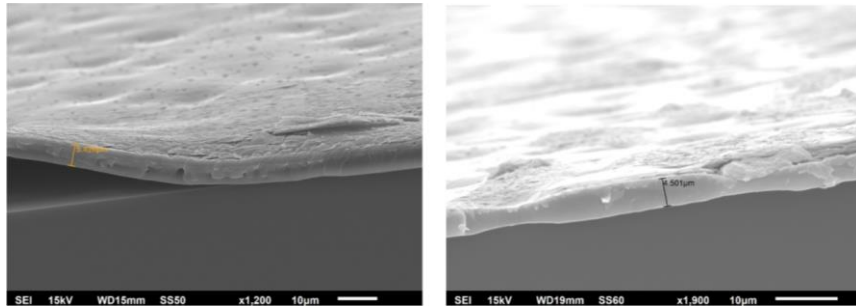


**სურათი 8.** დაუფარავი და საკვები საფარით დაფარული ბანანის ნიმუშები  $11.5 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ზე შენახვის ვადის ბოლოს (32 დღე)

### საფარის სისქის დადგენა

მასკანერებელი ექტრონული მიკროსკოპით დადგენილია, რომ ფსევდო-პროტეინული საკვები საფარის სისქე არის  $4.774 \pm 0.777 \mu\text{m}$  (სურათი 9), რაც პასუხობს პოლიმერული საფარით დაფარული საკვები პროდუქტებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

ემპირიული მეთოდით დადგენილია სხვადასხვა კონცენტრაციის (2%, 5%, 6%, 7%, 8%) საკვები საფარის სისქე მინის სფეროების გამოყენებით. აღსანიშნავია, რომ ემპირიული და ელექტრონულ მასკანერებელი მიკროსკოპის გზით მიღებული შედეგები 5% და 7%-იანი საკვები საფარების შემთხვევაში ემთხვევა ერთმანეთს.



**სურათი 9.** ელექტრონული მასკანერებელი მიკროსკოპით (SEM) დადგენილი პოლიმერული საფარის სისქე ვაშლის ზედაპირზე

ემპირიული ხერხით 1 კგ ვაშლის დასაფარად საჭირო ფსევდოპროტეინის რაოდენობის (გ) დასადგენად განსაზღვრულია დაახლოებით რამდენი ცალი ვაშლი შეადგენს 1 კგ-ს (სურათი 10).



**სურათი 10.** ემპირიული მეთოდით 1 კგ ვაშლის დასაფარად საჭირო ფსევდოპროტეინის გაანგარიშება

ჩვენს შემთხვევაში 1 კგ-ს შეადგენდა 7 ცალი ვაშლი (ზამთრის ბანანი). ვაშლის მოდელად შერჩეულია 7%-იანი საკვები საფარით დაფარული მინის სფერო. დადგენილია, რომ საშუალოდ ერთი ვაშლისთვის საჭიროა 0.077 გ პოლიმერი. 1 კგ ვაშლისთვის (7 ცალი ვაშლი) საჭირო პოლიმერის მასა იქნება:

$$X = 0.077 \times 7 = 0.539 \text{ გ} \quad (29)$$

ამრიგად, ემპირიული გზით დადგენილია 1 კგ ვაშლის დასაფარად საჭირო ფსევდოპროტეინის რაოდენობა, რამაც შეადგინა 0.539 გ, ღირებულებამ კი - 0.15\$ (0.539×0.15), რაც დაახლოებით 150\$-ია 1 ტონა პროდუქციაზე.

