

**მაია ლომიშვილი**

**სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის ოპტიმალური  
რეჟიმების დადგენა ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლების  
გათვალისწინებით**

**დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა**

**წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად**

**საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
თებერვალი, 2018 წელი**

**საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი**  
**აგრარული მეცნიერებების და ბიოსისტემების ინჟინერინგის**  
**ფაკულტეტი**

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი, ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მათა ლომიშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს სახელწოდებით: „სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის ოპტიმალური რეჟიმების დადგენა ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლების გათვალისწინებით" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის აგრარული მეცნიერებების და ბიოსისტემების ინჟინერინგის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად მის განხილვას.

2018 წელი

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ., პროფესორი ირაკლი ყრუაშვილი

---

თანახელმძღვანელი: ტ.მ.კ., პროფესორი ირმა ინაშვილი

---

რეცენზენტი: ტ.მ.დ., პროფესორი დავით გუბელაძე

---

რეცენზენტი: აკად. დოქტორი, ასოც. პროფესორი მადონა ლორია

---

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2018 წელი

ავტორი: მანია ლომიშვილი

დასახელება: „სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის ოპტიმალური რეჟიმების დადგენა ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლების გათვალისწინებით“

ფაკულტეტი: აგრარული მეცნიერებების და ბიოსისტემების ინჟინერინგი

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალურ პირთა ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

## ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და როგორც მთლიანი ნაშრომის, ისევე მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც საჭიროებენ მხოლოდ სპეციფიკურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების ანალიზის საფუძველზე მიღებულია შედეგები:

- ნიადაგში წყლის ორთქლის საანგარიშო ხარისხობრივი ემპირიული დამოკიდებულებები, ნიადაგში წყლის ორთქლის ადსორბცია-დესორბციის დადგენის მეშვეობით;
- რწყვის რეჟიმის პარამეტრების დასაზუსტებლად და მაღალი მოსავლის მისაღებად, ნიადაგების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია საკვლევი ობიექტის ნიადაგების მოცულობითი მასა;
- ექსპერიმენტალური მონაცემებით განსაზღვრულია სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის მნიშვნელობა. ჩატარებული კვლევის შედეგად განხორციელდა მიღებული წყალმოთხოვნილების ფორმულის ექსპერიმენტული შემოწმება და შემდგომი განზოგადება ნიადაგების რწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში, ნიადაგის ზღვრული ტენტევადობის 60%-ის, 70% და 80%-ის ვარიანტების დროს;
- ცდის პირობებში განსაზღვრულია რწყვის ვადების კორექტირება დეკადების მიხედვით, ჰაერის, ტემპერატურის, ნიადაგ-გრუნტებში საჭირო ჰაერის და წყლის შემცველობის, მოსული ნალექების სათანადო შეფასებითა და გათვალისწინებით.
- განსაზღვრულია წყლის ჩამონადენის ბალანსის განტოლება, სადაც შესაბამისი დაშვებების და მათემატიკური გარდაქმნების საფუძველზე მიღებულია დამოკიდებულება, რომელიც ითვალისწინებს ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტის ცვალებადობას ჩაქონვის სიღრმის მიხედვით;
- ნიადაგ-გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური შემადგენლობის, ნაკადის გარბენის სიგრძისა და მიწოდებული წყლის მოცულობის გათვალისწინებით მიღებულია რწყვის ნორმის საანგარიშო დამოკიდებულება.
- ნიადაგ-გრუნტების სპეციფიკური თვისებების გათვალისწინებით მიღებულია სარწყავი წყლის დასაშვებ სიჩქარეთა საანგარიშო კორექტირებული დამოკიდებულება, რაც უზრუნველყოფს ირიგაციული ეროზიის პროგნოზის მაღალ საიმედოობას.

## Resume

Based on the analysis of the theoretical and experimental studies presented in the given paper, the following conclusions have been obtained:

- Taking into account the adsorption and desorption of water vapor in the soil, empirical formulas for determination of water vapor in soil was received;
- Using the experimental data, the value of crop water requirement coefficient was determined;
- On the basis of the conducted reseraches, an experimental verification of the water requirement and its further adherence under different conditions of soil irrigation modes and during different options of maximum moisture capacity of soil (60%, 70% and 80%), where carried out.
- Under the conditions of the conducted experiments the adjustments of irrigation dates according decades, taking into account the corresponding estimation of air temperature, atmospheric precipitation and necessary air and water content in the soil, where determined;
- By means of software “AquaCrops”, proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) and taking into consideration the physical and mechanical properties of soil and crop water requirement of the experimental plot, the processing of climatic data and computation of evapotranspiration were carried out;
- Taking into consideration the physical and mechanical properties of the soil, the length of the free flow path and the volume of water supplied, a formula was obtained for computing the irrigation rate;
- It has been justified, tha in order to determine the mean free pass of flow, it is necessary to take into account the pressure gradient;
- Taking into account the corresponding assumptions and mathematical transformations in the formula for computing the balance of surface runoff, we have obtained the formula for determination of seepage, which considers the varries of the seepage pressure gradient and infiltration depth;
- Taking into consideration the specific properties of the soil, the corrected formula for computing the permissible irrigation water velocity was obtained, which will allo us to predict the irrigation erosion with high reliability.

## შინაარსი

შესავალი	9
<b>თავი I. სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის რეჟიმის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა</b>	
1.1 რწყვის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებების ანალიზი	15
1.2 ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრის მეთოდები და მისი გავლენა რწყვის რეჟიმზე	26
1.3 რწყვის რეჟიმის გავლენა ირიგაციულ ეროზიაზე ნიადაგ-გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით	33
<b>თავი II. საველე - ექსპერიმენტალური კვლევები, ანალიზი და შედეგები</b>	
2.1 საცდელი პოლიგონის გეოგრაფიული და ნიადაგურ-კლიმატური პირობების ზოგადი მიმოხილვა	38
2.2 საცდელი პოლიგონის ნიადაგ-გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური და ქიმიური მახასიათებლების განსაზღვრა	41
2.3 ნიადაგებში ოპტიმალური წყალჰაეროვანი შემცველობის მოცულობითი მასების დადგენა ზედაპირული რწყვის დროს	52
2.4 სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმთხოვნილების კოეფიციენტის განსაზღვრა და მისი გავლენა რწყვის რეჟიმზე	62
<b>თავი III რწყვის რეჟიმის პარამეტრების თეორიული კვლევა ირიგაციული ეროზიის განმაპირობებელი ფაქტორების გათვალისწინებით</b>	
3.1 ნიადაგ-გრუნტების წყლოვანი მახასიათებლების თეორიული კვლევა და მათი გავლენა ირიგაციულ ეროზიასა და რწყვის რეჟიმზე	68
3.2 ნიადაგ-გრუნტების წყლისმიერი ეროზიის რაოდენობრივი პროგნოზირება და დასაშვებ სიჩქარეთა განსაზღვრა	85
<b>ზოგადი დასკვნები</b>	99
<b>გამოყენებული ლიტერატურა</b>	101

## ცხრილების ნუსხა

1.	ნიადაგის წყალგამტარობის სიჩქარე ტიპების მიხედვით	35
2.	2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ჰაერის საშუალო ტემპერატურა ( $C^{\circ}$ )	40
3.	2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდში მოსული ნალექების საშუალო მონაცემები (მმ)	40
4.	ნიადაგის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები	49
5.	ნიადაგის გრანულომეტრიული შემადგენლობა	50
6.	ნიადაგის ქიმიური შემადგენლობა	50
7.	ნიადაგის ტენიანობა	51
8.	წყლის ორთქლის ადსორბციულ-დესორბციის მსვლელობა (საშუალო მონაცემები)	52
9.	ნიადაგის შემცველი წყლის ჰიდროფიზიკური მახასიათებლები	60
10.	ნიადაგის წყალჰაეროვანი რეჟიმი სხვადასხვა მოცულობითი მასების დროს	60
11.	წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის $K$ -ს მნიშვნელობები ნიადაგის აქტიური ფენის სიღრმისა და ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის მიხედვით	63
12.	2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის მონაცემები	64
13.	ატმოსფერული ნალექების დეფიციტი $\Delta P$ მმ	65
14.	2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ფარდობით ტენიანობის მონაცემები	65
15.	რწყვის ვადები მორწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში	67

## ნახაზების ნუსხა

1.	სტრუქტურულ-მექანიკური მახასიათებლების განმსაზღვრელი გრაფიკები	45
2.	წყლის ორთქლის ადსორფცია-დესორბციის იზოთერმა	48
3.	ნიადაგში შესაძლებელი წყალ-ჰაერის შემცველობის დიაგრამა სხვადასხვა მოცულობითი მასების დროს	61
4.	ნიადაგში ტენიანობის განაწილების დინამიკა $T = 25^{\circ} C$ აორთქლების დროს $\rho = 1.2 \text{ გ/სმ}^3$	61
5.	წყალგამტარობის დინამიკის საილუსტრაციო გრაფიკი	71
6.	ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის საანგარიშო სქემა	72
7.	ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ცვალებადობის მრუდი $z = f(x); x = \varphi(t)$	76
8.	ვერტიკალური მიმართულებით ფილტრაციის საანგარიშო სქემა	81
9.	ზედაპირული ჩამონადენის საანგარიშო სქემა	90
10.	ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის საანგარიშო სქემა თანაბარი ძრავისათვის	93



## შესავალი

### ნაშრომის საერთო დახასიათება

**თემის აქტუალურობა.** როგორც ცნობილია, სასოფლო-სამეურნეო კულტურების ზრდა-განვითარების პროცესში მონაწილეობას ღებულობს უამრავი გარე და შიდა ფაქტორი, მაგრამ მათ შორის წყალს, როგორც ერთ-ერთ აუცილებელ ელემენტს, პრიორიტეტული მნიშვნელობა ენიჭება. ეს პრიორიტეტი იზრდება იმითაც, რომ იგი მართვადი ფაქტორია.

აღსანიშნავია ისიც, რომ წყლის რესურსები თითქმის ყველა სოფლის მეურნეობის პროდუქტების მწარმოებელ ქვეყანაში შეზღუდულია და განიცდის მის დეფიციტს წლის გარკვეულ პერიოდში მაინც, ხოლო მცენარის წყლის რესურსებით არაოპტიმალურმა უზრუნველყოფამ შეიძლება უარყოფითად გადაწყვიტოს მოსავლის ბედი.

ხშირ შემთხვევაში მცენარეთა წყლით უზრუნველყოფა ბუნებრივ პირობებში ვერ ხერხდება და აუცილებელი ხდება მისი ხელოვნური გზით რეგულირება. თუმცადა, სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალუზრუნველყოფის პრობლემის გადაჭრა წარმოადგენს რთულ ამოცანას და საჭიროებს რიგი პრობლემის გათვალისწინებას, რადგანაც იგი დაკავშირებულია არა მხოლოდ იმ ფიზიოლოგიურ პროცესებზე, რომლებიც მიმდინარეობს მცენარეში, არამედ ნიადაგის მახასიათებლებზეც და იმ გარემო პირობებზე რომელშიც მცენარეს უხდება ზრდა-განვითარება.

ნიადაგურ-კლიმატური პირობების მიხედვით საქართველოს ტერიტორია სპეციფიკურია, რის გამოც იგი დაყოფილია 22 სამეურნეო ზონად. ამასთან, ინტენსიური სოფლის მეურნეობის ზონა გავრცელებულია ქვეყნის მთელი ტერიტორიის 70%-ზე. მიუხედავად ამისა, მაღალი ხარისხის ბუნებრივად ნაყოფიერი სასოფლო-სამეურნეო ნიადაგები მხოლოდ 38%-ს შეადგენს. ამასთან, 205 ათას ჰა-ზე მეტია ბიცი და ბიცობი ნიადაგების ფართობი, დაახლოვებით 330 ათასი ჰა ეროზირებული და 220 ათასი ჰა

დაჭაობებულია. სწორედ ამით აიხსნება სოფლის მეურნეობის განსხვავებული ხასიათი და თავისთავად ცხადია, შესაბამისი მელიორაციული ღონისძიებების გატარების აუცილებლობა.

სარწყავი მიწათმოქმედების პირობებში, სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების ქვეშ, არსებული თუ ახალი ფართობების ათვისება ამა თუ იმ კონკრეტული ჰიდროგეოლოგიური, რეოლოგიურ-ლანდშაფტური და სხვა პირობებისათვის, მოითხოვს მეცნიერულად დასაბუთებული მეთოდების დამუშავებას.

არსებული ნორმატიული მითითებებისა და რეკომენდაციების თანახმად, რწყვის რეჟიმი დგინდება ნიადაგის აქტიური შრის ზღვრული წყალტევადობის ინდექსის მიხედვით და ნაკლებად ითვალისწინებს ნიადაგის ამა თუ იმ ფიზიკურ და მექანიკურ თვისებებს. ამასთან, რწყვის რეჟიმის პარამეტრების შერჩევის დროს დაშვებული ცდომილებები ძირითადად განპირობებულია იმით, რომ ნიადაგის ტენის დინამიკის ამსახველ მოდელებში უგულვებელყოფილია წყალ-ჰაეროვანი რეჟიმების მონაცემები, ევაპოტრანსპირაციის პროცესი, აგროკლიმატური მაჩვენებლები და სხვა ფაქტორები.

საბოლოოდ, როგორც წესი, რწყვის რეჟიმის არასწორად შერჩევას მივყავართ არა მხოლოდ მოსავლის რაოდენობისა და ხარისხის შემცირებამდე, არამედ ისეთ ნეგატიურ ეკოლოგიურ შედეგამდე, როგორც არის ნიადაგის ჰუმუსოვანი ფენის გადარეცხვა და შესაბამისად ნიადაგის ნაყოფიერების შემცირება, მისი დეგრადაცია, რომლის გამომწვევ მიზეზს ირიგაციული ეროზია წარმოადგენს.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, რწყვის რეჟიმის ისეთი ინტეგრირებული მოდელის შემუშავება, რომელიც საშუალებას მოგვცემს რწყვის პარამეტრების განსაზღვრის დროს გათვალისწინებულ იქნას აგროკლიმატური მონაცემები და ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლები გარემოს

პროგრამული მოსავლის მიღების მაქსიმალური საიმედოობითა და გარემოს ეკოლოგიური წონასწორობის მაქსიმალური შენარჩუნებით, რაც ძირითადად გულისხმობს ნიადაგების ნაყოფიერების შენარჩუნებას ირიგაციული ეროზიის მინიმუმამდე დაყვანის გზით, თანამედროვეობის ერთ-ერთ ყველაზე აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

**სამუშაოს მიზანი.** ჩვენი კვლევის მიზანს წარმოადგენდა რწყვის რეჟიმის პარამეტრების განსაზღვრა მცენარის წყალმოთხოვნილების (ევაპოტრანსპირაციის), წყალ-ჰაეროვანი რეჟიმების, ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლებისა და ბუნებრივ-კლიმატური ფაქტორების გათვალისწინებით, რაც უზრუნველყოფს სარწყავი წყლის ოპტიმალურ გამოყენებას, პროგრამული მოსავლის მიღებასა და აგროეკოსისტემების წონასწორობის მაქსიმალურ შენარჩუნებას.

აღნიშნული მიზნის მისაღწევად შესრულებულ იქნა შემდეგი ძირითადი სამუშაოები:

- ✓ შერჩეული საცდელი პოლიგონის ნიადაგის ტენიანობის დინამიკის სურათის დადგენის მიზნით ნიადაგის რეოლოგიური, ფიზიკური, მექანიკური, ქიმიური და წყლოვანი თვისებების შესწავლა;
- ✓ ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრისათვის კლიმატური პირობების (ჰაერის ტემპერატურა, ტენიანობა, ქარის სიჩქარე, რადიაციული ფონი და სხვა.) შესწავლა;
- ✓ ევაპოტრანსპირაციისა და ნიადაგის ტენის დინამიკის გათვალისწინებით რწყვის რეჟიმის ოპტიმალური პარამეტრების ექსპერიმენტული კვლევა-დაზუსტება;
- ✓ ირიგაციულ ეროზიაზე რწყვის რეჟიმის გავლენის თეორიული კვლევა.

**კვლევის ობიექტი და მეთოდები.** ჩვენი კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა ქვემო ქართლის მარნეულის რაიონის ლომთაგორას სასოფლო-სამეურნეო სავარგულები.

კვლევის პერიოდში ჩატარებული თეორიული, ლაბორატორიული და საველე-ნატურული ექსპერიმენტების დროს გამოყენებულ იქნა სასოფლო-სამეურნეო ჰოდროტექნიკურ მელიორაციაში, ნიადაგმცოდნეობაში, აგრონომიაში, საინჟინრო ჰიდროლოგიაში, ჰიდრაულიკაში და გრუნტების მექანიკაში საყოველთაოდ აღიარებული სამეცნიერო-ტექნიკური მიდგომები და მეთოდები.

აღნიშნულთან ერთად, ევაპორანსპირაციის გამოსათვლელად, ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა FAO-ს მიერ რეკომენდებული და მსოფლიო პრაქტიკაში აღიარებული კომპიუტერული პროგრამა AquaCrops-ი.

#### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:**

- მიღებულია, ნიადაგში წყლის ორთქლის საანგარიშო ხარისხობრივი ემპირიული დამოკიდებულებები, ნიადაგში წყლის ორთქლის ადსორბცია-დესორბციის დადგენის მეშვეობით;
- რწყვის რეჟიმის პარამეტრების დასაზუსტებლად და მაღალი მოსავლის მისაღებად, ნიადაგების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია საკვლევი ობიექტის ნიადაგების მოცულობითი მასა;
- ექსპერიმენტალური მონაცემებით განსაზღვრულია სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის მნიშვნელობა. ჩატარებული კვლევის შედეგად განხორციელდა მიღებული წყალმოთხოვნილების ფორმულის ექსპერიმენტული შემოწმება და შემდგომი განზოგადება ნიადაგების რწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში, ნიადაგის ზღვრული ტენტევალობის 60%-ის, 70% და 80%-ის ვარიანტების დროს;
- ცდის პირობებში განსაზღვრულია რწყვის ვადების კორექტირება დეკადების მიხედვით, ჰაერის, ტემპერატურის, ნიადაგ-გრუნტებში საჭირო ჰაერის და წყლის შემცველობის, მოსული ნალექების სათანადო შეფასებითა და გათვალისწინებით.

- FAO-ს მიერ რეკომენდებული კომპიუტერული პროგრამა AquaCrops-ი, მეშვეობით მოვახდინეთ კონკრეტული რეგიონის კლიმატური მონაცემების დამუშავება და ევაპოტრანსპირაციის გაანგარიშება, კონკრეტული ნიადაგური მონაცემებისა და მცენარის წყალმოთხოვნილების გათვალისწინებით.
- განსაზღვრულია წყლის ჩამონადენის ბალანსის განტოლება, სადაც შესაბამისი დაშვებების და მათემატიკური გარდაქმნების საფუძველზე მიღებულია დამოკიდებულება, რომელიც ითვალისწინებს ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტის ცვალებადობას ჩაჟონვის სიღრმის მიხედვით;
- დასაბუთებულია, დაწნევის გრადიენტის გათვალისწინების აუცილებლობა წყლის ნაკადის გარბენის სიღრმის განსაზღვრისას;
- ნიადაგ-გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური შემადგენლობის, ნაკადის გარბენის სიღრმისა და მიწოდებული წყლის მოცულობის გათვალისწინებით მიღებულია რწყვის ნორმის საანგარიშო დამოკიდებულება.
- ნიადაგ-გრუნტების სპეციფიკური თვისებების გათვალისწინებით მიღებულია სარწყავი წყლის დასაშვებ სიჩქარეთა საანგარიშო კორექტირებული დამოკიდებულება, რაც უზრუნველყოფს ირიგაციული ეროზიის პროგნოზის მაღალ საიმედოობას.

**შედეგების გამოყენების სფერო.** სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში შემუშავებული ოპტიმალური რწყვის რეჟიმის რეკომენდაციები ბუნებრივ-კლიმატური პირობების, ნიადაგის თვისებების და სხვადასხვა სასოფლო სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების გათვალისწინებით მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს საქართველოს აგროსექტორის განვითარებას და კერძოდ, სარწყავი მიწათმოქმედების გაუმჯობესებას. ცალკეული კონკრეტული ამოცანების შედეგები დიდ დახმარებას გაუწევს ჰიდროტექნიკურ მელიორაციაში, აგრომელიორაციაში, ნიადაგმცოდნეობაში, აგრონომიაში და მრავალ სხვა დარგში მოღვაწე მეცნიერებს სამომავლო კვლევების განხორციელებაში.

**დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა.** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, სამი თავისაგან, ძირითადი დასკვნებისა და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. იგი მოიცავს 105 ნაბეჭდ გვერდს, რომელშიც შედის 10 ნახაზი და 15 ცხრილი, გამოყენებულია 79 დასახელების ლიტერატურა.

## თავი I

### სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის რეჟიმის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა

#### 1.1 რწყვის რეჟიმის პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებების ანალიზი

სასოფლო-სამეურნეო კულტურების ზრდა-განვითარებასა და მოსავლის ფორმირებაში გადამწყვეტ როლს ასრულებს სინათლე, სითბო, საკვები, ჰაერი, წყალუზრუნველყოფა, ტენიანობა და სხვა ფაქტორები. ამ ფაქტორებიდან განსაკუთრებული როლი წყალუზრუნველყოფის ფაქტორს ენიჭება, რაც თავის მხრივ გამოირიცხავს ისეთი უარყოფითი შეუქცევადი პროცესების წარმოშობას როგორცაა: დაჭაობება-დამლაშება, ნიადაგური საფარის ეროზია და ა.შ.

სასოფლო-სამეურნეო კულტურათა წყალმოთხოვნილება ბუნებრივ პირობებში შეიძლება დაკმაყოფილებულ იქნეს ნიადაგში არსებული ტენისა და ატმოსფერული ნალექების ხარჯზე, მაგრამ მშრალ პერიოდებში ტენის ეს რაოდენობა ხშირად საკმარისი არ არის და ამიტომ საჭიროა რწყვის ჩატარება.