## დასკვნა

1. მათემატიკური მოდელირების გზით მიღებულია წრფივი რეგრესიული განტოლებები ვაშლისა და სტაფილოს შენახვისათვის ფსევდოპროტეინების გამოყენებით.
2. მათემატიკური მოდელირების სწრაფი აღმასვლის მოძრაობის ფარგლებში დადგენილია ვაშლისა და სტაფილოს შენახვის ოპტიმალური პირობები: ვაშლისათვის - საკვები საფარის კონცენტრაცია 7%, შენახვის დრო 6 კვირა, ტემპერატურა - 2.5°C. სტაფილოსათვის - საკვები საფარის კონცენტრაცია 7%, შენახვის დრო 8 კვირა, ტემპერატურა - 2.5°C. აღსანიშნავია, რომ ამ პირობებში ნაყოფის ბიოქიმიური პარამეტრები თითქმის უცვლელად ინახება.
3. განსაზღვრულია წონითი დანაკარგები ვაშლსა და სტაფილოს 67 დღიანი შენახვის პერიოდში, სადაც ნაჩვენებია, რომ 7%-იანი ფსევდოპროტეინული საფარით დაფარულ ვაშლის ნიმუშებში წონითი დანაკარგები 3.9%-ით ნაკლებია მათ საკონტროლო ნიმუშებთან შედარებით, ხოლო სტაფილოს ნიმუშებში - 2.6%-ით.
4. შესწავლილია ბანანის შენახვისუნარიანობა ფსევდოპროტეინული საკვები საფარით, როგორც ღია სივრცეში ( $22.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ) ასევე მაცივარში ( $11.5 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ). დადგენილია, რომ წონითი დანაკარგები, წყალში ხსნადი მშრალი ნივთიერება (Brix), ხილის რბილობის pH და შაქარმჟავა ინდექსი გაიზარდა, ხოლო სატიტრაცი მჟავიანობა - შემცირდა. თუმცა, სხვადასხვა ტემპერატურაზე შენახულ დაფარულ ნიმუშებში ზრდის ან შემცირების ტემპი უფრო ნელი იყო, ვიდრე მათ საკონტროლო ნიმუშებში და შენახვის ხანგრძლივობა ღია სივრცეში შეადგენდა 21 დღეს, ხოლო მაცივარში 32 დღეს.
5. დადგენილია ბანანის შენახვისუნარიანობა ფსევდოპროტეინული საკვები საფარით. მიღებული მონაცემები დამუშავებულია (ANOVA) Minitab.2.1.0.0 პროგრამული უზრუნველყოფით. სარწმუნოების კოეფიციენტის - P-ს მნიშვნელობა, როცა  $P \leq 0.05$ , ჩაითვალია მნიშვნელოვან განსხვავებად.
6. ემპირიული მეთოდით დადგენილია სხვადასხვა კონცენტრაციის (2%, 5%, 7%, 8%) საკვები საფარის სისქე მინის სფეროების გამოყენებით, რაც პასუხობს

პოლიმერული საფარით დაფარული საკვები პროდუქტებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

7. დადგენილია 7%-იანი საკვები საფარის სისქე ელექტრონული მასკანერებელი მიკროსკოპით (SEM) 20 ვტ ელექტრულ ძაბვაზე და შეადგენს  $4.774 \pm 0.77$  მკმ.
8. ემპირიული გზით დადგენილია 1 კგ ვაშლის დასაფარად საჭირო ფსევდოპროტეინის რაოდენობა და შეადგენს 0.539 გ-ს, ღირებულება კი - 0.15\$-ს, რაც დაახლოებით 150\$-ია 1 ტონა პროდუქციაზე.
9. ექსპერიმენტის შედეგები საშუალებას გვაძლევს რეკომენდაცია გავუწიოთ ფსევდოპროტეინებს, როგორც საკვებ საფარ მასალას, აგროპროდუქტების პრეზერვაციის მიზნით.



## სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში

1. ჯიბლაძე, თ., ფალავანდიშვილი, თ., ქაცარავა, რ. აგროპროდუქტების პრეზერვაცია პოლიმერული ბიომიმეტიკით: პროცესის მათემატიკური დაგეგმვა. „ქიმია - მიღწევები და პერსპექტივები“ აკადემიკოს გივი ცინცაძის დაბადებიდან 90 წლისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო - სამეცნიერო კონფერენციის შრომების კრებული. გვ. 190-198. 2023
2. ჯიბლაძე, თ. ფსევდოპროტეინული საკვები საფარით დაფარულ აგროპროდუქტებში მიმდინარე ბიოქიმიური ცვლილებები. ქართველი მეცნიერები, 6(1), 212–226. <https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.01.27>
3. Jibladze, T., Palavandishvili, T., Katsarava, R. Study of sugar-acid index changes in apple and banana fruits coated with pseudoprotein edible coating. ქართველი მეცნიერები, 6(2), 1-10. 2024. <https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.02.01>
4. Jibladze, T., Palavandishvili, T., Katsarava, R. Pseudoprotein-based edible coating for enhancing the shelf life of Banana fruit. საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის მოამბე, 18(2), 115-121. 2024.
5. Jibladze, T., Palavandishvili, T., Li Citra, K., Cinquanta, L., Katsarava, R. Effect of pseudoprotein-based edible coating on the shelf life of banana fruit. Italian Journal of Food Science, 2024.