აკად. ა. კოსტიავოვი [1] ტერიტორიის წყლის რეჟიმის შესაფასებლად იძლევა შემდეგ ფორმულას რასაც მან „მოცემული ტერიტორიის წყლის ბალანსის კოეფიციენტი“ უწოდა:

$$K = \frac{\mu P}{E}, \quad (1.1)$$

სადაც:  $P$  არის განსახილველ პერიოდში მოსული ატმოსფერული ნალექების რაოდენობა, მმ;

$\mu$  - დაკავების კოეფიციენტი რომელიც, გვიჩვენებს

მოსული ნალექების იმ ნაწილს, რომლის დაკავებაც შეუძლია ნიადაგს და დაახლოებით შეადგენს 0,5...0,7; მთაგორიან ადგილებში იგი გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ვაკე ადგილებში, თიხნარ ადგილებში, სადაც წყალჟონვადობა ნაკლებია, ეს კოეფიციენტი უფრო მცირეა, ვიდრე მსუბუქი შედგენილობის ნიადაგში;

$E$  - გვიჩვენებს იმავე პერიოდში ნიადაგიდან აორთქლებული წყლის რაოდენობას (მმ).

$$E = 100t\left(1 - \frac{r}{100}\right) \quad (მმ)$$

სადაც:  $t$  არის მოცემული პერიოდის საშუალო წლიური ტემპერატურა, მმ;

$r$  - ამავე პერიოდში ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, %.

ა. კოსტიაკოვი [1] პირველი იყო, რომელმაც ჯამური წყალმოთხოვნილება დაუკავშირა მოსავლიანობას ემპირიული ფორმულით:

$$E = K_a \cdot Y, \quad (1.2)$$

სადაც:  $E$  არის კულტურის წყალმოთხოვნილება 1 ჰა-ზე მთელი სავეგეტაციო პერიოდის განმავლობაში, მ<sup>3</sup>/ჰა;

$K_a$  - წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტი, ანუ ხვედრითი ჯამური წყალმოთხოვნილება მოსავლის ერთეულზე, მ<sup>3</sup>/ტ.

$Y$  - კულტურის საპროექტო მოსავლიანობა, მ<sup>3</sup>/ჰა;

ი. ჩხენკელის [2] მიერ ნიადაგის გარკვეულ ფენაში ტენის მარაგი  $W$  განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$W = 100H\gamma r \quad (1.3)$$

სადაც:  $H$  არის ნიადაგის აქტიური ფენის სისქე, მმ;

$\gamma$  - ნიადაგის მოცულობითი მასა, გრ/სმ<sup>3</sup>;

$r$  - ნიადაგის ტენის რაოდენობა პროცენტებში.



სასოფლო-სამეურნეო კულტურებით დაკავებული ფართობიდან ნიადაგის ტენი იხარჯება ევაპორანსპირაციაზე და დამოკიდებულია ბუნებრივ - კლიმატურ პირობებზე, მცენარის სახეობაზე და მისი განვითარების ფაზებზე.

წყლის უზრუნველყოფის შესაფასებლად არსებობს გ. სელიანოვის მეთოდი, რომლის გამოკვლევის საფუძველზე წყლის ხარჯვის მაჩვენებლად მიღებულია ზაფხულის სამი თვის ტემპერატურათა ჯამი შემცირებული ათჯერ, რის საფუძველზეც გ. სელიანოვმა [3] წყლის ბალანსი გამოსახა შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\frac{\sum P}{\sum t:10} = \frac{\sum P}{\sum t} \quad (1.4)$$

სადაც:  $\sum P$  არის ატმოსფერული ნალექების ჯამი;

$\sum t$  - ტემპერატურათა ჯამი;

10 - ზაფხულის სამი თვის ტემპერატურათა ჯამის შემცირებული რაოდენობა.

გ. სელიანოვმა [3] აღნიშნული წყლის ბალანსის საშუალებით გამოყო რვა ზონა:

1. მშრალი, განსაკუთრებით სარწყავი ზონა, როდესაც წყლის ბალანსი  $K = \frac{\sum P}{\sum t:10} < 0.6$  – ზე;
2. ძლიერგვალვიანი, როდესაც წყლის ბალანსი მერყეობს 0.6-0.8-მდე;
3. გვალვიანი 0.8-1.0;
4. არასაკმაოტენიანი 1.0-1.2;
5. ზომიერტენიანი 1.2-1.6;
6. ტენიანი 1.6-2.0;
7. ჭარბტენიანი 2.2-2.4;
8. მეტისმეტად ტენიანი  $> 2.4$ .

გ. სელიანოვის წყლის ბალანსის ფორმულაში კ. კელენჯერიძის [4] მიერ შეტანილია ცვლილება ქარების ზეგავლენის ასახვის მიზნით.

დასავლეთ საქართველოსათვის:

$$K_1 = \frac{\sum P}{\frac{\sum t^3}{8} \sqrt{1 + \frac{U}{2}}} \quad (1.5)$$

აღმოსავლეთ საქართველოსათვის:

$$K_2 = \frac{\sum P}{\frac{\sum t}{8} (1 + \frac{U}{2})} \quad (1.6)$$

$\sum P$  არის ატმოსფერული ნალექების ჯამი;

$\sum t$  - ტემპერატურათა ჯამი;

$U$  - ქარის საშუალო სიჩქარე.

მცენარის ჯამური წყალმოთხოვნილების საანგარიშო დამოკიდებულება საქართველოს პირობებისათვის პროფ. ი. ჩხენკელმა [2] შემოგვთავაზა შემდეგი სახით:

$$E = K_{\text{წმ}} \sum D \quad (მმ), \quad (1.7)$$

სადაც:  $K_{\text{წმ}}$  არის წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტი.

$\sum D$  - ჰაერში წყლის დეფიციტი მმ;

ი. ჩხენკელმა [4] წყლის ბალანსი გამოსახა შემდეგი დამოკიდებულებით, რასაც ჰაერში წყლის დეფიციტის სიმძაფრის კოეფიციენტი უწოდა:

$$K_{\text{ს}} = \frac{\sum D}{\sum P}, \quad (1.8)$$

სადაც:  $\sum D$  არის ჰაერში წყლის დეფიციტის ჯამი;

$\sum P$  - ატმოსფერული ნალექების ჯამი;

ნიადაგში ოპტიმალური ტენიანობის დაცვის პირობებში, ტენიანობის ხარჯვის დინამიკის სურათს სრულად გამოხატავს ჰაერში ტენიანობის დეფიციტის დინამიკა. მათ შორის არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება, რომელიც აისახება მცენარის წალმოთხოვნილებაზე.

მრავალწლიური მეტეოროლოგიური მონაცემების დამუშავებისას დადგინდა, რომ წყლის რაოდენობის დეფიციტი ვეგეტაციური განვითარებისას დამოკიდებულია კლიმატურ თვისებებზე [5]:

$$M_{სავ.ბალ.} = 10K_1 \cdot K_2(E_0O), \quad (1.9)$$

- სადაც:  $K_1$  არის კულტურის ბიოლოგიური კოეფიციენტი;  
 $K_2$  - კოეფიციენტის მნიშვნელობა შერჩეულია ნიადაგის საშუალო გრანულომეტრიული შემადგენლობის მიხედვით, გრუნტის ღრმა წყლების დროს.  
 $E_0$  - აპრილ-სექტემბრის თვიური აორთქლება, მმ;  
 $O$  - ნალექები, მმ;

ვ. შრედერის და სხვ. [6] შრომაში მითითებულ რწყვის ნორმის საანგარიშო ემპირიულ დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს:

$$M = 10K_1 \cdot K_2(E_0O), \quad (1.10)$$

- სადაც:  $K_1$  არის სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ნიადაგ-კლიმატურ პირობებზე;  
 $K_2$  - კოეფიციენტი, დამოკიდებულია ნიადაგის თვისებებზე;  
 $E_0$  - ზედაპირული წყლის აორთქლება, მმ;  
 $O$  - ნალექები, მმ.

ვ. შრედერის და სხვ. [6] შრომის ანალიზისას, გადახედვას მოითხოვს პარამეტრები, რომლებიც მნიშვნელოვანია რწყვის ნორმის დასადგენად. (1.10) დამოკიდებულების  $K_1$  ემპირიული კოეფიციენტის დახვეწა შეიძლება მიღწეულ იქნეს მხოლოდ წყლის ბალანსის დეფიციტის შედარებითი ანალიზით იმ კონკრეტული წლის განმავლობაში, როდესაც ექსპერიმენტები ჩატარდება.

ფ. ზედელმანის [7] მიერ მოღვაწით რწყვის ნორმა განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$M_R = (HBW_{\theta})K_3 + \delta (EO), \quad (1.11)$$

- სადაც:  $HB$  არის ტენტევალობა, მმ;  
 $W_{\theta}$  - ტენის მარაგი ნიადაგში, მმ;  
 $K_3$  - რწყვის ნორმის ზრდის კოეფიციენტი,

დამოკიდებულია ნიადაგის გამორეცხვასა და მარილიანობაზე;

$\delta$  - რწყვის ნორმის ზრდის ემპირიული კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია წყლის ბალანსის დეფიციტზე სავეგეტაციო პერიოდში, ( $\delta = 1$ ).

$E$  - ჯამური აორთქლება;

$O$  - ნალექები, მმ;

ი. ჩხენკელის [2] მიერ რწყვის ნორმა იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$M = E - \mu P - W_{\text{წ}} - W_{\text{გრ}}, \quad (1.12)$$

სადაც:  $M$  არის რწყვის ნორმა, მ<sup>3</sup>/ჰა;

$E$  - სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილება სავეგეტაციო პერიოდის განმავლობაში, მ<sup>3</sup>/ჰა;

$\mu$  - ატმოსფერული ნალექების დაკავების კოეფიციენტი;

$P$  - სავეგეტაციო პერიოდში მოსული ატმოსფერული ნალექების რაოდენობა მმ;

$W_{\text{წ}}$  ნიადაგში არსებული წყლის მარაგიდან გამოყენებული წყალი, მ<sup>3</sup>/ჰა;

$W_{\text{გრ}}$  სავეგეტაციო პერიოდში მცენარის მიერ გამოყენებული გრუნტის წყალი, მ<sup>3</sup>/ჰა.

აღნიშნული მოთხოვნების გათვალისწინებით ი. ჩხენკელის [2] რწყვის ნორმის საანგარიშო დამოკიდებულება გამოისახება შემდეგნაირად:

$$m = 100 \cdot H \cdot \gamma (r_{\text{ზღ}} - r_{\text{ზღ}} 80\%), \quad (1.13)$$

სადაც  $H$  არის ნიადაგის აქტიური ფენის სისქე, ანუ იმ ფენის, სადაც ფესვთა სისტემის ძირითადი მასაა განლაგებული და რომელიც ექვემდებარება გატენიანებას საჭირო რწყვის ნორმით, მ;

აქტიური ფენის სისქე სხვადასხვა

კულტურებისათვის სხვადასხვაა და შეადგენს:  
 ბოსტნეული კულტურებისათვის - 0,3..0,5 მ;  
 მინდვრის კულტურებისათვის - 0,6..0,8 მ;  
 მრავალწლიანი კულტურებისათვის - 0,7..1,0 მ.

$\gamma$  - ნიადაგის მოცულობითი წონა (გ/სმ<sup>3</sup>) და მერყეობს 0,5...1,5 ფარგლებში;

$r_{\text{ზღ}}$  - რწყვის წინ ნიადაგში დასაშვები ტენის რაოდენობა;

$r_{\text{ზღ}80\%}$  - ნიადაგში ტენის სასურველი მინიმუმი.

ერთი და იგივე მცენარისათვის აქტიური ფენის სისქე იცვლება განვითარების ფაზების მიხედვით და აღნიშნული გრადაციები აქტიური ფენის სიღრმეებისა დამახასიათებელია მცენარის მაქსიმალური განვითარების პერიოდისათვის.

უნდა აღინიშნოს, რომ რწყვის ნორმაზე გავლენას ახდენენ სხვადასხვა ფაქტორები და ამიტომ (1.13) ფორმულით გამოთვლილი სიდიდეები საჭიროებენ კორექტირებას.

ამიტომ, აღნიშნული გარემოების გათვალისწინებით, თავიდანვე მიეწოდება ნიადაგს 10...15%-ით მეტი წყალი და, შესაბამისად რწყვის ნორმის ფორმულა (1.13) კორექტირების შედეგად იღებს შემდეგ სახეს [2]:

$$m = 100 \cdot K \cdot H \cdot \gamma (r_{\text{ზღ}} - r_{\text{ზღ}80\%}) \text{ მ}^3 / \text{ჰა}. \quad (1.14)$$

რწყვის ნორმები მნიშვნელოვანწილადაა დამოკიდებული რწყვის ტექნიკასა და აგროტექნიკურ ღონისძიებებზე. მათი სრულყოფა რწყვის ნორმების ოპტიმალურ სიდიდემდე შემცირების საშუალებას იძლევა.

თუ რწყვათა შორის პერიოდში მოვიდა ატმოსფერული ნალექები, მათი ნაწილი რაოდენობა ჩაიჭონება ნიადაგში და გაზრდის მასში წყლის მარაგს. ამ შემთხვევაში რწყვათაშორის პერიოდში სულ დაიხარჯება  $m + 10\mu P$  მ<sup>3</sup> წყალი, სადაც  $m$ - მორწყვის ნორმაა, 10 - გადასაყვანი კოეფიციენტი მმ-დან მ<sup>3</sup>-ში,  $P$  არის ატმოსფერული ნალექები. თუ წყლის საშუალო დღიურ ხარჯვას აღვნიშნავთ  $l$ -ით, მაშინ რწყვათაშორისი პერიოდის დასადგენად გ. ტულუში [8] იძლევა შემდეგ ფორმულას:

$$t = \frac{m+10\mu P}{l}. \quad (1.15)$$

ე.ი. მორწყვა უნდა ჩატარდეს  $t$  დღის შემდეგ.

რწყვის დადგენის საუკეთესო და ზუსტ წესად ითვლება ვეგეტაციის პერიოდის განმავლობაში ნიადაგში აქტიური ფენის ფარგლებში ტენიანობის დინამიკაზე დაკვირვება ტენსაზომის საშუალებით და როგორც კი იგი მიუახლოვდება ზღვრული წყალტევადობის 80%, საჭიროა რწყვის ჩატარება. თუ გარკვეული რეგიონში სასოფლო-სამეურნეო კულტურას დიდი ფართობი უკავია, მისი ერთ დღეში მორწყვა შეუძლებელია და ამ შემთხვევაში უნდა დავადგინოთ რწყვის პერიოდი, ე.ი. დღეთა ის რაოდენობა, რომლის განმავლობაშიც უნდა ჩატარდეს მორიგი მორწყვა კულტურით დაკავებულ მთელ ფართობზე. ცხადია, რაც უფრო მცირეა რწყვის პერიოდის ხანგრძლივობა, მით უკეთესია კულტურისათვის, ვინაიდან იგი თანაბრად განვითარდება მთელ ფართობზე.

ბოსტნეული კულტურებისათვის, განსაკუთრებით ზაფხულის პერიოდში, ნიადაგის ტენიანობა ყოველთვის უნდა შენარჩუნდეს ოპტიმალურ დონეზე 80 %-ის ფარგლებში, რათა მივიღოთ მაღალი მოსავალი. ამავე დროს, ისიც გასათვალისწინებელია, რომ ჭარბტენიანობაც მავნებელია მცენარისათვის, რადგან მოსავალი კარგავს შაქრის შემცველობას, სასარგებლო მაკრო და მიკრო ელემენტებს. სწორედ ამიტომ მნიშვნელოვანია განისაზღვროს ოპტიმალური რწყვის ნორმა [9]:

$$M = 100 \cdot H \cdot A(B - B_i), \quad (1.16)$$

სადაც:  $H$  არის ნიადაგის აქტიური ფენის სისქე, სადაც ფესვთა სისტემის ძირითადი მასაა განლაგებული მ;  
 $A$  - ნიადაგის მოცულობითი მასა (გ/მ<sup>3</sup>);  
 $B_i$  - რწყვის წინ ნიადაგის ტენიანობა;  
 $B$  - ნიადაგის ფენაში მინიმალური ტენიანობა %-ში (მშრალი ნიადაგის მასის %).

ა.ტიშენკოს [10] მიერ სავეგეტაციო პერიოდში რწყვის ნორმა გამოითვლება შემდეგი ფორმულით, რომელიც საშუალებას იძლევა შეინარჩუნოს და გაზარდოს ნიადაგის ნაყოფიერება და სარწყავი წყალი გამოიყენოს რაციონალურად:

$$m = 250 \cdot (H - 0.5) \text{ მ}^3 / \text{ჰა}, \quad (1.17)$$

სადაც:  $H$  არის გრუნტის წყლის სიღრმე რწყვის დღეს, (მ).

ხოლო ტენდაგროვებითი რწყვის ნორმა გაიანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$M_{\text{ტენდაგრ.}} = HB_a - B_a \text{ მ}^3 / \text{ჰა}, \quad (1.18)$$

სადაც  $HB_a$  არის  $HB$  გრუნტის წყლის დონე  $a$  ფენაში,  $\text{მ}^3/\text{ჰა}$ ;  
 $B_a$  - ტენის საერთო მარაგი ნიადაგის  $a$  ფენაში მორწყვის წინ,  $\text{მ}^3/\text{ჰა}$ ;

ამასთან  $a$  განისაზღვრება ფორმულით:

$$a = 0.4 \cdot (H - 0.5) - 0.2 \text{ მ},$$

$H$  არის გრუნტის წყლების დონე მორწყვის წინ, ტენის მარაგის დადგენის დღეს.

დ. მარსელისა და ს. ტუდორის [11] შრომებიდან ირკვევა, რომ ჩატარებული კვლევის საფუძველზე მიიღეს გაზრდილი მოსავალი ორი კულტურიდან (კიტრი და პომიდორი) სარწყავი წყლის ეფექტურად და ეკონომიკურად გამოყენების შემთხვევაში შემდეგი ფორმულის მეშვეობით:

$$m = 100 \cdot H \cdot DA(CC - P_{mom}) + lost(\text{მ}^3), \quad (1.19)$$

სადაც:  $H$  არის ნიადაგის აქტიური ფენის სისქე (მ);

$DA$  - ნიადაგის მოცულობითი მასა ( $\text{გ}/\text{მ}^3$ );

$CC$  - მინდორში მარილიანი წყლის მოცულობა (% მშრალი მარილის წონასთან);

$P_{mom}$  - გრუნტის წყლების მარაგი მოკლე დროისათვის (%-  
მშრალი მარილის წონასთან);

$lost$  - დანაკარგები;

$$M_1 = m \cdot P \quad (1.20)$$

სადაც  $m$  არის რწყვის ნორმა ტრადიციული რწყვის შემთხვევაში;  
 $P$  - ტენიანი ზედაპირის საერთო ფართობი პროცენტულად.

ვ. შრედერის და სხვ. [6] მიხედვით რწყვის ნორმა განისაზღვრება ნიადაგის ტენიანობის, აორთქლების, არასავეგეტაციო რწყვის პერიოდის, ფილტრაციისა და რწყვისას ზედაპირული გაბნევის გათვალისწინებით, შემდეგი ფორმულით:

$$M_{ტენ} = 10E_{არ.სავგ} K_2 \cdot O_{არ.სავგ} + P_{ზ.ჩ}, \quad (1.21)$$

სადაც:  $E_{არ.სავგ}$  - არასავეგეტაციო პერიოდის ჯამური აორთქლება;  
 $O_{არ.სავგ}$  - არასავეგეტაციო პერიოდის ნალექების რაოდენობა.

სარწყავი ნორმით გათვალისწინებული წყლის რაოდენობა სავეგეტაციო პერიოდში ნაწილ-ნაწილ, დროის გარკვეულ მონაკვეთებში, რწყვის ნორმების სახით მიეწოდება ნიადაგს, ისე, რომ ნიადაგში არ დაირღვეს აერაციის ნორმალური პირობები და მცენარის კვების რეჟიმი, რომელიც ა. კოსტიაკოვმა [1] გამოსახა შემდეგი ფორმულით:

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots m_n, \text{ მ}^3/\text{ჰა}, \quad (1.22)$$

სადაც:  $M$  არის სარწყავი ნორმა, მ<sup>3</sup>/ჰა;

$m$  - რწყვის ნორმა დროის გარკვეულ მონაკვეთში, მ<sup>3</sup>/ჰა;

რწყვის ნორმა დადგენილია ნიადაგის აქტიური შრის ზღვრული წყალტევადობის, ნიადაგის მოცულობითი მასის ინდექსის მიხედვით და ნაკლებად ითვალისწინებს მცენარის წყალმოთხოვნილებას არსებული ნორმატული მითითებებისა და რეკომენდაციების მიხედვით [1,2,7,12,13,14,15]. სწორედ ამიტომ, საჭიროა რწყვის ნორმა განისაზღვროს



მცენარის რეალური ფიზიკური წყალმოთხოვნილების მიხედვით, რაც უზრუნველყოფს სარწყავი წყლის მაღალეფექტურად გამოყენებას და შესაბამისად სარწყავი ზონების აგროეკოსისტემების წონასწორობის მაქსიმალურ შენარჩუნებას [6,16,17,18].

ვ. შრედერს და სხვ. [6] შრომაში მიღებული აქვთ სარწყავი ნორმის საანგარიშო შემდეგი დამოკიდებულება:

$$M = 10K_1K_2K_3E + P_{\text{ზ.ბ}}KO \text{ მ}^3/\text{ჰა}. \quad (1.23)$$

სადაც: 10 არის გადამყვანი კოეფიციენტი;

$K_1$  კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნიადაგის წყლოვან და ფიზიკურ თვისებებს;

$K_2$  - კოეფიციენტი, ითვალისწინებს ჩაჟონვას ავტომორფულ პირობებში ან დრენაჟულ ჩამონადენს;

$K_3$  - კოეფიციენტი, ითვალისწინებს სარწყავი კულტურების ტიპებს და სავეგეტაციო პერიოდის ხანგრძლივობას;

$E$  - ჯამური აორთქლება, რომელიც ტოლია  $E = E_0 51.58/31.62$  მმ ვეგეტაციის პერიოდში ყოველთვიურად;

$P_{\text{ზ.ბ}}$  - ზედაპირული ჩამონადენის სიდიდე;

$K$  - გრუნტის წყლის სიდიდე;

$O$  - ნალექი, მმ.

ს.ნ.რიჟოვის [19] მიერ შემოთავაზებული რწყვის ნორმა დამოკიდებულია ნიადაგის ტიპზე (მექანიკური შედგენილობაზე), ნიადაგის ტენიანობაზე, გრუნტის წყლის დონეზე, სასოფლო-სამეურნეო კულტურის სახეობაზე, და გამოსახება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$W = (V_1 \cdot P - V_2 \cdot P)h + K \text{ მ}^3/\text{ჰა}, \quad (1.24)$$

სადაც:  $W$  არის რწყვის ნორმა,  $\text{მ}^3/\text{ჰა}$ -ზე;

$V_1$  - ნიადაგის ტენიანობა, %-ში მოცულობით მასასთან;

$P$  - ნიადაგის მოცულობითი წონა;

- $V_2$  - ნიადაგის აქტიურ ფენაში პირველი მორწყვის წინ არსებული წყლის მარაგი;
- $h$  - ნიადაგის ფენის სისქე, მმ.
- $K$  - წყლის დანაკარგები აორთქლებასა და ფილტრაციაზე, როდესაც რწყვის წინ ნიადაგის ტენიანობის დეფიციტი 25% -ია.

(1.24)- ფორმულიდან გამომდინარე:

$$K = (V_1 \cdot P - V_2 \cdot P) \cdot h \cdot 0,25. \quad (1.25)$$

ცნობილია, რომ ნიადაგის ტენიანობის დეფიციტი არის ევაპოტრანსპირაციის შედეგი, ყველა გამოთვლა დამოკიდებულია ინდიკატორზე, კერძოდ ევაპოტრანსპირაციის სიდიდეზე:

$$W_{2-n} = (\sum E_i \cdot 10) + K, \quad (1.26)$$

სადაც:  $W_{2-n}$  არის სარწყავ სავარგულებზე პირველი ჩატარებული რწყვის ნორმა, შემდგომი მეორე და ა.შ., მ<sup>3</sup> / ჰა;

$\sum E_i$  - ყოველდღიური აორთქლება;

$K$  -  $K = (\sum E_i \cdot 10) \cdot 0,25$ , 25%-ი დეფიციტი მთლიანი საანგარიშო პერიოდის განმავლობაში.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ სარწყავი წყლით უზრუნველყოფა იცვლება სხვადასხვა კულტურებისათვის ვეგეტაციის მთელ პერიოდში.

## 1.2 ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრის მეთოდები და მისი გავლენა რწყვის რეჟიმზე

სასოფლო-სამეურნეო კულტურების ზრდა-განვითარების დინამიკურ პროცესზე მრავალრიცხოვან ჰიდრომეტეოროლოგიური ფაქტორებიდან განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს კომპლექსური მახასიათებლის, წყლის ბალანსის ძირითადი ხარჯვითი კომპონენტის ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრა.

ტრანსპირაციაზე უშუალო გავლენას ახდენს მცენარის განვითარების სტადიები. მაღალი გამტარობით ხასიათდება მცენარის ყველაზე უფრო ახალგაზრდა უჯრედები, ხოლო მცენარის განვითარების მომდევნო სტადიებზე პროტოპლაზმის შემცირების გამო მცირდება გამტარობაც, რის შედეგად ქვეითდება მცენარეებში წყლის გადაადგილება. მცირდება უჯრედების მიერ წყალგაცემა და ეცემა წყლის ორთლადქცევის ინტენსივობა.

მრავალი მკვლევარის მოსაზრებით არ არის აუცილებელი დამატებით გავითვალისწინოთ ნიადაგისა და აგროტექნიკის გავლენა ევაპოტრანსპირაციის პროცესზე [20, 21], მაგრამ არსებობს საწინააღმდეგო აზრის მქონე მეორე მკვლევართა ჯგუფის მოსაზრებებიც, რომლებიც ექსპერიმენტალურ მონაცემებზე დაყრდნობით ამტკიცებენ, რომ ბიოლოგიური მოსავლის გაზრდა იწვევს ევაპოტრანსპირაციის გაზრდას [22÷26].

ფაქტობრივად აორთქლებული წყლის რაოდენობა (ატმოსფერული ნალექების მხედველობაში მიღებით), დროის გარკვეული მონაკვეთის საწყისი და ბოლო მომენტისათვის, ნიადაგის შესაბამისი ტენიანობის მიხედვით გაიანგარიშება შემდეგი ფორმულის საფუძველზე [20]:

$$E = W_b + \mu P + m + W_g, \quad (1.2.1)$$

სადაც:  $W_b$  და  $W_g$  შესაბამისად, საანგარიშო წყლის მარაგია ნიადაგის აქტიურ ფენაში) განსახილველი პერიოდის დასაწყისსა და ბოლოში;

$P$  - მოსული ატმოსფერული ნალექები ამავე პერიოდში;

$m$  - მიწოდებული წყლის რაოდენობა;

$\mu$  - ატმოსფერული ნალექების დაკავების კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით:

$$\mu = \frac{100 \gamma H (r_{\text{ზღ}} - r)}{P}, \quad (1.2.2)$$

სადაც:  $\gamma$  არის ნიადაგის მოცულობითი მასა;

- $H$  - ნიადაგის აქტიური ფენა;
- $r_{ზღ}$  - ნიადაგის ზღვრული ანუ უმცირესი წყალტევადობა;
- $r$  - ნიადაგის ტენიანობა საანგარიშო პერიოდის დასაწყისში.

$\Sigma D$  – განისაზღვრება მეტეოროლოგიური მონაცემებით, ხოლო  $K$ -საველე ექსპერიმენტების მიხედვით. ცხადია ამ ორი პარამეტრის შებმით ადვილად დგინდება  $E$ .

ფიზიკური არსით  $K$  (წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტი) წარმოადგენს ჰაერის დეფიციტს ერთეულზე დახარჯული წყლის რაოდენობას. ექსპერიმენტული კვლევებით დადგენილია, რომ სავეგეტაციო პერიოდში სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილება იცვლება. ი. ჩხენკელის [27]. მიერ მიღებულია  $K$  - კოეფიციენტის მნიშვნელობა, რომელიც გაზაფხულზე უდრის 0,6, ხოლო ზაფხულში - 0,5-ს.

წყალმოთხოვნილების მრავალწლიური საველე ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით მიღებულია წყალმოთხოვნილების განსაზღვრის ფორმულა [28]:

$$E = 2.76D^{-0.193}. \quad (1.2.3)$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის გადიდებასთან ერთად წყალმოთხოვნილება იზრდება.

გ. ტულუშს [28] საველე-ექსპერიმენტული გამოკვლევების მონაცემების მათემატიკური დამუშავების შედეგად მიღებული აქვს წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის განმსაზღვრელი ფორმულა:

$$K = AH^m. \quad (1.2.4)$$

ამ ფორმულიდან გამომდინარე, ო. ხარაიშვილმა [29] მიიღო შემდეგი დამოკიდებულება რომელიც, დამოკიდებულია ნიადაგის აქტიური შრის სიღრმეზე:

$$D = 2.76D^{0.193} \left(\frac{H_2}{6}\right)^{1.04} \quad (1.2.5)$$

დღემდე დიდი პოპულარობით სარგებლობს ა.მ. ალპატიევის [30] მეთოდი, რომლის მიხედვითაც აორთქლებადობა ანუ მცენარის წყალმოთხოვნილება განისაზღვრება შემდეგი სახის მარტივი ფორმულით:

$$E = KD7 \text{ ან } E = K \sum D, \quad (1.2.6)$$

სადაც:  $E$  არის წყალმოთხოვნილება, მმ;

$D$  - ჰაერის ტენიანობის დეფიციტი მმ;

$\sum D$  - მიწოდებული წყლის რაოდენობა;

$K$  - წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტი ანუ ბიოკლიმატური კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება საველე ექსპერიმენტის მონაცემების მიხედვით, საბალანსო გაანგარიშების საფუძველზე.

როგორც ცნობილია, ჯამური წყალმოხმარებისა (ევაპოტრანსპირაცია) და ჯამური აორთქლების სხვაობას წყალმოხმარების დეფიციტი წარმოადგენს:

$$\Delta E = ET_0 - ET$$

სადაც:  $ET_0$  არის ევაპოტრანსპირაცია ან სასოფლო-სამეურნეო კულტურის წყალმოხმარება საანგარიშო პერიოდში (მმ);

$ET$  - ჯამური აორთქლება ბუნებრივი გატენიანების პირობებში (მმ).

ამ განტოლებაში  $ET_0$ -ის მიხედვით ხდება კულტურის წყალმოთხოვნილების განსაზღვრა მაღალი მოსავლის მისაღებად.

ბოლო წლების მანძილზე მთელს მსოფლიოში, მეცნიერთა მიერ შემუშავებულია  $ET_0$ -ის გაანგარიშების უამრავი მეთოდი სხვადასხვა კლიმატური მონაცემის მიხედვით. ამა თუ იმ მეთოდის გამოცდა სხვადასხვა პირობებში საკმაოდ შრომატევადი პროცესია. ამ პრობლემის გადასაწყვეტად FAO-ს მიერ შემუშავებლ იქნა  $ET_0$ -ის განსაზღვრის შემდეგი

მეთოდები [30]: რადიაციული; პენმანის მეთოდი; მეთოდი ამართქლებლით; პენმან-მონტიეტის დაზუსტებული მეთოდი.

ევროკავშირის კვლევითი ინსტიტუტების მიერ განხორციელებულ კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით FAO-ს მიერ რეკომენდებული იქნა პენმან-მონტიეტის მეთოდი, როგორც ევაპოტრანსპირაციის განსასაზღვრის ერთადერთი სტანდარტული ხერხი, რომლის საანგარიშო დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს [30]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1.2.7)$$

სადაც:	$ET_0$	არის	საკონტროლო ევაპოტრანსპირაცია (მმ.დღე <sup>-1</sup> );
	$Rn$	–	კულტურის ზედაპირზე რადიაცია ნეტო (MJm <sup>-2</sup> დღე <sup>-1</sup> );
	$G$	–	ნიადაგის თბური ნაკადის სიმკვრივე (MJm <sup>-2</sup> დღე <sup>-1</sup> );
	$T$	–	საშუალო დღე-ღამური ტემპერატურა (°C);
	$u_2$	–	ქარის სიჩქარე 2 მ სიმაღლეზე (ms <sup>-1</sup> );
	$\Delta$	–	გაჯერებული ორთქლის წნევის მრუდის ქანობი (kPa °C <sup>-1</sup> );
	$\gamma$	–	ფსიქომეტრიული მუდმივა (kPa °C <sup>-1</sup> );
	$e_a$	–	ორთქლის ფაქტიური წნევა (kPa);
	$e_s$	–	გაჯერებული ორთქლის წნევა (kPa);
	$e_s - e_a$	-	გაჯერებული ორთქლის წნევის დეფიციტი (kPa).

აგრეთვე დიდი გამოყენება ჰპოვა სარწყავ მიწათმოქმედებაში ა. მ. ალაპატიევის ევაპოტრანსპირაციის გამოთვლის ბიოკლიმატურმა მეთოდმა ჯამური აორთქლების ბიოლოგიური კოეფიციენტების გათვალისწინებით. ამ მეთოდს საფუძვლად უდევს კავშირი წყალმოხმარებას, ჰაერის ტენიანობის დეფიციტსა და მოსარწყავი კულტურის ბიოლოგიურ

თავისუბერებებს შორის, რომელიც გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით [31]:

$$ET_0 = K_d \cdot \sum d; \quad ET_0 = K_t \cdot \sum t; \quad ET_0 = K_E \cdot E_m \quad (1.2.8)$$

სადაც:  $K_d, K_t$ , არის კულტურის წყალმოთხოვნილების  
 $K_E$  ბიოლოგიური (ბიოკლიმატური) კოეფიციენტი,  
 დამოკიდებულია ვეგეტაციის პერიოდზე;  
 $\sum d$  – ჰაერის ტენიანობის საშუალო დღეღამური  
 დეფიციტის ჯამი (მმ);  
 $\sum t$  – ჰაერის საშუალო დღე-ღამური ტემპერატურის  
 ჯამი განსახილველ პერიოდში ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $E_m$  – მაქსიმალურად შესაძლებელი აორთქლება (მმ).

სადაც, ბიოკლიმატური კოეფიციენტის გამოსათვლელად აღებულია აორთქლება, რომელიც იანგარიშება ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის მიხედვით:

$$K = \frac{E_g}{\sum d} \quad (1.2.9)$$

ხოლო, ა.რ. კონსტანტინოვის [32] მეთოდის მიხედვით მეტეოროლოგიურ მახასიათებლად მიღებულია ჰაერის ტემპერატურა და აბსოლუტური ტენიანობა:

$$K = \frac{E_g}{E_0} \quad (1.2.10)$$

დ. ბ. ციპრისის მიხედვით – ჰაერის ტემპერატურა:

$$K = \frac{E_g}{t + 22.5^{\circ}\text{C}} \quad (1.2.11)$$

სადაც:  $E_g$  არის ფაქტიური ჯამური აორთქლება დეკადაში (მმ);  
 $E_0$  – აორთქლება დეკადაში. განისაზღვრება ჰაერის ტემპერატურისა და აბსოლუტური ტენიანობის მიხედვით (მმ);

- $\Sigma d$  – ჰაერის საშუალო დღეღამური ტენიანობის დეფიციტის ჯამი დეკადაში (პა);
- $t$  – ჰაერის საშუალო დღეღამური ტემპერატურა დეკადაში ( $^{\circ}\text{C}$ ).

ბუნებრივი გატენიანება  $ET$  წარმოადგენს საანგარიშო პერიოდის დასაწყისში და ბოლოში არსებული ატმოსფერული ნალექებისა და ნიადაგის ტენის მარაგის ჯამის სხვაობას. რიგ შემთხვევაში, შესაძლებელია დამატებითი კვება ტენით, გრუნტის წყლების მეშვეობით, თუ იგი მაღალ დონეზეა განლაგებული. ამ შემთხვევაში, ჯამური აორთლება ბუნებრივი გატენიანების პირობებში, ნებისმიერ საანგარიშო პერიოდში შეადგენს [33]:

$$ET = P + (W_1 - W_2) + V_{გრ} + V_{ჯაბ} \quad (1.2.12)$$

- სადაც:  $P$  არის ეფექტური ატმოსფერული ნალექები (მმ);
- $W_1$  და  $W_2$  - ნიადაგის აქტიური ფენის ტენიანობა საანგარიშო პერიოდის დასაწყისსა და ბოლოში (მმ);
- $V_{გრ}$  - მცენარეების მიერ გამოყენებული გრუნტის წყლების რაოდენობა (მმ);
- $V_{ჯაბ}$  - ზედაპირისა და ნიადაგქვეშა ჩამონადენის ჯამი (მმ).

ატმოსფერული ნალექები წარმოადგენს ყველაზე ადვილად შესასწავლ მაჩვენებლს ბუნებრივ გატენიანებაში მონაწილე კომპონენტებს შორის და მონაცემების აღება შესაძლებელია ჰიდრომეტეო სადგურების მეშვეობით. ნიადაგის წყლის მარაგის განსაზღვრაც, აგრეთვე, შესაძლებელია აგრომეტეოროლოგიური სადგურების მეშვეობით.

ბუნებრივი გატენიანების პირობებში, ჯამური აორთქლების მახასიათებლების განსაზღვრავად მიზანშეწონილია ვ. ს. მეზენცევის [34] მეთოდის გამოყენება, რომლის მიხედვითაც, ჯამური აორთქლება იანგარიშება:

$$Et = E_m \cdot [1 + ((P + W_1 - W_2) / E_m)^{-n}]^{-1/n}, \quad (1.2.13)$$



სადაც,  $n$  პარამეტრიც განისაზღვრება ფაქტიური აორთქლებისა (ოპტიმალური ტენზორუნველყოფის პირობებში) და მაქსიმალურად შესაძლებელი აორთქლების ფარდობით.

წყალმობხმარების დეფიციტის განსაზღვრა წარმოებს დეკადების ან თვეების მიხედვით დაკვირვებების საფუძველზე. განსაზღვრული წყალმობხმარების დეფიციტი ჯამდება სასოფლო-სამეურნეო კულტურების სავეგეტაციო პერიოდების მიხედვით. მონაცემთა სტატისტიკური დამუშავების შედეგად ვლინდება წყალმობხმარების დეფიციტის 5%-იანი, 25, 50, 75 და 95%- იანი უზრუნველყოფა. ამასთან 5%-იანი წყალმობხმარების დეფიციტის უზრუნველყოფა შეესაბამება ძალიან მშრალ პერიოდს, 25 – საშუალოდ მშრალ, 50 – საშუალოს, 75 – საშუალოდ ტენიანს და 95 – ტენიანს [33].

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მრავალი მეცნიერის კვლევის შედეგების ანალიზის შედეგად მიღებულია, რომ სარწყავი მიწათმოქმედების პირობებში არსებობს სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის რეჟიმის განსაზღვრის თეორიული ხასიათის მრავალი მათემატიკური მოდელი, მაგრამ ყველაზე ზუსტად რწყვის რეჟიმის პარამეტრების დადგენა შესაძლებელია ემპირიული დამოკიდებულებების გამოყენებით, რომელიც ეყრდნობა უშუალოდ დაკვირვებებს.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, რწყვის რეჟიმის პარამეტრების დაზუსტება ევაპოტრანსპირაციისა და ნიადაგ-გრუნტების მახასიათებლების გათვალისწინებით აქტუალურ საკითხს წარმოადგენს.

### **1.3 რწყვის რეჟიმის გავლენა ირიგაციულ ეროზიაზე ნიადაგ-გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით**

საქართველოს იმ რაიონებში, სადაც ატმოსფერული ნალექები არასაკმარისი რაოდენობით მოდის, სასოფლო-სამეურნეო კულტურების

მაღალი და მყარი მოსავლის მიღების მიზნით, მორწყვას უძველესი დროიდან მიმართავენ. მორწყვით არეგულირებენ ნიადაგის ტენის რეჟიმს, რომელიც ნიადაგის ნაყოფიერების ერთ-ერთი ელემენტია და ამიტომაც იგი შეთანწყობილი უნდა იყოს ნიადაგის ნაყოფიერების განმსაზღვრელ სხვა ელემენტებთან.

სასოფლო-სამეურნეო კულტურების თვითდინებით მორწყვას ფართო გამოყენება აქვს. დადებით მხარეებთან ერთად მას უარყოფითი მხარეებიც გააჩნია. კერძოდ, რწყვისათვის წყლის დიდი რაოდენობით მიწოდება და ნიადაგის ზედაპირზე სარწყავი წყლის არათანაბარი განაწილება, რაც ე.წ. ირიგაციული ეროზიის განვითარებით ნიადაგის ზედა ნაყოფიერი ფენის ჩამორეცხვას იწვევს.

მორწყვამ რომ არ გამოიწვიოს ირიგაციული ეროზია, უნდა შეირჩეს მორწყვის ისეთი წესები, ტექნიკა და რეჟიმი, რომლის დროსაც გამოირიცხება ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირება. ირიგაციული ეროზია ინტენსიურად მიმდინარეობს კვლებში მიშვებით მორწყვისას. ამასთანავე, არ შეიძლება ერთსა და იმავე ფერდობზე ისეთი კულტურების მოყვანა, რომლებიც განსხვავდებიან მორწყვის ვადებითა და ნორმებით.

ყველა სახის წყლისმიერი ეროზია პირდაპირ მოქმედებს მიწის ათვისების ხარისხზე, ამავდროულად ეროზია ახდენს როგორც პირდაპირ, ასევე ირიბ ზეგავლენას მეწყერებზე, ღვარცოფებსა და სხვა ფერდობულ პროცესებზე [35].

ნიადაგის ეროზიის შესწავლას დიდი ადგილი აქვს დათმობილი ც. მირცხულავას, ი. ყრუაშვილის, დ. გუბელაძის, მ. დარასელიას, გ. ტალახაძის, გ. გოგოიჩაიშვილი, გ. ხარაიშვილის, ო. ზარდალიშვილის, გ. შვებსის, თ. ურუშაძის, და სხვათა შრომებში [35-50]. მიუხედავად იმისა, რომ მნიშვნელოვანი მოცულობის სამუშაოებია ჩატარებული, ნიადაგის ეროზიისაგან დაცვა მოითხოვს ახალი პროგრესული მეთოდების შემუშავებასა და დანერგვას, რადგან ამ საკითხის გადაწყვეტა წარმოადგენს ჩვენი ქვეყნისათვის უმნიშვნელოვანეს ამოცანას.

ნიადაგის წყალგამტარობა არის ნიადაგის თვისება გაატაროს წყალი და აირი. წყალგამტარობას მრავალი ფაქტორი განსაზღვრავს. არსებობს კვლევები, სადაც ნიადაგის გრანულომეტრიული შედგენილობიდან გამომდინარე დგინდება ნიადაგის წყალგამტარობა [51] (ცხრილი 1.3.1).

ზედაპირული ხელოვნური რწყვის ამა თუ იმ ტექნოლოგიამ უნდა უზრუნველყოს სარწყავ ფართობებზე საჭირო წყლის რაოდენობის მიწოდება და მისი თანაბარი განაწილება, რათა ნიადაგის აქტიურ შრეში შეიქმნას პროდუქტიული წყლის მარაგის ის რაოდენობა, რომელიც უზრუნველყოფს, რწყვათა შორის პერიოდში აგროეკოსისტემის: „ნიადაგი-მცენარე-ატმოსფერო“ ნორმალურ ფუნქციონირებას, წყლის რესურსების მინიმალური დანაკარგებით.

**ცხრილი 1.3.1. ნიადაგის წყალგამტარობის სიჩქარე ტიპების მიხედვით**

წყალგამტარობის ტიპი	წყალგამტარობის სიჩქარე (სმ/სთ)
ძალიან ნელი	-0.13
ნელი	0.13-0.5
საშუალოდ ნელი	0.5-2.0
საშუალო	2.0-6.3
საშუალოდ სწრაფი	6.3-12.7
სწრაფი	12.7-25
ძალიან სწრაფი	25-მეტე

წყლისმიერი ეროზია და მისი პროგნოზი პროცესის განმაპირობებელი ფაქტორების პერმანენტული ცვალებადობის გათვალისწინებით გულისხმობს არამარტო მორწყვის ტექნოლოგიის შედეგად ნიადაგ-გრუნტების წარეცხვას, არამედ იგი მოიცავს მთელი ირიგაციული სისტემის ფუნქციონირების შედეგად ეროზიის სხვადასხვა ფორმების დადგენა-გამოვლენას [52].