## Abstract

Nutrition is indeed fundamental to the existence, health, and performance of every living organism. It refers to the process by which organisms obtain and utilize nutrients from food for growth, metabolism, and maintenance of bodily functions. Agriculture is central to the food industry as it provides essential food products and raw materials for various industrial processes. The level of agricultural development directly impacts food availability and the supply chain for other industries. Long-term storage of agri-products with maximum preservation of economic, technological and food properties of products, without loss of weight and quality, is crucial but challenging. Products, due to their high water content, are highly susceptible to deterioration from internal and external factors, which include biological processes, environmental conditions, and handling practices. They can lead to significant losses in quantity and quality. Despite advancements in science and technology, global losses of agri-products remain high. These losses contribute to food shortages and economic inefficiencies in many countries. Factors such as improper storage techniques with shortcomings, transportation issues, and inadequate processing facilities all contribute to these losses. The Food and Agriculture Organization (FAO) reports that over a billion people suffer from hunger globally, while a substantial amount of food (1.3 billion tons annually) is lost before reaching consumers. This underscores the inefficiencies in the agricultural supply chain and the need for improved storage and processing technologies. In addition, we should take into account that the quality of raw materials is only one of the factors for obtaining high-quality food products. The quality of raw materials can be completely degraded as a result of neglecting, violating or undervaluing the established technological rules for their collection, transportation, commercial processing, storage and processing. The quality of high-quality raw materials can deteriorate to such an extent that it becomes unusable, both for storage and for technical processing. Carrying out a separate process of commercial processing of agricultural raw materials and products according to a rational technological regime ensures maximum preservation of the initial properties of raw materials, obtaining products with high nutritional and taste indicators. The technical level of primary processing, storage, and processing of raw materials significantly determines the country's economic indicators.

The research conducted between 2022-2024 focused on investigating the impact of pseudoprotein coatings on extending the shelf life of agri-products. The study involved monitoring biochemical changes in apples, carrots, and bananas over storage periods, comparing coated samples with uncoated (control) samples.

The primary objective was to evaluate how pseudoprotein edible coating influences the shelf life of agri-products. Biochemical parameters such as water-soluble dry matter (%), titratable acidity (%), raw cellulose content (%), pectin substances (%), pH levels, sugar-acid index, and weight loss (%) were analyzed at regular intervals during storage.

Throughout the storage period, both coated and uncoated samples exhibited biochemical changes. Results indicated that the rate of biochemical changes in the samples coated with pseudoprotein was slower compared to the uncoated control samples. This suggests that pseudoprotein coatings have a protective effect, potentially delaying the degradation of quality attributes in the agri-products.

The experiments conducted on apple and carrot samples aimed to determine optimal storage conditions using a mathematical planning approach. For this purpose, we selected water-soluble dry matter, titratable acidity, raw cellulose content, and pectin substances (only for apples) as optimization parameters. Temperature, edible coating concentration, and time were considered as factors interacting with these parameters. Based on the full factorial experiment of  $2^3$  types, the coefficients of the linear regression equations in the coded samples were determined and the regression equations were obtained for each selected parameter. We checked the adequacy of the obtained equations with the Fisher (F) criterion, and the evaluation of the variance in the tests with the Cochran (G) criterion. The calculated values were less than the table values of 95% confidence probability, which indicates that the obtained equation adequately describes the process, and the dispersion of the results is within the acceptable limits. Also, significant coefficients were evaluated using Student's criterion.

Using regression equations from mathematical models of processes allows for determining optimal storage conditions and optimizing processes efficiently by the rapid ascent method.

Based on the research conducted using regression equations from the mathematical model of the process and optimizing through the rapid ascent method, the optimal storage conditions have been determined for each research object. Additionally, the results indicate that the optimal concentration of pseudoprotein food coating is 7%.

We investigated the storage conditions of bananas and studied the influence of pseudoprotein edible coating in terms of shelf life extension. To determine how pseudoprotein edible coatings affect the shelf life and quality of bananas during storage we utilize the established mathematical modeling approach used for apples and carrots to optimize storage conditions. This concentration has been determined based on previous research findings or preliminary experiments indicating its effectiveness in preserving agri-products. Cavendish variety bananas imported to Georgia were chosen for the experiments. To observe the dynamic storage process, we selected temperature and time (storage duration) as the influencing factors for our research parameters. The research parameters include weight loss, water-soluble dry matter, titratable acidity, pH level, and sugar-acid index. The experiment was conducted in covered and uncovered (control) samples at different temperatures ( $22\pm 2^\circ\text{C}$ ;  $11.5\pm 1.5^\circ\text{C}$ ). It was conducted using a completely randomized design, repeated at least twice, and results were presented as means  $\pm$  standard deviation. Comparisons among different trials were done by multiple comparison tests following analysis of variance (ANOVA) in Minitab 22.1.0.0. software package. The differences were considered significant at a level of  $P < 0.05$ . The statistical analysis of the data was conducted at the University of Palermo as part of a traineeship under the Erasmus+ exchange program.

It has been established that the nutritional value, quality, and quantity of products can be effectively preserved with a pseudoprotein edible coating under long-term storage conditions.

The research was supported by the Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia ("Application of eco-friendly biodegradable pseudoproteins for agriproducts preservation", grant PHDF-23-3114).