წყლისმიერი ეროზიული პროცესების რაოდენობრივი შეფასება, მოვლენის განმაპირობებელი ფართო სპექტრის დახასიათება, გაანგარიშების საინჟინრო მეთოდებისა და პროგნოზის საიმედოობის საკითხების მრავალმხრივმა ასპექტებმა ნიადაგ-გრუნტების ფართო კლასისათვის ასახვა ჰპოვა აკად. ც. მირცხულავას [35, 36] შრომებში.

ნიადაგ-გრუნტის, როგორც მრავალკომპონენტური და მრავალფაზიანი ფიზიკური სხეულის თვისებათა კომპლექსიდან ეროზიის ინტენსივობის განვითარებაზე გავლენას ახდენს: ნიადაგის საწყისი ტენიანობა, წყალგამტარობა, სრული და ზღვრული მინიმალური წყალტევადობა, აგრეგატების წყალმედვეობა, მოცულობითი წონა, გაჯირჯვების ხარისხი, შინაგანი ხახუნის კუთხე და ბმულობის ხვედრითი ძალა, ფრაქციული შედგენილობა, კუმულაციური მრუდის არაერთგვაროვნება, სტრუქტურა, ნაპრალიანობა, პლასტიკური თვისებები, მინერალოგიური და ქიმიური შედგენილობა, დამლაშება, მექანიკური, ქიმიური, თერმული და ოპტიკური მაჩვენებლები.

ნიადაგ-გრუნტების ირიგაციული ეროზიის განმაპირობებელ ფაქტორთა შორის ძირითადი როლი ზედაპირულ ჩამონადენს მიეკუთვნება, რადგან ნაკადის ჰიდრომექანიკური ძალური ზემოქმედება განსაზღვრავს კალაპოტის წონასწორობის სტატიკურ და დინამიკურ ფორმებს.

ზედაპირული ჩამონადენის ძირითადი ჰიდრომექანიკური პარამეტრი - სიჩქარე, ცალსახა კავშირშია წვიმის ინტენსივობასთან. ფერდოზე ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირების პროცესის მექანიზმის განხილვა მოცემულია შრომებში [37,38,40, 41, 47,48] და სხვა. ი.ყრუაშვილის [39] ნაშრომში მოცემულია ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირების ფიზიკურ-მათემატიკური მოდელის დასაბუთება.

ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირებაში დიდ როლს ასრულებს არა მარტო ნაკადის ხარჯისა და ქანობის ფორმირებული სიჩქარე, არამედ რელიეფის ფორმა, სასაზღვრო შრე, ფერდობის ქანობი. მაგრამ აღსანიშნავია, ისიც, რომ ირიგაციული ეროზიის ამოცანების გადაწყვეტისას ყველაზე დიდი მნიშვნელობა სიჩქარეს ენიჭება, რადგან ეს პარამეტრი განსაზღვრავს ნიადაგ-გრუნტის ნაწილაკზე ნაკადის დინამიკურ ძალურ ზემოქმედებას და ნაკადის ტრანსპორტუნარიანობას.

ნიადაგის გრანულომეტრიული შედგენილობა, ორგანული ნივთიერებების რაოდენობა, სტრუქტურა განსაზღვრავს კონკრეტული ნიადაგის ეროზიულობას [46].

ნიადაგი მთელი წლის განმავლობაში განიცდის ეროზიას. ეს მიდგომა სავსებით დამაკმაყოფილებელია ეროზიის წლიური საშუალო მაჩვენებლის შეფასებისას. წლის განმავლობაში წყლის შემცველობა ნიადაგში მკვეთრად იცვლება, აქედან გამომდინარე უნდა იცვლებოდეს ნიადაგის ეროზიულობაც. რაც ნიშნავს, რომ უფრო მსხვილ მასშტაბიანი კვლებისათვის უნდა მოხდეს ნიადაგის ეროზიულობის ფაქტორის განსაზღვრა სეზონურად. აგრეთვე უნდა აღინიშნოს, რომ კვლევები აღნიშნულ საკითხზე სამეცნიერო ლიტერატურაში შედარებით მწირია.

## თავი II.

### საველე- ექსპერიმენტალური კვლევები, ანალიზი და შედეგები

#### 2.1 საცდელი პოლიგონის გეოგრაფიული და ნიადაგურ-კლიმატური პირობების ზოგადი მიმოხილვა

ლომთაგორა აღმოსავლეთ საქართველოში, ზომიერად ნოტიო სუბტროპიკული ჰავის ოლქში მდებარეობს და რელიეფის შესატყვისად ახასიათებს ჰავის ზონალურობა: ტერიტორიის უდიდეს ნაწილში ზომიერად თბილი სტეპების ჰავაა, იცის ცხელი ზაფხული. ჰაერის საშუალო წლიური ტემპერატურაა  $12^{\circ}\text{C}$ , იანვარში  $0^{\circ}\text{C} - 0.3^{\circ}\text{C}$ , ივლისი  $23.9^{\circ}\text{C}$ ; აბსოლიტური მინიმალური ტემპერატურაა  $25^{\circ}\text{C}$ , აბსოლიტური მაქსიმალური  $40^{\circ}\text{C}$ . ნალექები 490-550 მმ წელიწადში. ნალექების მაქსიმალური რაოდენობა მაისშია, მინიმალური - დეკემბერში .

სასოფლო-სამეურნეო მიწის ფონდი შეადგენს 57,052,59 ჰა-ს. სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების მიწები: სახნავი ფართობი არის 22,271.29 ჰა; სათიბი - 1,724.98 ჰა; საძოვრები - 30,945.8 ჰა; მრავალწლიან ნარგავებს უკავიათ - 2,110.52 ჰა. სასოფლო-სამეურნეო მიწების 33,230 ჰა [53].

ლომთაგორას მიმდებარე ტერიტორიაზე სასოფლო-სამეურნეო კულტურებიდან გავრცელებულია - ხორბალი, ქერი, სიმინდი, ჭვავი, მზესუმზირა. ბოსტნეული კულტურებიდან: კარტოფილი, კომბოსტო, სტაფილო, ხახვი, ნიორი, ლობიო, კიტრი, პომიდორი და ა.შ.

აღნიშნულ ტერიტორიაზე პრიორიტეტულია ბოსტნეული, როგორცაა პომიდორი (მოსავალი 30-40 ტ/ჰა), ხახვი (30ტ/ჰა), კიტრი (9-12ტ/ჰა), ბადრიჯანი (20ტ/ჰა). ასევე მარცვლეული კულტურები ძირითადად ხორბალი (2-3ტ/ჰა). აღსანიშნავია, რომ ბოლო 10 წლის განმავლობაში პრიორიტეტული კულტურების მოსავლიანობა გაიზარდა. კერძოდ,

პომიდორის და ხახვის მოსავლიანობა გაიზარდა დაახლოებით 50%-ით, ხორბლის - დაახლოებით 20-25%-ით [53].

ლომთაგორას ტერიტორიაზე სასოფლო-სამეურნეო კულტურების განვითარების შესანიშნავი პირობებია. მთავარი, კონკურენტული უპირატესობა არის ხელსაყრელი კლიმატი, რომელიც წელიწადში მოსავლის 2-3-ჯერ აღების საშუალებას ქმნის.

დღევანდელი მონაცემებით ვეგეტაციის პერიოდი ბოლო 10 წლის განმავლობაში შეიცვალა, კერძოდ, შემცირდა. თუმცა ეს ინფორმაციაც არ არის დაზუსტებული მეტეოსადგურიდან მიღებული ობიექტური ინფორმაციით, რადგან ამ ტერიტორიაზე მეტეო სადგური არ მუშაობს.

რაიონი მდიდარია მდინარეებით. გარდა მდ. მტკვრისა, რომელიც რაიონის აღმოსავლეთ საზღვარზე ჩამოუდის, დიდი მდინარეა ხრამი. აქ იგი ვაკეზე გადის, აჩენს კლაკნილებს. წყალუხვია ხრამის მარჯვენა შენაკადი დებედა. დებედაც ტიპური ვაკის მდინარეა. მარნეულის ვაკეს კვეთს მდინარე ალგეთი (მტკვრის მარჯვენა შენაკადი). აღსანიშნავია მდინარე შულავერი (ხრამის მარჯვენა შენაკადი). მდინარეთა წყალდიდობა გაზაფხულზეა, წყალმცირობა – ზაფხულსა და ზამთარში. მდინარეები გამოყენებულია სარწყავად [54].

აღსანიშნავია, რომ სახნავ-სათესი მიწების თითქმის მთლიანი ტერიტორია საჭიროებს რწყვას, აღნიშნული ტერიტორია, როგორც აღნიშნეთ არ განიცდის სარწყავი წყლის დეფიციტს. თუმცა საირიგაციო სისტემების (არხების) უდიდესი ნაწილის გაუმართაობის გამო, რწყვის პროცესი ტერიტორიულ ერთეულში გაძნელებულია. აქ ტრადიციულ ზედაპირული რწყვის მეთოდს იყენებენ, როგორცაა კვლებშიმიშვება. სასოფლო-სამეურნეო მიწები დრენაჟს არ საჭიროებს.

ლომთაგორას ტერიტორიაზე ჯერ-ჯერობით არაა შეფასებული მოსალოდნელი ცვლილებები კლიმატში, თუმცა საერთო ტენდენციიდან გამომდინარე შეიძლება ვიფიქროთ, რომ მომავალში კლიმატური

ცვლილებები კიდევ უფრო გაამწვავებს ჩამოთვლილ საკითხებს და გაზრდის მოწყვლადობას ბუნებრივი საფრთხეების მიმართ.

**2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ჰაერის საშუალო ტემპერატურათა ცხრილი(С°)**

ცხრილი #2.1

ჰაერის საშუალო ტემპერატურა С°					
წლები თვეები	2014 წელი	2015 წელი	2016 წელი	ჯამი	სავეგეტაციო პერიოდის ჰაერის საშუალო С°
აპრილი	13	10.5	13.6	37.1	12.37
მაისი	19.3	16.7	17.3	53.3	17.77
ივნისი	22.2	23.4	21.6	67.2	22.4
ივლისი	25	25.5	23.8	74.3	24.76
აგვისტო	27.6	25.6	26.8	80	26.67
სექტემბერი	20.2	22.4	19.4	62	20.65

**2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდში მოსული ნალექების საშუალო მონაცემები (მმ)**

ცხრილი #2.2

მოსული ნალექები (მმ)					
წლები თვეები	2014	2015	2016	ნალექების ჯამი	სავეგეტაციო პერიოდში მოსული ნალექების საშუალო (მმ)
აპრილი	13	43	44	100	33.3
მაისი	75	70	27	172	57,3
ივნისი	70	103	52	225	75
ივლისი	21	5	59	85	28,3
აგვისტო	3	1	13	17	5,6
სექტემბერი	65	4	13	82	27,7

ჩვენი საკვლევი ობიექტი ლომთაგორას მთა-ტყე-მდელოს ნიადაგები გავრცელებულია ზ.დ. 1,800 მ მაღლა. ეს ნიადაგები ხასიათდება ჰუმუსის მაღალი შემცველობით, ხირხატიანობით, კარგი გაკორდებით, რის გამოც მეტწილად სათიბებად და საძოვრად გამოიყენება. გაკორდების მაღალი ხარისხის გამო, ამ ნიადაგების დიდი ნაწილი ეროზიის მიმართ მდგრადია,



მაგრამ საქონლის ძოვების ნორმების დარღვევის შემთხვევაში, ადვილად ექვემდებარება ეროზიას, რაც უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს იქ, სადაც ფერდობის დაქანება დიდია.

ლომთაგორას ტერიტორიაზე გავრცელებული ნიადაგების დიდ ნაწილს დაკარგული აქვს ბუნებრივი სახე და სხვადასხვა ინტენსივობით განიცდის დეგრადაციას. აღნიშნული, უპირველეს ყოვლისა, ვლინდება მათი ფიზიკურ-მექანიკური, ქიმიური, და მიკრობიოლოგიური თვისებების გაუარესებაში და ნაყოფიერების დაქვეითებაში.

ყოველივე ზემოთმოყვანილი სერიოზულად აფერხებს სავარგულების სრულფასოვან ექსპლუატაციას, რაც საბოლოო ჯამში განაპირობებს დაბალ მოსავლიანობას, პროდუქციის ხარისხის დაქვეითებას და აქედან გამომდინარე არაეფექტიანობას, რაც საბაზრო ეკონომიკის პირობებში იწვევს სასოფლო-სამეურნეო წარმოების მოცულობის შემცირებას. ამიტომ ნიადაგ-გრუნტებში ტენიანობის ოპტიმალური რეჟიმის უზრუნველყოფა მინიმალური დანახარჯებით ყოველთვის წარმოადგენდა სოფლის მეურნეობის ერთ-ერთ მთავარ პრობლემას.

## **2.2 საცდელი პოლიგონის ნიადაგ-გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური და ქიმიური მახასიათებლების განსაზღვრა**

ნიადაგ-გრუნტების თვისებების მიზნობრივი რეგულირების დროს მიმდინარე პროცესების მრავალფეროვნება და სირთულე განაპირობებს მათთან დაკავშირებული კვლევების მრავალფეროვნებას და მრავალმიზნობრივობას.

კვლევების მეთოდოლოგია მოიცავს, როგორც ლაბორატორიულ ექსპერიმენტალურ ისე საველე-ნატურულ და საწარმოო გამოცდილებას.

ჩატარებულ კვლევებში გამოიყენება, როგორც სტანდარტული, ისე სპეციალური მეთოდები [56,57,58,59,60,61,62].

სტანდარტული მეთოდის შეცვლა შეიძლება მახასიათებლების დადგენას და კვლევას:

- ხვედრითი და მოცულობითი მასები, ფორიანობა;
- ტენზომეტრობა;
- გრანულომეტრიული შემადგენლობა;
- აგრეგატული შემადგენლობა;
- წყალმედვეობა;
- პლასტიკურობა (ზღვრები და რიცხვი);
- წყალშთანთქმა და წყალგაცემა;
- გაჯირჯვება;
- წებოვნება; წყალგამტარობა (ფილტრაციის კოეფიციენტი სხვადასხვა გრადიენტების დროს);
- კაპილარული შეწოვა;
- დრეკადობის მოდული;
- მექანიკური სიმტკიცე.

სპეციალური მეთოდები შეიძლება ქვემოთ მოყვანილ და აღწერილ კვლევებს.

სტრუქტურულ-მექანიკური თვისებები. როგორც ცნობილია, კოაგულაციული და კონდენსაციური სტრუქტურების ფორმირება წარმოებს ფაზური გადასვლების და დისპერსული ფაზის ნაწილაკთა შორის არსებული სოლვატური შრეების სისქისაგან დამოკიდებული კონტაქტური ურთიერთმოქმედებების მართვის საშუალებით. ამასთან ერთად დიდი მნიშვნელობა ენიჭება აგრეთვე სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიური სახის ზეგავლენას და დისპერსული ფაზების და დისპერსული გარემოს თვისებებს.

ამ მოვლენის აღწერა შესაძლებელია ფიზიკურ-ქიმიური მექანიკის მეთოდებზე დამყარებული დისპერსული სისტემების სტრუქტურულ-მექანიკური თვისებების შესწავლის საშუალებით [55].

დისპერსიულ სტრუქტურებს აქვთ დამახასიათებელი რეოლოგიური (დეფორმაციული) თვისებები: ელასტიურობა, სიმტკიცე, პლასტიკურობა, დრეკადობა, ცოცვადობა და ა.შ., რომლებიც განაპირობებენ ამ სისტემების ქცევას დროში მიყენებული ძალების მოქმედების დროს.

თიხის სუსპენზიებში და პასტებში ძვრის დეფორმაციები ყველა შემთხვევაში აიწერება მაქსველ-შვედოვის-კელვინის განტოლებით:

$$e = \frac{P}{E_1 + h_1} \cdot \frac{P - P_k}{t + E} \cdot \frac{P}{(1 - e^{-E})}$$

- სადაც:  $P$  არის მოქმედი ძალა;
- $E_1$  - პირობითი, მყისი დრეკადობის მოდული;
- $E_2$  - ელასტიურობის მოდული;
- $h_1$  - უდიდესი პლასტიკური სიბლანტე;
- $h_2$  - დრეკადობის შემდგომი მოქმედების სიბლანტე;
- $P_k$  - დენადობის პირობითი სტატიკური ზღვარი;
- $t$  - დეფორმაციის განვითარების დრო.

თიხოვან სუსპენზიებში და პასტებში ერთდროულად მიმდინარეობს სამი სახის დეფორმაციის განვითარება:  $e_0 = P/E$ - დრეკადი,  $e_2 = P/E_2$ - ელასტიური და  $e_1 t = (P - P_k)/h_1)t$ - პლასტიური.

შეფასების კრიტერიუმებს წარმოადგენენ შემდეგი სტრუქტურულ-მექანიკური პარამეტრები:

1. ძვრის დრეკადობის მოდული;
2. ელასტიურობა;
3. უდიდესი პლასტიკური (შვედოვის) სიბლანტე  $h = \frac{P - P_{k1}}{e}$  და უმცირესი პლასტიური (ბინგმანის) სიბლანტე  $h_m = (P - P_{k2})/e$ ;  
სადაც  $P_{k1}$  და  $P_{k2}$  დენადობის ზღვრებია;
4. ძვრის ზღვრული დამაბულობა  $Q_s = P_m/2S$ ;
5. რელაქსაციის პერიოდები  $Q_2 = h_m/E$ ;
6. დენადობის ზღარი  $1/h$ ;
7. ტენიანობა  $W$ .

დეფორმაციების ხასიათის მიხედვით სტრუქტურები იყოფა 6 სტრუქტურულ-მექანიკურ ტიპად: ნულოვანი -  $e_0 > e_2 > e_{1t}$ ; I -  $e_2 > e_0 > e_{1t}$ ; II -  $e_2 > e_{1t} > e_0$ ; III -  $e_0 > e_{1t} > e_2$ ; IV -  $e_{1t} > e_0 > e_2$ ; V -  $e_{1t} > e_2 > e_0$ .

ზემოთმოყვანილი სტრუქტურები ხასიათდებიან ინდივიდუალური სპეციფიკური სტრუქტურულ-მექანიკური თვისებებით. თიხოვანი გრუნტების თვისებების სხვადასხვა აქტიური დანამატების საშუალებით მიზნობრივი მართვისათვის, განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა აქვს მდგრადი სუსპენზიების მიღებას, ამისათვის კი მათი სტრუქტურულ-მექანიკური მახასიათებელი უნდა აკმაყოფილებდეს მდგრადობის შემდეგ კრიტერიუმებს:

- ✓ ელასტიურობა -  $1 < 0.5 - 0.6$ ;
- ✓ სტატიკური პლასტიკურობა -  $\frac{P_{k1}}{h_1} < 60 - 80 \cdot 10^{-6}$  წმ<sup>-1</sup>;
- ✓ ჭეშმარიტი რელაქსაციის პერიოდი -  $Q_1=400-450$  წმ.

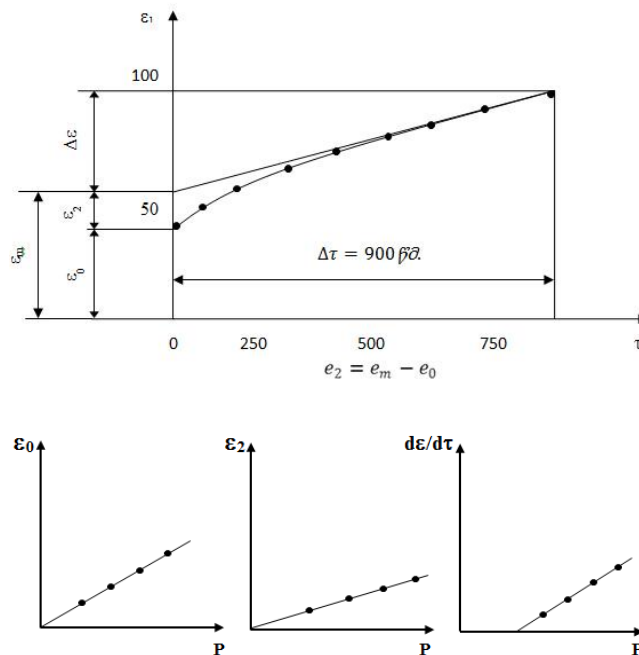
მდგრადობის ხარისხი ხასიათდება მდგრადობის კოეფიციენტით:  $K = e_0/C$ , სადაც  $e_0$ - სწრაფი ელასტიური დეფორმაციის სიდიდეა %-ში,  $C$  - დისპერსული ფაზის კონცენტრაცია %-ში.

ამრიგად, თიხის სტრუქტურულ-მექანიკური ტიპის განსაზღვრა და მისი მახასიათებლების შედარება აღნიშნულ კრიტერიუმებთან საშუალებას იძლევა დავადგინოთ თუ რა ცვლილებები უნდა შევიტანოთ სტრუქტურის ჩამოყალიბების პროცესში, რათა მივიღოთ სასურველი თვისებების მქონე სტრუქტურა. კვლევები ტარდება პ.ტოლსტოის პლასტმზომზე, რომელიც აღჭურვილია პარალელურად გადაადგილებადი  $50 \cdot 20 \cdot 6$  მმ. ზომის დაღარული ფირფიტებით.

დეფორმაციის გაზომვა მიმდინარეობს 0.01 მმ. დაყოფის სკალის ინდიკატორების საშუალებით, გაზომვის სიზუსტე -1 მიკრონი. დატვირთვები მიმდინარეობს 0.1-დან 7.0 კგ-მდე, რომლის შემდეგ წარმოებს ასეთივე თანმიმდევრული განტვირთვა. დატვირთვა-განტვირთვის ციკლების რაოდენობა არ უნდა იყოს 8-ზე ნაკლები. ცდის დროს ფიქსირდება: დრო  $t$  წმ; დეფორმაციის სიდიდე -  $e$  მკ. (ინდიკატორის

მონაცემები) და დატვირთვა  $P$  გრ. მიღებული მონაცემების საფუძველზე ყველა დატვირთვისათვის აგებენ დეფორმაცია-დროის მრუდეებს  $e = f(t)$ , შემდეგი მასშტაბით:  $e = 1\text{მმ} = 1\text{მკ}$ ,  $t = 1\text{მმ} = 5\text{წმ}$ . პირველი წამური ათვლისას გამოითვლება სწრაფი ელასტიური დეფორმაცია  $e_0$ , ხელი ელასტიური დეფორმაცია გამოითვლება, როგორც  $e_2 = e_m - e_0$  მონაკვეთი. პლასტიური დეფორმაციის განვითარების სიჩქარე გამოითვლება, როგორც  $e$  მონაკვეთის ფარდობა დროის მონაკვეთთან  $t = 900\text{წმ}$ . ძვრის დაძაბულობა გამოითვლება ფორმულით  $P = \frac{Fg}{S}$  დინი·სმ<sup>-1</sup>, სადაც  $F$ - დატვირთვაა გრ,  $g$ - სიმძიმის ძალის აჩქარება და  $S$ - ფირფიტების და ნიმუშის სისქე სმ.

$P$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ , და  $de/dt$  გამოთვლის შემდეგ ყველა დატვირთვისათვის აიგება გრაფიკები  $e_0 = f(P)$ ,  $e_2 = f(P)$ , და  $\frac{de}{dt} = f(P)$  (ნახ. 1), რომლების საშუალებითაც შესაბამისი ფორმულებით გამოითვლება სტრუქტურულ-მექანიკური მახასიათებლები. დენადობის პირობითი სტატიკური ზღვარი გამოითვლება  $\frac{de}{dt} = f(P)$  გრაფიკიდან, როგორც  $P$  ღერძზე მოკვეთილი მონაკვეთი  $h_1 = \text{const}$  დროს.



ნახ. 2.2.1 სტრუქტურულ-მექანიკური მახასიათებლების განმსაზღვრელი გრაფიკები.

პლასტიკური სიმკვრივე. თიხოვანი გრუნტების თვისებების მიზნობრივი რეგულირების ეფექტური განხორციელებისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს მათი პლასტიკური მდგომარეობის შეფასებას.

პლასტიკური თვისებები ასახავენ დისპერსული მასალების სტრუქტურის სიმტკიცეს, ანუ მათი ელემენტარული ნაწილაკების ერთმანეთთან შეკავშირების ძალების მდგომარეობას სხვადასხვა ტენიანობის დროს.

ყოველივე ზემოდ მოყვანილი ითვალისწინებს პრეზინდერის მიერ შემუშავებულ, უბრალო, მაგრამ პრაქტიკისათვის მნიშვნელოვანი მახასიათებლის - პლასტიკური სიმტკიცის განსაზღვრის მეთოდს, რომელიც ყველაზე სრულად ითვალისწინებს გრუნტების, როგორც დისპერსული სისტემების დეფორმაციულ თვისებებს [61].

გარდა ამისა, მეთოდი იძლევა საშუალებას დადგინდეს ნიადაგ-გრუნტების სტრუქტურის ჩამოყალიბების პროცესის ქვედა და ზედა ზღვრები.

საცდელი ნაკვთის ნიადაგის მექანიკური შედგენილობის ანალიზის შედეგად მივიღე შემდეგი შედეგები, რომელიც ტარდებოდა ზემოთ აღწერილი მეთოდის მიხედვით:

ნიადაგების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ანალიზი გვიჩვენებს (ცხრილი #2.2.1), რომ ისინი ხასიათდება მაღალი მოცულობითი მასით, რომელიც სიღრმის მიხედვით მნიშვნელოვნად იცვლება 1,56 მ/სმ<sup>3</sup>-ია 0-15 სმ ფენაში, ხოლო ქვედა 45-60 სმ. ჰორიზონტში კი აღწევს 1.70 მ/სმ<sup>3</sup>. ფორიანობა კი, პირიქით, სიღრმის მიხედვით კლებულობს 49.0-დან 44.2%-მდე.

დასველების სიბოძის, ეფექტური ხვედრითი ზედაპირის და ბმული წყლის რაოდენობის განსაზღვრა ხორციელდება კიევის ადიაბატურ კალორიმეტრიულ დანადგარზე. საკვლევი გრუნტების ნიმუშები ტარდება 0.5 მმ. საცერში, შრება ჰაერზე და იყრება ამპულაში, რომელიც თავსდება ვაკუუმ საშრობში, სადაც შრება +105°C ტემპერატურაზე 6 საათის

განმავლობაში, რის შედეგადაც ამპულები ირჩილება და თავსდება კალორიმეტრის კალათაში. კალორიმეტრი მუდმივი სვლის დაფიქსირების შემდეგ ფიქსირდება ბეკმანის ორივე თერმომეტრის მონაცემები და იმსხვრევა ამპულა, რის შედეგადაც ელექტროგამაცხელებლის საშუალებით მიმდინარეობს გარე პერანგის და შიდა ჭიქის წყლის ტემპერატურების გათანასწორება (დასველების მთავარი პერიოდი) და კვლავ ფიქსირდება ბეკმანის ორივე თერმომეტრის მონაცემები.

დასველების სითბო იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$Q = \frac{t_2 - t_1}{g}, \quad (1)$$

სადაც:  $t_2$  არის კალათში საბოლოო ტემპერატურა ამპულის დამსხვრევის შემდეგ,  $0^{\circ}C$ ;

$t_1$  - კალათში საბოლოო ტემპერატურა ამპულის დამსხვრევამდე;

$g$  - გრუნტის მასა, გრ.

$K$  - კალორიმეტრის მუდმივა, ჩვენს მიერ გამოყენებული კალორიმეტრისათვის  $K = 102.0$ .

ორთქლის ადსორბციის იზოთერმის გაზომვა ხორციელდება შემდეგი თანმიმდევრობით. წინასწარ აწონილ ფაიფურის ჯამებში თავსდება 0.1 გრ.  $+105^{\circ}C$  წინასწარ გამშრალი გრუნტის ნიმუშები. ჯამები იკიდება კვარცის სპირალებზე, რომლებიც შლიფების მეშვეობით იდგებიან საზომ ადსორბციულ მილაკებში და კატეტომეტრით ფიქსირდება მინის მილებზე დამაგრებული მაჩვენებლის საწყისი მდგომარეობა.

გაზომვების მეშვეობით გამოიხატა ადსორბცია-დესორბციის იზოთერმების გრაფიკი, სადაც ორდინატა ღერძზე ფიქსირდება ორთქლის (წყლის) რაოდენობა მმ/გრ. აბსცისთა ღერძზე კი ორთქლის ფარდობითი წნევა  $P/P_s$ .

ნახაზი #2.2.2 -ის ანალიზის საფუძველზე I წერტილში თანაკვეთა ადსორბცია-დესორბციის იზოთერმისა ხდება, როდესაც მაქსიმალურ

მოლეკულური ჰიგროსკოპულობა 9.2 %-ია, ხოლო II წერტილში თანაკვეთა ხდება, როდესაც მაქსიმალურ მოლეკულური წყალტევადობა 18,0%-ია [63]. დესორბციის შემთხვევაში ნიადაგში წყლის ორთქლის საანგარიშო ხარისხობრივ ემპირიულ დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს:

$$W = 24.105\left(\frac{P}{P_k}\right)^{-0.66}; \quad (4)$$

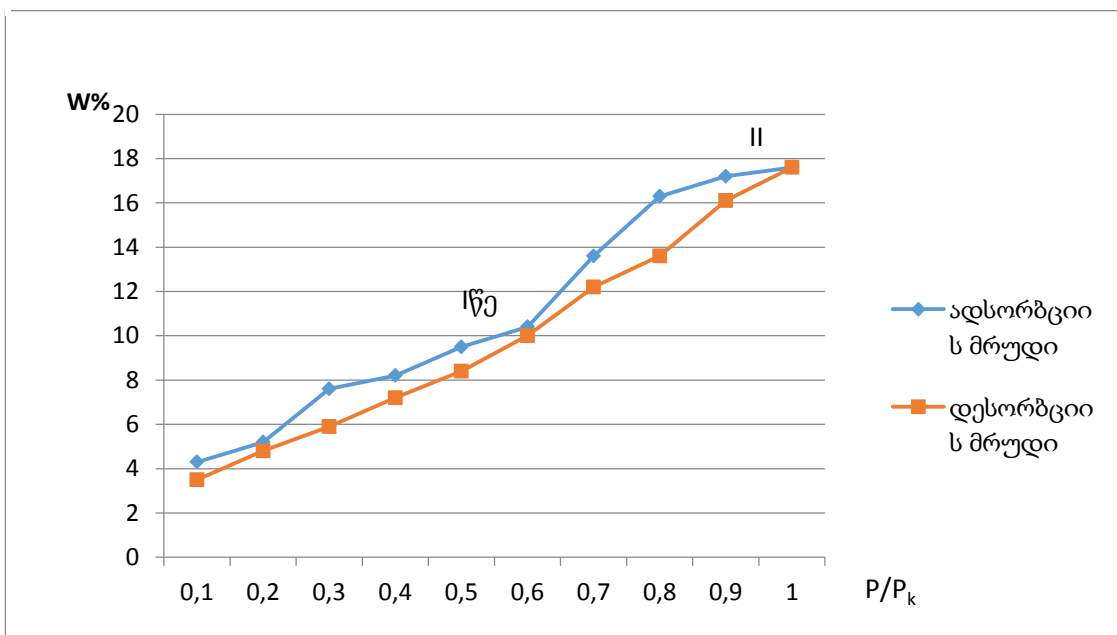
$$R^2 = 0.833.$$

სადაც,  $\frac{P}{P_k}$  არის ორთქლის ფარდობითი წნევა.

ხოლო ადსორბციის შემთხვევაში, კი:

$$W = 24.599\left(\frac{P}{P_k}\right)^{-0.601}; \quad (5)$$

$$R^2 = 0.7926$$



ნახ. 2.2.2 წყლის ორთქლის ადსორბცია-დესორბციის იზოთერმა



ნიადაგის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები

ცხრილი #2.2.1

მორფოლოგიური აღწერილობა	შრე (სმ)	კუთრი მასა (გ/სმ <sup>3</sup> )	მოცულობითი მასა (მ/სმ <sup>3</sup> )		ფორიანობა %	პლასტიკურობა			მექანიკური კუთრი სიმტკიცე (კგ/სმ <sup>2</sup> )
			ტენიანი	მშრალი		გაგლინ ვით %	D დენადობის %	რიცხვი	
თიხნარ ყვითელ-ყავისფერი შეფერილობის კოშტოვან-მარცვლოვანი კირის ჩართულობით ადუღებაზე HCl –გან საშუალო სტრუქტურა აგრეგატული მინერალურ შემადგენლობა კაოლინიტურ-ბეიდელიტური ყველაზე მდგრადი აგრეგატების ზომა 1-2 მმ ფორიანობებს შორის ძირითადად განპირობებს აგრეგატებს შორის მანძილი. წვრილ აგრეგატებში ფორიანობაზე უმნიშვნელოა 0-20 სმ სისქის ზედა შრე, შეიცავს 10.0-12.0 % ჰუმუსს.	0-15	2.65	1.56	1.35	49.0	20.0	40.0	20.0	5.4
	15-30	2.69	1.60	1.40	48.0	20.0	40.0	20.0	6.2
	30-45	2.69	1.66	1.45	46.1	19.0	38.0	19.0	6.4
	45-60	2.69	1.70	1.50	44.2	18.0	38.0	20.0	6.2

ნიადაგის გრანულომეტრიული შემადგენლობა

ცხრილი # 2.2.2

შრე (სმ)	ფრაქციების ზომები (მმ)					
	ქვიშა		მტვერი		თიხა	
	1 - 0.25	0.25 - 0.15	0.05 - 0.01	0.01 - 0.005	0.005 - 0.001	< 0.001
0 - 15	4.30	26.81	12.20	10.30	19.63	29.43
15 - 30	4.60	24.52	11.87	10.65	20.86	27.50
30 - 45	4.68	24.85	14.10	11.63	18.42	26.32
45 - 60	5.30	26.41	15.82	11.73	16.53	24.21

ნიადაგის ქიმიური შემადგენლობა

ცხრილი #2.2.3

შრე (სმ)	100 გრ. გრუნტში						pH
	ანიონები			კათიონები			
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	N <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	
0 - 15	0.045	0.0050GH	0.017	0.014	0.012	0.0023	7.0
15 - 30	0.049	0.0052	0.018	0.014	0.011	0.0022	7.5
31 - 45	0.046	0.0054	0.019	0.014	0.012	0.0024	7.4
45 - 60	0.046	0.0048	0.017	0.016	0.011	0.0027	7.3

ნიადაგის ტენიანობა

ცხრილი #2.2.4

შრე (სმ)	ჰიდროფილობა			პლასტიკური სიმკვრივის $P_m=30$ დინი <sup>5</sup> ·სმ <sup>-2</sup> დროს კ%	წყლის ორთქლის ადსორბცია			
	დასველების სიძბო კალ/გ Q	ეფექტიური ზედაპირი მ <sup>2</sup> /გ	ბმული წყალი % A		ადსორბცია		დესორბცია	
					I ნიშნული	II ნიშნული	I ნიშნული	II ნიშნული
0 - 15	8.93	322.4	8.90	20.2	10.1	18.5	8.8	18.5
15 - 30	8.55	308.6	8.51	20.0	9.6	18.0	8.8	18.0
31 - 45	8.42	303.9	8.38	19.1	9.2	17.6	8.2	17.6
45 - 60	8.36	301.8	8.33	19.4	9.0	16.2	8.0	16.2

წყლის ორთქლის ადსორბციულ-დესორბციის მსვლელობა (საშუალო მონაცემები)

ცხრილი #2.2.5

<i>P/Pk</i>	ადსორბცია	დესორბცია
0.1	4.3	3.5
0.2	5.2	4.8
0.3	7.6	5.9
0.4	8.2	7.2
0.5	9.5	8.4
0.6	10.4	10.0
0.7	13.6	12.2
0.8	16.3	13.6
0.9	17.2	16.1
1.0	17.6	17.6

გრუნტების საინჟინრო-მელიორაციული შეფასების მეთოდიკიდან გამომდინარე ნიადაგების ბუნებრივი თვისებები ვერ უზრუნველყოფენ მცენარისათვის საჭირო ოპტიმალურ წყალჰაეროვან რეჟიმს, რის გამოც მცენარეები განიცდიან ან ჰაერის უკმარისობას ჭარბი ტენიანობის დროს (მძიმე ნიადაგები), ანდა ჰაერის სიჭარბეს პროდუქტიული წყლის უკმარისობისას.

### 2.3 ნიადაგებში ოპტიმალური წყალჰაეროვანი შემცველობის მოცულობითი მასების დადგენა ზედაპირული რწყვის დროს

სარწყავი ნორმის და სიხშირის დადგენისათვის პირველ პიგში აუცილებელია არსებული ნიადაგ-გრუნტის მცენარეთათვის ოპტიმალური წყალჰაერის უზრუნველყოფის უნარის დადგენა, რაც შეუძლებელია ჭკნობის

კოეფიციენტის დადგენის გარეშე. ამ ამოცანების წარმატებით გადაჭრისათვის არ არის საკმარისი ნიადაგ-გრუნტების მხოლოდ თვისებების ცოდნა. არანაკლებ მნიშვნელოვანია მათი მცენარეთათვის ხელსაყრელი წყალჰაეროვანი რეჟიმით უზრუნველყოფის უნარის შეფასება, როგორც მათი თვისებების რეგულირებამდე, ისე აგრომელიორაციული და სხვა ღონისძიებების განხორციელების შემდეგ. ამასთან ერთად მნიშვნელოვანია, რომ ნიადაგ-გრუნტის წინასწარ შეფასების საფუძველზე, ასევე წინასწარ შეფასდეს მათზე დაგეგმილი გასაუმჯობესებელი ღონისძიებების ეფექტურობა და განხორციელების მიზანშეწონილობა.

დღემდე ასეთი მეთოდის უქონლობა ხშირად იწვევდა და იწვევს ნიადაგების არასაკმარისად ობიექტურ შეფასებას, შეცდომებს ღონისძიებების შერჩევაში, პროექტირებაში და განხორციელებაში, რის შედეგადაც ათვისებული ნიადაგების ეფექტიანობა არასაკმარისია, მიწების მელიორაციული და ეკოლოგიური მდგომარეობა კი უარესდება.

ამიტომ, მეტად აქტუალურია დამუშავდეს მარტივი, ხელმისაწვდომი მეთოდის, რომელიც უზრუნველყოფს ხანგრძლივი და შრომატევადი დაკვირვებების გარეშე მოხდეს ასათვისებელი და უკვე ათვისებული ნიადაგების მდგომარეობის ობიექტური საინჟინრო-მელიორაციული შეფასება და მათზე განსახორციელებელი და უკვე განხორციელებული ღონისძიებების განსაზღვრა. წინასწარ იქნეს შეფასებული ფართობის მდგომარეობა და მათი ათვისების რეალობა და გზები. შეფასების მეთოდის უნდა იყოს მაქსიმალურად მარტივი, იყენებდეს ნიადაგების ადვილად განმსაზღვრავ მახასიათებლებს და არ საჭიროებდეს რთულ გამოთვლებსა და ხანგრძლივ კვლევებს.

შეფასების კრიტერიუმად უნდა იყოს მიღებული ფოროვან სივრცეში პროდუქტიული წყლის და საჭირო ჰაერის შემცველობის მაჩვენებლები, მინიმალურად და მაქსიმალურად შესაძლო ტენიანობის ფარგლებში.

ნიადაგ-გრუნტის შეფასებისათვის საჭიროა ვიცოდეთ სამი ძირითადი მახასიათებელი:  $A$  - ჰაერის შემცველობა;  $W_{არაპრ.}$  - მცენარეთათვის მიუწვდომელი (არაპროდუქტიული) წყლის შემცველობა, რომელიც ერთდროულად წარმოადგენს იმ ქვედა ზღვარს, რომლის ოდენობის მიუხედავად, ნიადაგ-გრუნტებში არ არის მცენარეთათვის მისაწვდომი (პროდუქტიული) წყალი;  $W_{პროდ.}$  - მცენარეთათვის მისაწვდომი (პროდუქტიული) წყლის შემცველობა;

ნებისმიერი ფართობების ნიადაგ-გრუნტების საინჟინრო-მელიორაციული შეფასებისათვის საჭიროა შემდეგი მახასიათებლების დადგენა:  $W_{ზღვრ.}$  - ზღვრული წყალტევადობა;  $W_{უმცირესი}$  - უმცირესი წყალტევადობა;  $W_{პრ.}$  - მცენარეთათვის მისაწვდომი (პროდუქტიული) წყლის შემცველობა;  $W_{არაპრ.}$  - მცენარეთათვის მიუწვდომელი (არაპროდუქტიული) წყლის შემცველობა;  $W_{მინ.}$  - მცენარეთათვის საჭირო ჰაერის მინიმალური შემცველობა გამოხატული ტენიანობაში;  $W_{მაქს.}$  - მაქსიმალურად დასაშვები წყლის შემცველობა.

ყველა ზემოდჩამოთვლილი მახასიათებელი უნდა იყოს ადვილად განსაზღვრადი და რაც მთავარია, რეალურად ასახავდეს შესაბამის წყლის კატეგორიების არსს და რაოდენობას.

ამ მახასიათებლების სწორი განსაზღვრა შეუძლებელია ნიადაგ-გრუნტებში მცენარეთათვის მიუწვდომელი (არაპროდუქტიული) -  $W_{არაპრ.}$  და მისაწვდომი (პროდუქტიული) -  $W_{პროდ.}$  წყლის შემცველობის სწორი დადგენის გარეშე.

დღეისათვის არსებული ლიტერატურული მასალების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ეს საკითხები არ არის სათანადოდ დაზუსტებული, რიგ შემთხვევაში კი დაშვებულია შეცდომები. ზემოაღნიშნული მახასიათებლებიდან მხოლოდ ორი  $W_{ზღვრ.}$  და  $W_{უ.წ.}$  მთლიანად პასუხობენ აღნიშნულ მოთხოვნებს.

რაც შეეხება დანარჩენ მახასიათებლებს, კერძოდ,  $W_{არაპრ.}$ ,  $W_{პრ.}$ ,  $W_{მინ.}$  და  $W_{მაქს.}$ . მათი ზუსტი რაოდენობის განსაზღვრის და რეალობის განმსაზღვრელი მეთოდები არ არსებობს.

მდგომარეობის გამარტივების მიზნით მიღებული იყო ემპირიული კოეფიციენტი 0.8, რომლის განმსაზღვრად პარამეტრზე - უმცირეს წყალტევადობაზე გამრავლებით მიიღება საჭირო სიდიდე.

აღნიშნულს საფუძვლად ედო მოსაზრება, რომ თუ ნიადაგ-გრუნტი შეიცავს 0.8  $W_{უმც.}$  (უმცირესი წყალტევადობის 80% წყალს) მასში ავტომატურად უზრუნველყოფილია მცენარეთათვის აუცილებელი ჰაერის და წყლის რაოდენობა, ანუ გარანტირებულია ოპტიმალური წყალჰაეროვანი რეჟიმი. მცენარეთათვის მიუწვდომელი (არაპროდუქტიული) წყლის შემცველობის კრიტერიალური ზღვრის მაჩვენებლად მიღებული იყო მეორე განსაზღვრადი პარამეტრის - მაქსიმალური ჰიგროსკოპულობის და ემპირიული კოეფიციენტის 1.34 ნამრავლი ( $1.34 W_{მაქს.ჰიგრ.}$ ), რომელიც დირექტიულად იყო მიღებული სსრკ-ს ჰიდრომეტცენტრის მიერ და გაიგივებული იყო ე.წ. ჭკნობის ტენიანობასთან ( $W_{ჭკნ.}$ ). ამასთან იგულისხმებოდა, რომ ნიადაგ-გრუნტებში ამ ტენიანობის ზევით მყოფი წყალი მისაწვდომია მცენარისათვის და უზრუნველყოფს მათ ნორმალურ განვითარებას. რადგან ეს მაჩვენებელი წარმოადგენს ჭკნობის ტენიანობის და მაქსიმალური ჰიგროსკოპულობის ფარდობას და ის ნებისმიერი გრუნტისათვის უნდა შეადგენდეს ერთი და იგივე რიცხვს, ანუ 1.34-ს [56].

ჩატარებული კვლევების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ნიადაგ-გრუნტებში  $0.8 W_{უმც.}$  ტოლი წყალტევადობისას ჰაერის შემცველობა მერყეობს 7.2%-დან 44.7%-მდე, რაც ნათლად მიუთითებს, რომ  $0.8 W_{უმც.}$  დროს ნიადაგ-გრუნტი ყოველთვის არ შეიცავს საჭირო რაოდენობის ჰაერს. ასეთივე სურათი სხვადასხვა მოცულობითი მასის  $r$  და ზღვრული წყალტევადობის დროს, რომლებისგანაც დამოკიდებულია უმცირესი წყალტევადობა და შესაბამისად  $0.8 W_{უმც.}$ .

კოეფიციენტი 0.8 ვერც ნიადაგ-გრუნტებში საჭირო წყლის რაოდენობის ამსახველ კრიტერიუმად შეიძლება იყოს გამოყენებული, ვინაიდან  $W_{უმც.}$  და ისეთ მახასიათებლებს შორის, როგორცაა  $W_{მაქს.ჰიგრ.}$  და  $W_{ზღ.}$  არ არსებობს პირდაპირი პროპორციული დამოკიდებულება და აქედან გამომდინარე, ვერცერთი კოეფიციენტის საშუალებით ვერ დგინდება რეალური მდგომარეობის ამსახველი რაოდენობრივი კრიტერიალური მახასიათებელი. უმცირესი წყალტევადობის შემცველობის სხვაობა ერთი და იგივე მახასიათებლების სხვადასხვა მაჩვენებლებისას საშუალოდ შეადგენს:  $r$ -ისთვის 2.5-ჯერ,  $W_{ზღვრ.}$ -ისთვის 2.5-ჯერ,  $W_{მაქს.ჰიგრ.}$  2-ჯერ, რაც თავისთავად მიგვანიშნებს  $0.8 W_{უმც.}$  კრიტერიუმობის არარეალობაზე.

ჰქნობის ტენიანობის და მაქსიმალური ჰიგროსკოპულობის ფარდობა  $W_{ჰქ.}/W_{ა.ჰ.}$  თითქმის ყოველთვის აღემატება 1.34 და ძირითადად მერყეობს 1.35-3.0 ფარგლებში. მცენარეთა ჰქნობა და მისი თანხლები ზრდის დაკნინება და მოსავლიანობის შემცირება ხდება უკვე მაშინ, როდესაც ტენიანობა საშუალოდ სამჯერ აღემატება მაქსიმალურ ჰიგროსკოპიულობას, შეუქცევადი ცვლილებები - 2.0 და მეტი  $W_{მაქს.ჰიგრ.}$  დროს.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე ნათელია, რომ მაჩვენებელი 1.34 მაქს. ჰიგროსკოპულობა არ შეესაბამება რეალურად არსებული ტენიანობის ზღვრულ სიდიდეს და არ შეიძლება გამოყენებული იყოს, როგორც



კრიტერიალური მაჩვენებელი. ამიტომ საჭიროა ამ მაჩვენებლის სწორი დადგენა და მისი განსაზღვრის მაქსიმალურად უბრალო მეთოდის შერჩევა.

წყალი, რომელიც რჩება ნიადაგ-გრუნტში გრავიტაციული ანუ თავისუფალი წყლის გადინების შემდეგ, შეკავშირებულია მასთან განსაზღვრული ძალებით, ფაქტიურად წარმოადგენს ამა თუ იმ კატეგორიის ბმულ წყალს და რაოდენობრივად შეესაბამება უმცირეს წყალტევადობას  $W_{ტ.წ.}$ .

ნიადაგ-გრუნტებში ოპტიმალური წყალ-ჰაერის რეჟიმისათვის აუცილებელი მახასიათებლებიდან რეალურად და პრაქტიკულად განსაზღვრადია მხოლოდ ორი – ზღვრული  $W_{ზღვრ.}$  და  $W_{ტ.წ.}$  წყალტევადობა. ისეთი აუცილებელი მახასიათებლის, როგორცაა მცენარეთათვის არაპროდუქტიული წყლის შემცველობა ( $W_{არაპრ.}$ ) ანუ კრიტიკული ტენიანობის განსაზღვრის საკითხი კი მოითხოვს გადაწყვეტას.

ნიადაგ-გრუნტში მცენარეთათვის აუცილებელი ჰაერის მინიმალური შემცველობა უნდა შეადგენდეს 15%-ს ნიადაგ-გრუნტის მოცულობიდან და სწორად ეს უნდა იყოს მიღებული ჰაერის შემცველობის კრიტერიალური ზღვრად. ამსთან ერთად, გაანგარიშებების გაადვილების მიზნით მართებულად მიგვაჩნია, რომ ჰაერის შემცველობა გამოსახული იყოს ტენიანობის მაჩვენებლებში, ანუ იმ ტენიანობით, რომელიც შეესაბამება ჰაერის შემცველობას:

$$W_A = \frac{A}{r}, \% = \frac{15}{r}, \% \quad (2.3.1)$$

სადაც:  $A$  არის ჰაერის შემცველობა ნიადაგ-გრუნტის მოცულობიდან, %;

$r$  - ნიადაგ-გრუნტის მოცულობითი მასა, გ/სმ<sup>3</sup>.

ზემოთ მოყვანილიდან გამომდინარე: 1. შეფასების მეთოდის მიზანია ხანგრძლივი და შრომატევადი დაკვირვებების გარეშე მოვახდინოთ ასათვისებელი და უკვე ათვისებული სასოფლო-სამეურნეო ფართობების ნიადაგ-გრუნტების საინჟინრო-მელიორაციული მდგომარეობის ობიექტური

შეფასება, განხორციელებული და განსახორციელებელი აგრომელიორაციული ღონისძიებების ეფექტიანობის განსაზღვრა; 2. შეფასების კრიტერიუმად მიღებულია ნიადაგ-გრუნტის უნარი უზრუნველყოს ფოროვან სივრცეში მცენარეთათვის აუცილებელი პროდუქტიული წყლის და ჰაერის შემცველობა, მინიმალურად და მაქსიმალურად დასაშვები ტენიანობის ფარგლებში.

შეფასებისათვის გამოყენებულია ადვილად განსაზღვრადი მახასიათებლები, რომლებიც რაოდენობრივად ასახავენ ნიადაგ-გრუნტში წყლისა და ჰაერის შემცველობას:  $\rho$ - მოცულობითი მასა გ/სმ<sup>3</sup>;  $\gamma$ - კუთრი მასა გ/სმ<sup>3</sup>;  $n$ - ფორიანობა  $n = \frac{\gamma - \rho}{\gamma} \%$ ;  $W_{\text{ზღ.წყ.}}$  - ზღვრული წყალტევადობა  $W_{\text{ზღ.წყ.}} = \frac{n}{\rho} \%$ ;  $W_{\text{უმცირესი}}$  - უმცირესი წყალტევადობა;  $W_{\text{მაქსიმალური}}$  - მაქსიმალური მოლეკულური წყალტევადობა, რომელიც ამავდროულად წარმოადგენს დასაშვები ტენიანობის ქვედა კრიტერიალურ ზღვარს;  $W_{A\text{მინ.}}$  - ჰაერის მინიმალური დასაშვები შემცველობა გამოსახული ტენიანობაში  $W_{A\text{მინ.}} = \frac{A}{\rho} \frac{15}{\rho} \%$ ;  $W_{A\text{მაქ.}}$  - ჰაერის მაქსიმალურად შესაძლებელი შემცველობა  $W_{A\text{მაქ.}} = W_{\text{ზღ.წყ.}} - W_{\text{უმც.წყალ.}}$ ;

$W_A$  - ჰაერის შემცველობა კონკრეტული ტენიანობის შემთხვევაში  $W_A = W_{\text{ზღ.წყ.}} - W_{\text{eiieo}}$ ;  $W_{\text{პრ.}}$  - პროდუქტიული წყლის შემცველობა  $W_{\text{პრ.წყ.შემც.}} = W_{\text{უმც.წყალ.}} - W_{\text{e.e.u}}$ , კონკრეტული ტენიანობის შემთხვევაში  $W_{\text{პრ.წყ.შემც.}} = W_{\text{eiieo}} - W_{\text{e.e.u.}}$ ;  $W_{\text{მაქ.}}$  - მაქსიმალურად დასაშვები ტენიანობა:  $W_{\text{მაქ.დასაშ.ტენ.}} = W_{\text{ზღ.წყ.}} - W_{A\text{მინ.}}$ .

აღნიშნული მახასიათებლებიდან  $\rho, \gamma, W_{\text{მაქს.}}, W_{\text{უმც.}}$  და  $W_{\text{კონკ.}}$  განსაზღვრა წარმოებს სტანდარტული ლაბორატორიული მეთოდიკით შესაბამისი ფართობიდან აღებული დაუშლელი ნიადაგ-გრუნტის ნიმუშების გამოყენებით;

დანარჩენი მახასიათებლები  $W_{\text{ზღ.წყ.}}, W_{\text{მინ.}}, W_{\text{მაქ.}}, W_{\text{პრ.}}$  გამოითვლება შესაბამისი მარტივი ფორმულების საშუალებით.

ნიადაგს დამაკმაყოფილებელი მდგომარეობა (ანუ უნარი უზრუნველყოს მცენარეთათვის საჭირო წყალ-ჰაერის რეჟიმი) გააჩნია, როდესაც დამაკმაყოფილებელია შემდეგი ზღვრული პირობები: ჰაერის მაქსიმალურად შესაძლებელი შემცველობა უნდა იყოს მეტი ან ტოლი ჰაერის მინიმალური დასაშვები შემცველობისა:

$$W_{Aმაქ} \geq W_{Aმინ} .$$

პროდუქტიული წყლის შემცველობა უნდა აღემატებოდეს ნულს:

$$W_{პროდ.წყ} > 0.$$

უმცირესი წყალტევადობა უნდა უდრიდეს ან იყოს ნაკლები მაქსიმალურად დასაშვები ტენიანობისა:

$$W_{უმ.წყალტ.} \leq W_{მაქ.დასაშ.ტენ.}$$

კონკრეტული ტენიანობის შემთხვევაში:

$$W \leq W_{მაქ.დას.ტენ.}$$

ვინაიდან ნიადაგ-გრუნტებში წყალი და ჰაერი განლაგებულია ფორიანობის სივრცეში, ფორიანობის სიდიდე კი პირდაპირ დამოკიდებულებაშია მოცულობით მასასთან. ცხადია, რომ ჰაერის და წყლის არასახარბიელო შემცველობის გაუმჯობესება შეიძლება მოცულობითი მასის შემცირებით ანუ ნიადაგ-გრუნტების გაფხვიერებით [64].

ჩვენს მიერ ჩატარებული იყო ლომთაგორის ნიადაგ-გრუნტების კვლევა, რომლის შედეგები მოყვანილია ცხრილი #2.3.1, 2.3.2 და ნახაზი #2.3.1, 2 .3.2 სახით.

კვლევების შედეგები გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალური მოლეკულური წყალტევადობა (ანუ ჭკნობის ტენიანობა)  $w_{ჭკნ} = 19\%$ .

მცენარეთათვის ხელსაყრელი წყალჰაეროვანი რეჟიმი შენარჩუნებულია მოცულობითი მასების 1.0%-დან 1,4 გ/სმ<sup>3</sup>- მდე და უმცირესი წყალტევადობის 37,2%-დან 26,1-მდე ფარგლებში.

ნიადაგის შემცველი წყლის ჰიდროფიზიკური მახასიათებლები

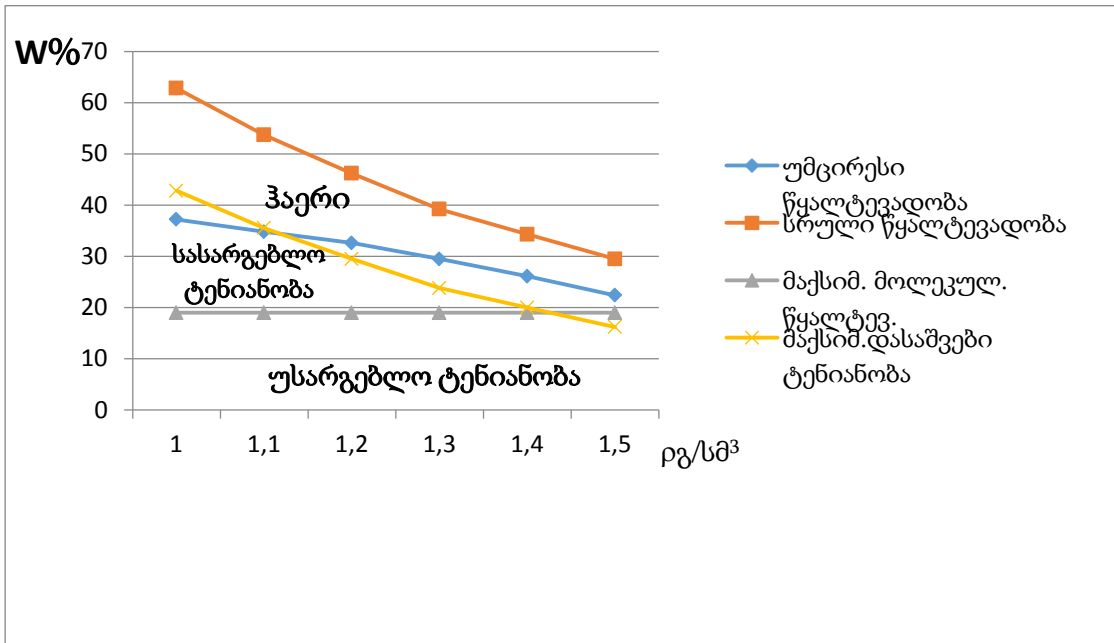
ცხრილი # 2.3.1

შრე (სმ)	Fფორიანობა %	სრული წყალტე მობილობა	უმცირე სი წყალტეცადობა %	მაქსიმალური მოლეკულური ჰიგროსკოპულობა	მაქსიმალური მოლეკულური წყალტეცადობა %	გაჯირჯევა %	წყალ მედეგობა	ფილტრაციის კოეფიციენტი A
0 - 15	49.0	36.3	30.5	9.2	18.0	4.9	8.0	$3 \cdot 10^{-4}$
15 - 30	48.0	34.3	28.6	9.0	18.0	5.9	4.0	$6 \cdot 10^{-4}$
31 - 45	46.1	31.8	27.2	8.1	17.0	5.4	0.0	$8 \cdot 10^{-4}$
45 -60	44.2	29.5	27.0	8.0	16.0	5.4	0.0	$2 \cdot 10^{-4}$

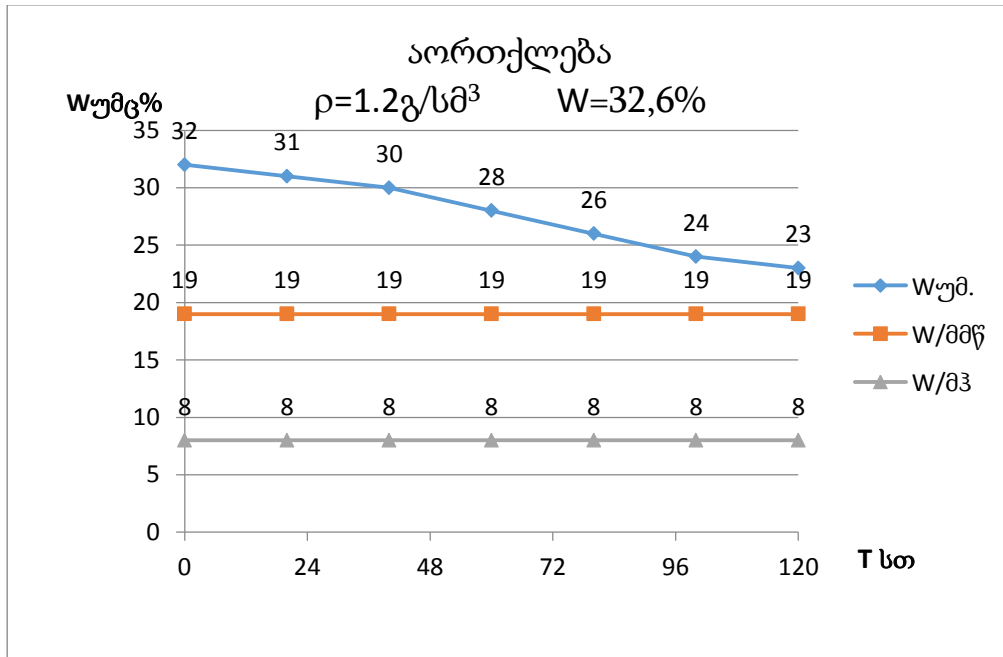
ნიადაგის წყალჰეროვანი რეჟიმი სხვადასხვა მოცულობითი მასების დროს

ცხრილი #2.3.2

კუთრი მასა $\varphi$ გ/სმ <sup>3</sup>	მოცულობითი მასა $\rho$ გ/სმ <sup>3</sup>	ფორიანობა $n = \frac{\varphi - \beta}{\varphi} \%$	სრული წყალტეცადობა $W_{სრ} = \frac{n}{\rho} \%$	უმცირესი წყალტეცადობა $W_{უმც.}$ %	მაქსიმალური მოლეკულური წყალტეცადობა $W_{მმწ.}$ %	ჰაერის თიხის მობილობის დასაშვები შემცველობა $W_A = \frac{20}{\rho} \%$	მაქსიმალურად დასაშვები ტენიანობა $W_{აქ} = W_{სრ} - W_A \%$	სასარგებლო წყლის შემცველობა $W_{სს.} = W_{აქ} - W_{აქ} \%$
2.69	1.5	44.2	29.5	22.4	19.0	13.3	16.2	-2.8
2.69	1.4	48.0	34.3	26.1	19.0	14.3	20.0	1.0
2.69	1.3	51.0	39.2	29.5	19.0	15.4	23.8	4.8
2.69	1.2	55.4	46.2	32.6	19.0	16.7	29.5	10.5
2.69	1.1	59.1	53.7	34.8	19.0	18.2	35.5	16.5
2.69	1.0	62.8	62.8	37.2	19.0	20.0	42.8	23.8



ნახ #2.3.1 ნიადაგში შესაძლებელი წყალ-ჰაერის შემცველობის დიაგრამა სხვადასხვა მოცულობითი მასების დროს



ნახ #2.3.2 ნიადაგში ტენიანობის განაწილების დინამიკა  $T = 25^{\circ}C$  და აორთქლების დროს  $\rho = 1.2 \text{ გ/სმ}^3$

ამრიგად, საკვლევი ფართობების ნიადაგ-გრუნტები, როდესაც მოცულობითი მასა  $\rho = 1.2 \div 2.2 \text{ გ/სმ}^3$  ფარგლებშია, მცენარე უზრუნველყოფილი იქნება წყლისა და ჰაერის შემცველობის ოპტიმალური რეჟიმით.

## 2.4 სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის განსაზღვრა და მისი გავლენა რწყვის რეჟიმზე

წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის მნიშვნელობა განსაზღვრულია ექსპერიმენტალური მონაცემებით, რომელიც პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით საკმაოდ დიდი სიზუსტით ხასიათდება. მათემატიკური დამუშავების შედეგად მიღებულია, რომ  $K$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია  $H$  აქტიურ ფენაზე.

წყალმოთხოვნილების  $K_1$  კოეფიციენტის მნიშვნელობა ნიადაგის აქტიური ფენის  $H$  სიღრმეზე ბოსტნის კულტურებისათვის ტოლია  $H_1 = 0.3 - 0.5$ , მინდვრის კულტურებისათვის  $H_2 = 0.6 - 0.7$ , მრავალწლიანი ნარგავებისათვის  $H_3 = 0.8 - 1.0$ ; წყალმოთხოვნილების  $K_2$  კოეფიციენტი, როცა  $H = H_1$ , აქტიური ფენის  $H$  და  $H_2$  მნიშვნელობების შესაბამისად  $K_1$ -ის მნიშვნელობა ტოლი იქნება  $K_1 = A H_1^m$  ხოლო  $K_2 = A H_2^m$ , წყალმოთხოვნილების  $K$  კოეფიციენტის დამოკიდებულება ნიადაგის აქტიურ ფენაზე გამოსახული გვაქვს შემდეგი სახით  $K = A H^m$ , ამიტო საძიებელი მნიშვნელობა, როდესაც  $H = H_1$  განისაზღვრება ფორმულით:

$$K_2 = K_1 \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{1.04}.$$

როგორც ცხრილიდან ირკვევა,  $K$  კოეფიციენტის ფაქტობრივი და ფორმულით განსაზღვრული მნიშვნელობები კარგ თანახვედრაშია

ერთმანეთთან. თუ ფორმულაში შევიტანთ მნიშვნელობებს მივიღებთ ფორმულას, როდესაც  $H = 0.6$  მ.

$$K_2 = K_2 D \left[ 0.6 \left( \frac{D}{6.7} \right)^{-0.807} \right] \left( \frac{H_2}{0.6} \right)^{1.04}$$

წყალმოთხოვნილება ცხადია გამოისახება ფორმულით:

$$E = K_2 D \left[ 0.6 \left( \frac{D}{6.7} \right)^{-0.807} \right] \left( \frac{H_2}{0.6} \right)^{1.04}$$

$$D = 2.76^{0.193} \left( \frac{H_2}{0.6} \right)^{1.04}$$

წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის  $K$  -ს მნიშვნელობები ნიადაგის აქტიური ფენის სიღრმისა და ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის მიხედვით

ცხრილი # 2.4.1

ექსპერიმენტული მონაცემები საანგარიშო ფორმულის მიხედვით							
$\frac{D}{H}$	6,07	10	15	$\frac{D}{H}$	6,07	10	15
0,5	0,60	0,43	0,32	0,5	0,60	0,43	0,32
0,6	0,60	0,50	0,37	0,6	0,60	0,504	0,363
0,7	0,60	0,57	0,42	0,7	0,60	0,579	0,417

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევის მიზანს შეადგენდა აგრეთვე ამ ფორმულის ექსპერიმენტული შემოწმება და შემდგომი განზოგადება ქვემო ქართლის მარნეულის - ლომთაგორას რწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში, ნიადაგის ზღვრული ტენტევალობის 60%-ის, 70% და 80%-ის დროს. ყოველ 5-10 დღეში ერთხელ ტენსაზომით ვზომავდით ნიადაგის ტენიანობას.

ამ პერიოდისათვის ვიღებდით მონაცემებს ატმოსფერული ნალექების, ჰაერის და ნიადაგის ტემპერატურის, ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა და სხვა. რის საფუძველზეც ვსაზღვრავდით აორთქლებული წყლის რაოდენობას და

ვადგენდით მორწყვის თარიღებს, შემდეგ ვსაზღვრავდით ნიადაგის აქტიურ ტენიანობის რწყვის ნამდვილ თარიღს, ფაქტობრივ აორთქლებას, რომელიც მოცემულია ცხრილების სახით ცხრილი # 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4:

**2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ჰაერის ტენიანობის დეფიციტის მონაცემები**

ცხრილი #2.4..2

ჰაერის ტენიანობის დეფიციტი D					
წლები თვეები	2014	2015	2016	ჯამი	მრავალწ ლიურის საშუალო D
იანვარი	1.65	1.35	1.35	4.35	1.45
თებერვალი	3	0.9	1.12	5.02	1.67
მარტი	2.46	2.46	1.2	6.12	2.04
აპრილი	3.82	3.9	5.1	12.82	4.07
მაისი	6.3	4.05	5.55	15.9	5.3
ივნისი	9.97	–	8.025	17.995	5.9
ივლისი	13.42	9.9	9.45	32.77	10.92
აგვისტო	10.2	9.6	8.7	28.5	9.5
სექტემბერი	8.48	5.4	5.78	19.66	6.55
ოქტომბერი	4.87	3.45	2.77	11.09	3.69
ნოემბერი	1.95	1.42	1.5	4.87	1.62
დეკემბერი	1.95	1.35	1.5	4.8	1.6
ჯამი	68.07	43.78	52.045		
საშუალო	5.7	–	4.35		

ჩვენი ცდის პირობებში მოვახდინეთ რწყვის ვადების კორექტირება დეკადების მიხედვით, ჰაერის ტემპერატურისა და მოსული ნალექების სათანადო შეფასებითა და გათვალისწინებით. პომიდვრის ფაქტობრივი წყალმოთხოვნილება განისაზღვრება სხვადასხვა რწყვის რეჟიმის პირობებში საბალანსო გაანგარიშების საფუძველზე.



ატმოსფერული ნალექების დეფიციტი  $\Delta P$  მმ

ცხრილი #2.4.3

ჰაერის საშუალო ტემპერატურა $t-C^0$	ატმოსფერული ნალექები P მმ	ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა r	K(Fao)	Kტ	აორთქლებადობა საანგარიშო პერიოდში E	ატმოსფერული ნალექების დეფიციტი $\Delta P$ მმ
12.36	33.3	65	0.6	-142.25	87.46 მმ	-48.55
17.76	57.3	69.3	0.6	-77.81	101.31 მმ	-53.09
22.4	75	60.6	1.15	-179.09	159.34 მმ	-81.92
24.76	28.3	58.3	1.15	-1055.5	187.56 მმ	-165.56
26.67	5.6	61	0.8	-6070.6	187.2 მმ	-215.44
20.66	27.3	68.3	0.8	-398.71	118.87 მმ	-155.91

2014, 2015, 2016 წლების სავეგეტაციო პერიოდის ფარდობით ტენიანობის მონაცემები

ცხრილი #2.4.4

ფარდობით ტენიანობა r					
წლები \ / თვეები	2014 წელი	2015 წელი	2016 წელი	მრავალწლიური r-ის ჯამი	მრავალწლიური r-ის მონაცემების საშუალო
აპრილი	72	65	58	195	65
მაისი	64	76	68	208	69.3
ივნისი	58	61	63	182	60.6
ივლისი	51	62	62	175	58.3
აგვისტო	56	61	66	183	61
სექტემბერი	62	72	71	205	68.3
ჯამი	363	397	388	-	-
საშუალო	60.5	66.17	64.6	-	-

2016 წლის 15 აგვისტოს შემდგომ პომიდორი შევიდა სრულ სიმწიფეში და რწყვა არ დაგვიჩირდა, რადგან მოვიდა 75მმ ატმოსფერული ნალექი.

2015, 2016 წელს ნიადაგის ტენიანობის დინამიკა რწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში ისაზღვრებოდა საბალანსო ცხრილების სახით, რომელშიც ნაჩვენებია იყო საანგარიშო ინტერვალის თარიღები, ხანგრძლივობა დღე-ღამეში, ნიადაგში არსებული ტენის მარაგი, საანგარიშო პერიოდის დასაწყისსა და ბოლოში მილიმეტრობით, პროცენტებში წონიდან და პროცენტებში ზღვრული წყალტევადობიდან.

ცდიდან ჩანს, რომ რაც უფრო მეტია ნიადაგის ტენიანობა, მოსავლიანობაც მაქსიმალურია. ნიადაგის ზღვრული ტენტევადობის 75-80 პროცენტის დროს 2015 წელს მაქსიმალური მოსავალი მივიღეთ 50 ტ/ჰა-ზე, ხოლო 2016 წელს 48ტ/ჰა-ზე [63].

რწყვის ვადები მორწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში

ცხრილი #2.4.5

წლები	რწყვის ვარიანტები	თესვის წინა რწყვა	სავეგეტაციო რწყვები							
			3-4 ფოთლის ფაზაში (ჩითილის გადარგვა)	8-10 ფოთლის ფაზა	12-14 ფოთლის ფაზა	ყვევლიობა	ნაყოფის გამონასკვა	საშუალო სიმწიფე	სრული სიმწიფე	მოსავლიანობა ტ/ჰ
2015	55-60%	15/III	5-10/IV	10-15/V	25-30/V	15-25/VI	5-15/VII	5-10/VIII	20 - 30/VI11	30
	65-70%	15/III	5-10/IV	10-15/V	25/V-5/VI	20-30/VI	10-20/VII	25/VII-5/VIII	20 - 30/VI11	35
	75-80%	15/III	5-10/IV	10-15/V	20-25/V	10-20/VI	25-30/VI	20-30/VII	15 - 25/VI11	50
2016	55-60%	-	5-10/IV	10-15/V	20-25/V	10-25/VI	5-20/VII	5-10/VIII	-	25
	65-70%	-	5-10/IV	10-15/V	15-25/V	20-30/VI	10-20/VII	5-10/VIII	-	30
	75-80%	-	5-10/IV	20-25/IV	5-15/V	15-30/VI	10-20/VII	5-15/VIII	-	48

### თავი III.

## რწყვის რეჟიმის პარამეტრების თეორიული კვლევა ირიგაციული ეროზიის განმაპირობებელი ფაქტორების გათვალისწინებით

### 3.1 ნიადაგ-გრუნტების წყლოვანი მახასიათებლების თეორიული კვლევა და მათი გავლენა ირიგაციულ ეროზიასა და რწყვის რეჟიმზე

ნიადაგების ირიგაციული ეროზიის განმაპირობებელ ფაქტორთა შორის ძირითადი როლი სარწყავ ფართობზე მისაწოდებელი წყლის რაოდენობას მიეკუთვნება, რადგან ნაკადის ჰიდრომექანიკური ძალური ზემოქმედება განსაზღვრავს ირიგაციული დანიშნულების მიწის არხების წონასწორობის სტატიკურ და დინამიკურ ფორმებს.

ზედაპირული მორწყვის შემთხვევაში, გარემოს ეკოლოგიური ბალანსის დაცვა და საპროექტო მოსავლის მიღება რთულდება თუ არ მოხდა სარწყავი წყლის რეგულირება დამატებითი ფაქტორების გათვალისწინება. კერძოდ, რწყვა ისე უნდა განხორციელდეს, რომ არ მოხდეს ზედაპირული ნაკადის „გადაგდება“, წყლის ჩაჟონვა გასატენიანებელ საპროექტო შრეში უფრო ღრმა ფენებში, ე.ი. რეალიზებულ იქნას მორწყვის ნორმისა და ჰიდრომოდულის მნიშვნელობათა დაცვა, ზედაპირული და ფილტრაციულ-ინფილტრაციული დანაკარგების გარეშე [65].

დღეისათვის, ინფილტრაციული პროცესების, ჰიდროგეოლოგიური რეჟიმის და ნიადაგის აქტიურ შრეში პროდუქტიული წყლის მარაგის დინამიკაზე საიმედო პროგნოზი დამოკიდებულია ფილტრაციულ-კაპილარული წყალგამტარობის ინტეგრალური მახასიათებლის (პარამეტრის), ანუ ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის სიზუსტეს, რომელიც

გამოხატავს ნიადაგ-გრუნტებში ფილტრაციულ-კაპილარული პოტენციალის ცვალებადობას და რის საფუძველზეც შეიძლება მოხდეს წყალმიწოდების გრაფიკისა და მორწყვის ნორმის კორექტირება ვეგეტაციის ამა თუ იმ პერიოდში [66].

ნიადაგი, როგორც კაპილარულ-ფოროვანი სხეული მეტად მგრძნობიარეა საანგარიშო პარამეტრის მიმართ და უმნიშვნელო ზემოქმედებაც კი იწვევს ინფილტრაციის კოეფიციენტის ერთ ან რამდენიმე რიგით შეცვლას [67].

ზოლებად მორწყვის შემთხვევაში სარწყავი წყლის გარკვეული ნაწილი მიედინება ზედაპირზე, ხოლო მეორე ნაწილი ჩაიჭონება ნიადაგში. ფილტრაციული ნაკადის სიჩქარე, ანალოგიურად დარსის ხაზოვანი კანონისა, შეიძლება გამოვხატოთ შემდეგი სახით:

$$V = KI = K \frac{h+z+h_3-h_3}{z}, \quad (\text{მ/წმ}) \quad (3.1.1)$$

- სადაც:  $K$  არის ფილტრაციის კოეფიციენტია;
- $I$  - დაწნევის გრადიენტი;
- $h$  - წყლის ფენის სისქე ნიადაგის ზედაპირზე;
- $h_3$  - კაპილარული წნევის სიმაღლე;
- $h_3$  - ნიადაგის ფორებში დახშული ჰაერის პნევმატური წნევა;
- $z$  - ნიადაგის სიღრმეში წყლის ფრონტის გადაადგილების კოორდინატი.

ნიადაგის ერთი და იგივე კვეთში დროის სხვადასხვა მომენტისათვის  $h$  ცვალებადია,  $V_{\text{ფ}}$  - მცირდება წყლის ვერტიკალურად გადაადგილებასთან ერთად და ის ყოველთვის მეტია  $K$ -ზე. დახშული ჰაერის გავლენა წყალგამტარობაზე, ჰიდროდინამიკური მოდელის გამოყენებით, შესწავლილ

იქნა, რომლის მიხედვითაც მოლეკულურად ბმული წყლის აფსკი მილის კედლების ზომებს ამცირებს, ხოლო მილის ცენტრში გამავალი ღრუტანიანი ცილინდრული მილი შეესებულება ჰაერის უძრავი „ბალასტი“. ზოგადად წყალშთანთქმის ინფილტრაციული პროცესი განიხილება, როგორც ენერგია-მასის გაცვლის თერმოდინამიკური ფორმა, რომლის წონასწორობასაც განსაზღვრავენ ზედაპირულ-მოლეკულური და კაპილარული ძალების ერთობლივი ზემოქმედება სისტემაზე [68].

ნიადაგის არასრული წყალშევსების შემთხვევაში, რაც დამახასიათებელია მორწყვის წინა პერიოდისათვის, წყალშთანთქმის სიჩქარის დინამიკა გამოიხატება შემდეგი ფორმულით [40]:

$$V_g = K_t I_t = \frac{K_0}{t^\alpha} \quad (\text{მ/წმ}) \quad (3.1.2)$$

სადაც:  $V_g$  არის წყალშთანთქმის სიჩქარე დროის ნებისმიერ მომენტში;

$K_t$  - წყალგამტარობის კოეფიციენტი;

$I_t$  - დაწნევის გრადიენტი;

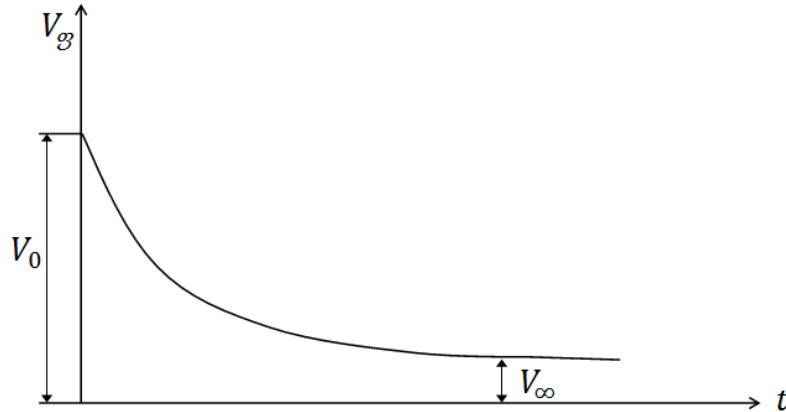
$K_0$  - დროის პირველ ერთეულში წყალგამტარობის კოეფიციენტი;

$\alpha$  - ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც აიღება  $0,3 \div 0,8$  ფარგლებში;

$t$  - დრო.

ადვილად შესამჩნევია, რომ (3.1.1) და (3.1.2) ფორმულებს შორის სრული ანალოგია არსებობს, რადგან (3.1.1) დამოკიდებულებაში გრადიენტი  $z$ -ის ფუნქციაა, ხოლო  $z-I$  დროის. წყალშთანთქმის სიჩქარის ცვალებადობის საერთო ხასიათი შეიძლება წარმოდგენილ იქნას აპროქსიმირებული მრუდით ნახ. 3.1.

$$V_g = V_\infty + (V_0 - V_\infty)e^{-\alpha t} \quad (3.1.3)$$



**ნახაზი. 3.1.1 წყალგამტარობის დინამიკის საილუსტრაციო გრაფიკი**

(3.1.3) დამოკიდებულება აკმაყოფილებს შემდეგ სასაზღვრო პირობებს:  $t = 0$ ;  $V_g = V_0$ ;  $t = \infty$ ;  $V_g = V_\infty$ ;  $t = \infty$  ის დროა, როდესაც მრუდის ამ წერტილში გავლებული მხები კოლინეარულია  $t$  ღერძის. მიუხედავად ამ შენიშვნებისა შედარების ჩასატარებლად ვიყენებთ (3.1.2) დამოკიდებულებას. ამის შესაბამისად ჩაჟონვის საშუალო სიჩქარე განისაზღვრება:

$$V_g = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{K_0}{t^\alpha} dt = \frac{1}{1-\alpha} \frac{K_0}{t^\alpha} \quad (\text{მ/წმ}). \quad (3.1.4)$$

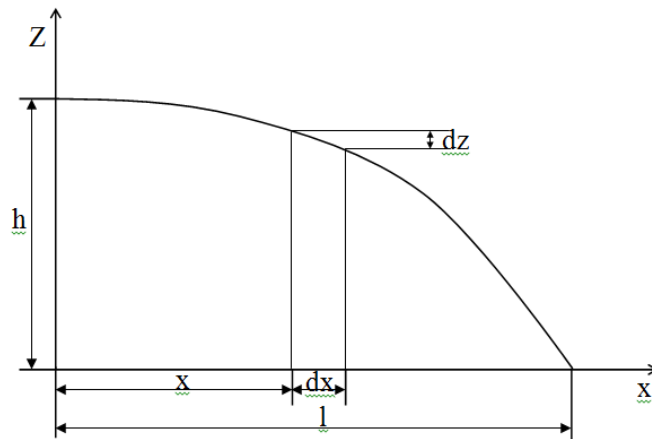
(3.1.4) ფორმულის მიხედვით, ინფილტრაციის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა დროის ადებულ ინტერვალში იქნება:

$$\bar{K} = \frac{K_0}{1-\alpha}. \quad (3.1.5)$$

$K_0$  -კოეფიციენტი და ხარისხის მაჩვენებელი  $\alpha$  განისაზღვრება ექსპერიმენტის ჩატარების გზით, მოცემული ნიადაგის ურღვევი სტრუქტურისა და სრული წყალგაჯერების პირობებში. ჩვენს მიერ დასმული ამოცანის ჩარჩოებში ამა თუ იმ პარამეტრის ცვალებადობის გათვალისწინებას და მის ალბათურ-სტატისტიკურ უზრუნველყოფას არავითარი მნიშვნელობა

არ ენიჭება, რადგან ის თანაბარზომიერად ახდენს გავლენას არსებული და ახლად მიღებული საანგარიშო მოდელების გამოყენებით შედეგებზე.

ნიადაგ-გრუნტის წყლისმიერი ირიგაციული ეროზიის გამორიცხვის აუცილებელი პირობა მოითხოვს ზოგიერთი პარამეტრის დაზუსტების საფუძველზე საანგარიშო მოდელის კორექტირებას. ზოლებში მიშვებით მორწყვის თეორიული შესწავლა საშუალებას იძლევა დავადგინოთ მორწყვის ხანგრძლივობა და შევარჩიოთ ტექნოლოგიური სქემა, რომელიც უზრუნველყოფს რწყვის მაქსიმალურ ეფექტურობას ნიადაგის ირიგაციული ეროზიის მინიმუმამდე დაყვანით [69].



**ნახაზი 3.1.2 ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის საანგარიშო სქემა**

ნახაზ 3.1.2 ნაჩვენები სქემის თანახმად მიჩნეულია, რომ წყლის ფენა, რომელსაც სარწყავი ზოლის სათავეში აქვს  $h$  სიღრმე,  $t$  დროის განმავლობაში, რაღაც  $l$  მანძილზე მთლიანად შთაინთქმება ნიადაგის მიერ. მოცემული ქანობისა და წყალშთანთქმის კოეფიციენტის მიხედვით საჭიროა განისაზღვროს ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდის ფორმა. ბრტყელი ნაკადის საშუალო სიჩქარე სათავიდან  $x$  მანძილით დაშორებულ კვეთში, იქნება: წყლის სიღრმე პრაქტიკულად იცვლება  $(1,0 \div 4,0)10^{-2}$ მ, ამიტომ  $\delta$  შედარებით ითვლება უთანაზომოდ, ანუ შესაძლებელია მისი უგულებელყოფა. წყლის ხვედრითი ხარჯი  $x$  კვეთში:



$$V_x = \frac{87\sqrt{z}}{\delta + \sqrt{z}} \cdot \sqrt{zi} \quad (\text{მ/წმ}), \quad (3.1.6)$$

სადაც:  $\delta$  არის სარწყავი ფართობის ზედაპირის ხორკლიანობის კოეფიციენტი, რომელიც აიღება  $1,4 \div 4,0$ ;  
 $i$  - ფართობის ზედაპირის ქანობი.

$$q_x = \frac{87\sqrt{z}}{\delta} \sqrt{zi} \cdot z = az^2, \text{ მ}^3/\text{წმ}. \quad (3.1.7)$$

სადაც:  $a = \frac{87\sqrt{i}}{\delta}$ .

ნაკადის  $z$  და  $z_1$  სიმაღლეების მქონე კვეთების ხვედრით ხარჯებს შორის სხვაობა ტოილ იქნება:

$$\Delta q = az^2 - a(z - dz)^2 = 2azdz. \quad (3.1.8)$$

$\Delta q$  - ხვედრითი ხარჯის სიდიდეს განსაზღვრავს  $dx$  მანძილზე წყლის ჩაჟონვა და ზედაპირზე მისი დაგროვება. სარწყავი ზოლის  $x$  სიგრძეზე დაგროვილი წყლის რაოდენობა მით უფრო მეტია, რაც მეტია სათავეში ხვედრითი ხარჯი  $q$  და რაც უფრო ნაკლებია ხორკლიანობა და ზედაპირის ქანობი. დაგროვილი და ჩაჟონილი წყლის რაოდენობათა თანაფარდობის მაჩვენებელი  $\beta$  პირდაპირპროპორციულია  $q$  და უკუპროპორციულია  $i$  -ს. ნიადაგში წყლის ჩაჟონვის საშუალო სიჩქარე რაღაც  $x$  მანძილზე დროის  $t$  ინტერვალში ტოილ იქნება  $\beta K_0/t^\alpha$ , ხოლო წყლის ბალანსის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$2azdz + \beta \frac{K_0}{t^\alpha} dx = 0. \quad (3.1.9)$$

ამ განტოლების ინტეგრება და სასაზღვრო პირობის გამოყენება  $x = 0$ ;  $z = h$  გვაძლევს:

$$a(h^2 - z^2) = \frac{\beta K_0}{t^\alpha} x. \quad (3.1.10)$$

თუ  $x$  მანძილად ავიღებთ ნაკადის დაწვევის მანძილს მორწყვის დამთავრების დროის  $t$  მომენტისათვის, როცა  $z = 0$ , მაშინ (3.1.10) განტოლების მიხედვით, გვექნება:

$$ah^2 = q = \frac{\beta K_0}{t^\alpha} x, \quad (3.1.11)$$

საიდანაც, ადვილად განისაზღვრება გარბენის მანძილი  $x$ :

$$x = \frac{q}{\beta K_0} t^\alpha. \quad (3.1.12)$$

წყლის ჩამონადენის ბალანსის განტოლებაში (3.1.9) ცხადი სახით არ მონაწილეობს ფილტრაციული დაწვევის გრადიენტი, რომლის მნიშვნელობაც თეორიულად იცვლება უსასრულობიდან ერთამდე. თუ გავითვალისწინებთ გრადიენტის ცვალებადობას რაღაც ხაზოვანი ფუნქციის სახით  $I = 1 + a_0 z$ , მაშინ ნაკადის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$2azdz = \frac{\beta K_0}{t^\alpha} (1 + a_0 z) dz. \quad (3.1.13)$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრება,  $q = ah^2$  გათვალისწინებით გვაძლევს:

$$x = \frac{q}{\beta K_0} t^\alpha \frac{2}{(a_0 h)^2} \left[ a_0 (h - z) + \ln \frac{1 + a_0 z}{1 + a_0 h} \right]. \quad (3.1.14)$$

აღნიშვნის შემოღებით

$$r = \frac{2}{(a_0 h)^2} \left[ a_0 (h - z) + \ln \frac{1 + a_0 z}{1 + a_0 h} \right],$$

მივიღებთ:

$$x = \frac{q}{\beta K_0} t^\alpha r. \quad (3.1.15)$$

ეს დამოკიდებულება განსხვავდება (3.1.12) დამოკიდებულებისაგან  $r$  პარამეტრით, რომელიც თავის მხრივ წარმოადგენს  $z$ -ის ფუნქციას და ითვალისწინებს ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტის ცვალებადობას ჩაჟონვის სიღრმის მიხედვით. გარბენის სიგრძის განმსაზღვრელი (3.1.14) დამოკიდებულების შესადარებლად (3.1.12) დამოკიდებულებასთან, თვალსაჩინოების მიზნით კონკრეტულ მაგალითზე ჩატარებული გაანგარიშება, როცა  $a_0 h = 1,72$  გვაძლევს, რომ  $r = 0,5$ , რაც ნიშნავს, რომ ნაკადის გარბენის სიგრძე (3.1.12) ფორმულით ორჯერ აღემატება (3.1.14) ფორმულით გამოთვლილს. ასეთი შედეგი მიუთითებს იმაზე, თუ რამდენად დიდი მნიშვნელობა გააჩნია გრადიენტის გათვალისწინებას გარბენის სიგრძის განსაზღვრისათვის, რომელიც რწყვის ტექნიკის ერთ-ერთი ძირითადი ელემენტია. ცხადია, ზედაპირული მორწყვის სხვა ელემენტები, გამოთვლილი ჩვენს მიერ მიღებული ახალი საანგარიშო დამოკიდებულების გამოყენებით, დაექვემდებარება სათანადო კორექტირებას [70].

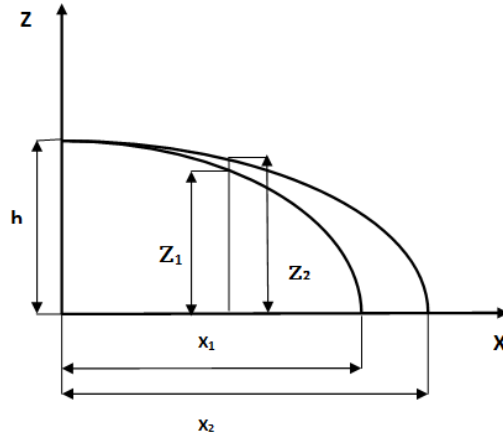
ზედაპირული ჩამონადენის სიღრმე (3.1.10) დამოკიდებულებიდან, როცა  $q = ah^2$ , გამოითვლება ფორმულით:

$$z = h \sqrt{1 - \frac{\beta K_0}{qt^\alpha}}. \quad (3.1.16)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ  $t$ -ს ზრდასთან ერთად ნაკადის სიღრმე ფიქსირებულ კვეთში თანდათან იზრდება და უახლოვდება  $h$  სიღრმეს, რაც სქემატურად ილუსტრირებულია ნახაზ 3.1.3-ზე მოყვანილი ზედაპირული ნაკადის სიღრმის ცვალებადობის მრუდებით.

გადაგდებული წყლის ხვედრითი ხარჯი დროის  $t$  მომენტისათვის გამოითვლება:

$$q_x = q \cdot \left(1 - \frac{\beta K_0}{qt^\alpha}\right). \quad (3.1.17)$$



ნახაზი 3.1.3 ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ცვალებადობის მრუდი.

$$z = f(x); \quad x = \varphi(t).$$

გადაგდებული ხარჯის ხვედრითი წილი, იქნება მით უფრო მეტი, რაც მეტია სათავეში ხარჯი, ნაკლებია ზოლის სიგრძე და დაბალია ნიადაგის წყალშთანთქმის უნარიანობა. აგრეთვე ტრანზიტული ხარჯის ხვედრითი წილი იზრდება მორწყვის ხანგრძლივობის პროპორციულად. სარწყავი ზოლის მთელ სიგრძეზე ტენიანობის განაწილება დამოკიდებულია რწყვის პერიოდის ხანგრძლივობაზე. დროის  $t$  მონაკვეთში ხდება ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირება ზოლის ბოლოში, რომელიც იცვლება ხარჯის ნულოვანი მნიშვნელობიდან მის გარკვეულ სიდიდემდე, რომელიც ისევ ეცემა ნულამდე. წყლის საერთო რაოდენობა, რომელიც ჩამოედინება ზოლის ბოლოში, შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი დამოკიდებულების საფუძველზე:

$$W = qt = \frac{mx}{1-\sigma}, \quad (3.1.18)$$

სადაც  $m$  არის მორწყვის ნორმა;

$\sigma$  - წყლის ჩამოდინებული და მიწოდებული რაოდენობის ფარდობა;

ზემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებები საშუალებას იძლევა განისაზღვროს ზოლოვანი თვითდინებითი რწყვის ელემენტები, რომლებიც

ყოველ კონკრეტულ ნიადაგურ-რელიეფურ პირობებში დააკმაყოფილებენ ნიადაგის თანაბარი გატენიანების, სარწყავი წყლის საჭირო რაოდენობის გეგმიური მიწოდების, მინიმალური ფილტრაციული დანაკარგების უზრუნველყოფას და სხვა შემზღვევად მოთხოვნებს [71].

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, მიღებული (3.1.18) დამოკიდებულების გარდაქმნით მორწყვის ნორმის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$m = \frac{W(1-\sigma)}{x} (\sigma^3) \quad (3.1.19)$$

როგორც დამოკიდებულებიდან ჩანს, მორწყვის ნორმა მიწოდებული წყლის მოცულობის პირდაპირპროპორციულია და დამოკიდებულია ნაკადის გარბენის სიგრძეზე, ანუ სარწყავი კვლის ზოლის სიგრძეზე და ნიადაგ-გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკურ შემადგენლობაზე [72].

ნიადაგის თანაბარი გატენიანების ზონის გაზრდისათვის დასაშვებია მორწყვა ზოლის ბოლოში ჩამონადენის ფორმირებით. საორიენტაციო გაანგარიშებისათვის მიღებულია ხვედრითი ხარჯის ლიმიტი არა უმეტეს (3-5)103 მ<sup>3</sup>/წმ ფარგლებში. ამ შენიშვნის გათვალისწინებით, მიზანშეწონილად უნდა ჩაითვალოს თანდათანობით შემცირებული ხარჯით რწყვის ჩატარება, რათა წყალშთანთქმის და წყალმიწოდების ინტენსივობანი ერთმანეთს მაქსიმალურად დაუახლოვდნენ [73].

სარწყავი ნაკადის ხარჯი ზოლებად მორწყვის შემთხვევაში გაურეცხვადობის პირობის გათვალისწინებით, შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი დამოკიდებულების მიხედვით:

$$Q = bq = bah^2 = \frac{\beta K_0 bx}{t^\alpha} = \frac{bV_0^2}{a}, \quad (3.1.20)$$

სადაც:  $b$  არის სარწყავი ზოლის სიგანე;

$V_{\text{დ}}$  - დასაშვები (არაგამრეცხი) სიჩქარე, რომელიც იანგარიშება არსებული კორექტირებული ან ჩვენს მიერ შემოთავაზებული დამოკიდებულებით.

რიგ სამეცნიერო ნაშრომებში წარმოდგენილ იქნა ფილტრაციული პროცესი ცალკეული სტადიების მიხედვით, რომელთა კლასიფიკაციური კუთვნილება დაექვემდებარა ფილტრაციის ტანში წყალგაჯერების ხარისხის მაჩვენებელს და შესაბამისად პოტენციური ფუნქციის გრადაციას ატმოსფერულ დაწნევასთან კავშირში [70], ხოლო ფილტრაციული პროცესის (დინების) სტადიების შეფასებამ გარკვეული კონკრეტიზაცია შეიძინა [67].

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ბუნებრივ-გეოტექნიკურ კალაპოტში გამავალი არხებიდან ფილტრაციის საანგარიშო ჰიდრავლიკური მოდელი [72] ემყარება დაშვებას, რომლის მიხედვითაც ფილტრაციული ნაკადი უპირატესად მოძრაობს გრავიტაციული ძალის გავლენით და უგულვებელყოფილია სიჩქარის ჰორიზონტალური მდგენელი, რაც გულისხმობს, რომ არხის ფსკერიდან გარკვეულ მანძილამდე ექვიპოტენციური ზედაპირი მკვეთრად ჰორიზონტალურია, ხოლო დინების წირები მისი ორთოგონალურია. ამასთან ერთად, ჩვენ მივიღეთ ჰიპოთეზა, რომლის მიხედვითაც ჰიდრავლიკურად უხელსაყრელესი არხის განივკვეთი ხასიათდება ცოცხალი კვეთის ფართობის მაქსიმუმით, რომელსაც შეესაბამება სველი პერიმეტრის მინიმალური მნიშვნელობა, ამიტომაც ასეთი არხიდან ფილტრაციული ხარჯი სავარაუდოდ უნდა იყოს მინიმალური, თუმცა ასეთ დაშვებას, რაიმე თუნდაც ლოგიკური დასაბუთების გარეშე არ იზიარებს რიგი მკვლევარი [71].

ქვემოთ მოყვანილი გაანგარიშებანი ძირითადად გამოხატავენ დამყარებული ფილტრაციის რეჟიმს, ნაკადის მოძრაობა ვერტიკალური მიმართულებისაა სიჩქარის ჰორიზონტალური მდგენელი ნულის ტოლია,

ხოლო დეპრესიის თავისუფალ ზედაპირზე „განლაგებული“ კაპილარული ქობი გავლენას არ ახდენს ფილტრაციული ხარჯის სიდიდეზე.

ტოლფერდა ტრაპეციული არხის განივკვეთის ფართობი, რომელიც მიიღება ცოცხალი კვეთის ფართობის ტოლად, გამოითვლება:

$$\omega = h^2(b + m), \quad (3.1.21)$$

ხოლო სველი პერიმეტრი:

$$\kappa = h(\beta + 2\sqrt{1 + m^2}). \quad (3.1.22)$$

(3.21) და (3.22) ფორმულებში მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$\omega$	არის	ცოცხალი კვეთის ფართობი ( $m^2$ );
$h$	-	წყლის სიღრმე, (მ);
$\beta$	-	ფარდობითი სიგანე;
$b$	-	არხის ფუძის სიგანე, (მ);
$m$	-	ფერდის დახრის კოეფიციენტი;
$\kappa$	-	სველი პერიმეტრი, (მ).

იმისათვის, რომ გამოვხატოთ ჰიდრავლიკურად უხელსაყრელესი კვეთი არხის მახასიათებელი პარამეტრებით, ცხადია უნდა ვიპოვოთ (3.1.18) და (3.1.20) ფუნქციების მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები, რაც ნიშნავს, რომ უნდა შესრულდეს პირობები:

$$\frac{d\omega}{d\beta} = 0 \text{ და } \frac{d\kappa}{d\beta} = 0.$$

(3.1.21) და (3.1.22) დამოკიდებულებების გაწარმოებით და მოყვანილი პირობის დაცვით მივიღებთ:

$$\frac{d\omega}{d\beta} = 2h\beta \frac{dh}{d\beta} + h^2 + 2mh \frac{dh}{d\beta} = 0, \quad (3.1.23)$$

$$\frac{df}{d\beta} = \beta \frac{dh}{d\beta} + h + 2\sqrt{1+m^2} \frac{dh}{d\beta} = 0. \quad (3.1.24)$$

(3.1.23) და (3.1.24) განტოლებათა სისტემის ამოხსნით გვექნება, რომ ჰიდრავლიკურად უხელსაყრელესი კვეთისათვის:

$$\beta = \frac{b}{h} = 2(\sqrt{1+m^2} - m). \quad (3.1.25)$$

ანგარიშის შემდგომი ეტაპი მოიცავს ისეთი ვირტუალური სწორკუთხა კვეთის გაბარიტების შერჩევას, რომელსაც ექნება ისეთივე გამტარუნარიანობა, რაც გააჩნია რეალურ ტრაპეციულ არხს, წყლის ნაკადის თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში. ხარჯი შეიძლება გამოვთვალოთ უწყვეტობის პირობიდან:

$$Q = \omega V = h^2(b + mh)C\sqrt{RI}, \quad (3.1.26)$$

სადაც:  $C$  არის სიჩქარის (წინაღობის) კოეფიციენტი;  
 $R$  - ჰიდრავლიკური რადიუსი;  
 $I$  - ჰიდრავლიკური ქანობი, რომელიც თანაბარი ძრაობის შემთხვევაში აიღება არხის ფსკერის ქანობის ტოლად.

თუ მივიღებთ, რომ:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (3.1.27)$$

სადაც:  $n$  არის წყალგამტარი კალაპოტის ხორკლიანობის კოეფიციენტი.

მაშინ შეიძლება დავწეროთ:

$$Q = \frac{1}{n} h(b + mh)R^{2/3}\sqrt{I}. \quad (3.1.28)$$

ვირტუალური სწორკუთხა კვეთისათვის, რომლის სიგანეა  $b_0$ , განსაზღვრული ჰიდროდინამიკური ბადის მიხედვით თავისუფალი



ფილტრაციის ზონაში, ხოლო  $h_0$  წყლის სიღრმე არხში, გამტარუნარიანობა განისაზღვრება:

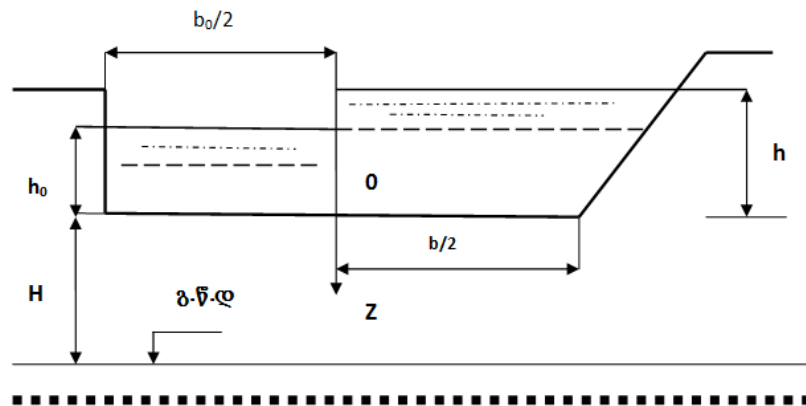
$$Q_0 = \frac{1}{n} b_0 h_0 R_0^{2/3} \sqrt{I}. \quad (3.1.29)$$

(3.1.25)-ის გათვალისწინებით, (3.1.28) და (3.1.29) გამოსახულებათა ურთიერთ გატოლებით და სათანადო გარდაქმნებით, რომელიც ასევე მოიცავს ჰიდრავლიკური რადიუსების ცხადი სახით წარმოდგენას, მივიღებთ:

$$\frac{(b_0 h_0)^{5/3}}{(b_0 + 2h_0)^{2/3}} = ah^{8/3}, \quad (3.1.30)$$

სადაც: 
$$a = \frac{(2\sqrt{1+m^2}-m)^{5/3}}{(1+m^2+\sqrt{1+m^2}-m)^{2/3} 3\sqrt{4}}.$$

(3.1.30) განტოლებიდან კონკრეტული მონაცემებისათვის, თანდათანობითი შერჩევის წესით ან კიდევ სათანადო გრაფიკების შედგენით კოეფიციენტის მიხედვით ადვილად განისაზღვრება სიდიდე. წინასწარ ჩატარებული გაანგარიშების შემდეგ ფილტრაციის დინების სურათი შეიძლება წარმოვიდგინოთ ნახაზ 3.1.4-ზე მოცემული სქემის მიხედვით.



ნახაზი 3.1.4 ვერტიკალური მიმართულებით ფილტრაციის საანგარიშო სქემა

ფილტრაციის პროცესის საწყის პერიოდში, ანუ გრუნტის ფორების წყალშევსებამდე, წყლის გადაადგილებაში ერთდროულად მონაწილეობს

როგორც გრავიტაციული, ასევე კაპილარულ-ოსმური და სხვა კატეგორიის ძალები. ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრისათვის დაუმყარებელი რეჟიმის ამ სტადიაზე ფილტრაციის სიჩქარე შეიძლება გამოვხატოთ, როგორც გრადიენტის გუნქცია, ან კიდევ სიჩქარე – ფუნქცია დროის. პირველ შემთხვევაში ფილტრაციის ხვედრითი ხარჯი განისაზღვრება:

$$q = K_0 \frac{z+h_0+\sum h}{z} b_0. \quad (3.1.31)$$

მეორე შემთხვევაში:

$$q = K_1 b_0. \quad (3.1.32)$$

განსაზღვრისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ რომელიმე განტოლებით, ან კიდევ აპროქსიმირებული შემდეგი სახის დამოკიდებულებით:

$$K_1 = K_0 + (K' - K_0) \exp(-at). \quad (3.1.33)$$

(3.1.31), (3.1.32) და (3.1.33) დამოკიდებულებებში გამოყენებული გვაქვს შემდეგი აღნიშვნები:

სადაც:	$q$	არის	ფილტრაციის ხვედრითი ხარჯი არხის სიგრძის ერთეულზე;
	$K_0$	-	ფილტრაციის კოეფიციენტი;
	$z$	-	კოორდინატი, აღებული არხის ფსკერიდან განსახილველ კვეთამდე;
	$h_0$	-	წყლის სიღრმე არხში;
	$\sum h$	-	ყველა ზედაპირული ძალების დაწნევათა ჯამი;
	$b_0$	-	ვირტუალური სწორკუთხა არხის საანგარიშო სიგანე;
	$K_1$	-	ინფილტრაციის კოეფიციენტი;

- $K'$  - ინფილტრაციის კოეფიციენტი დროის საწყისი მომენტისათვის;
- $a$  - ექსპერიმენტული კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს მოცემულ გრუნტს;
- $t$  - ფილტრაციის დაუმყარებელი პროცესის მიმდინარეობის დრო.

ხვედრითი ხარჯი (3.1.31) დამოკიდებულების მიხედვით  $z$  -ის ზრდასთან ერთად მცირდება, ანუ რაც უფრო დიდ სიღრმეზე გადაადგილდება ფილტრაციის ნაკადის ფრონტი, მით უფრო მცირდება გრადიენტი. (3.1.32) ფორმულის მიხედვით ხვედრითი ხარჯის ცვალებადობა აისახება (3.1.33) კანონით, რაც ნიშნავს, რომ  $t$ -ს ზრდასთან ერთად მცირდება  $K$  და ის უახლოვდება  $K_0$ -ს. მაშასადამე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დაუმყარებელი ფილტრაციული რეჟიმის პირობებში ხარჯი გრადიენტის, ან კიდევ დროის ფუნქციაა, თუმცა ზემოთ წარმოდგენილი ინტერპრეტაციით ადვილად მისახვედრია, რომ გრადიენტიც დროის ფუნქციაა და ის მუდმივი ხდება, როცა გრუნტის ფორების წყალგაჯერებასთან ერთად ფილტრაციული ნაკადის ფრონტი დაეყრდნობა გრუნტის წყლის სარკის ზედაპირს [73].

ფილტრაციის გაანგარიშების შემდგომი ეტაპი პირობითად ეფუძვნება დამყარებული რეჟიმის საანგარიშო მოდელს, რომლის თანახმად  $\Sigma h$  პოტენციალი ნულის ტოლია და  $z$  გაუტოლდება არხის ფსკერიდან გრუნტის წყლის ზედაპირამდე მანძილს.

ფილტრაციის სიჩქარე ნებისმიერი დროის მომენტისათვის შეიძლება ვიანგარიშოთ:

$$\frac{dz}{dt} = K_0 \frac{h_0 + z}{z}. \quad (3.1.34)$$

ამ დიფერენციალური განტოლების ინტეგრება სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით  $t = 0$ ,  $z = 0$  გვამღევს:

$$t = \frac{1}{K_0} \left( z + h_0 \ln \frac{h_0}{h_0 + z} \right). \quad (3.1.35)$$

ფილტრაციული ნაკადის გადაადგილების საშუალო სიჩქარე  $H$  სიმძლავრეზე (მანძილზე) ტოლი იქნება:

$$\bar{V} = K_0 \frac{H}{H + h_0 \ln \frac{h_0}{h_0 + H}}. \quad (3.1.36)$$

ამ გამოსახულებიდან ჩანს, რომ გრადიენტის მნიშვნელობა ერთზე მეტია, რადგან ერთზე ნაკლები რიცხვის ლოგარითმი უარყოფითი სიდიდეა და ეს თავის მხრივ ნიშნავს, რომ თავისუფალი ფილტრაციის რეჟიმი ზემოთ განხილულ საანგარიშო სქემაში შესაბამისი სასაზღვრო პირობებით არ ფიქსირდება. მიუხედავად ამისა, საინჟინრო პრაქტიკისათვის მისაღები სიზუსტით შეიძლება დროის გარკვეულ ინტერვალში გავიგოთ ფილტრაციული ხარჯი და შესაბამისი გრუნტის წყლის დონის ცვალებადობა. ცხადია, გრუნტის წყლის დონის თავისუფალი ზედაპირის მოხაზულობა და „ბორცვის“ სიგრძის რადიუსი დამოკიდებული იქნება გრუნტის ფილტრაციულ თვისებებზე [72].

საბოლოოდ, კონკრეტული ტოპოგრაფიული გეგმისათვის აიგება ჰიდროიზოჰიფსების რუკა, რომლის შესაბამისად განისაზღვრება კაპილარული ქობის სიმძლავრე და მის არეში ნიადაგ-გრუნტის ფორების წყალშევსების ხარისხი გრუნტის წყლის დონის გაანგარიშებისა და პროგნოზის შემოთავაზებული მეთოდი განსაკუთრებით დიდ მნიშვნელობას იძენს სარწყავი მიწათმოქმედების პრაქტიკაში, რათა განსაზღვრულ იქნას ფილტრაციის თავისუფალი სააკუმულაციო არეალის მოცულობა, რომელიც უშუალო კავშირშია ზედაპირული ჩამონადენის ჰიდრომექანიკური და

მორფომეტრიული მახასიათებლების ფორმირებასთან, ხოლო ეს უკანასკნელნი ცალსახად განაპირობებს ნიადაგის ზედაპირულ შრეში ირიგაციული ეროზიის პროცესების ინტენსივობას.

### **3.2 ნიადაგ-გრუნტების წყლისმიერი ეროზიის რაოდენობრივი პროგნოზირება და დასაშვებ სიჩქარეთა განსაზღვრა**

წყლისმიერი ეროზიული პროცესების დაყოფა სტადიებად ძირითადად უკავშირდება ნიადაგ-გრუნტის ფორმების წყალშევისების ხარისხის მაჩვენებელს. საწყისი ტენიანობის გავლენისა და პროცესის მექანიზმის განსხვავებული ინტერპრეტაციაა დღეისათვის გაბატონებულ კონცეფციასთან შედარებით. ძნელია დავეთანხმოთ შეხედულებას, რომლის მიხედვითაც წინააღმდეგობის ზრდა ირიგაციული ეროზიისადმი იზრდება ნიადაგის ტენიანობის გადიდებასთან ერთად მისი ფორმების სრულ წყალშევისებამდე. აღნიშნულია არ შეიძლება გავრცელდეს გაჯირჯვებადი ნიადაგ-გრუნტების ფართო კლასზე, რადგან ასეთი ტიპის თიხა მინერალებისათვის სპეციფიკურ ჰიდროფიზიკურ თვისებათა კომპლექსს განსაზღვრავს „განსოლვის“ ეფექტი [35].

ზედაპირული ჩამონადენის ძირითადი ჰიდრომექანიკური პარამეტრი - სიჩქარე, იდენტურ პირობებში, ცალსახა კავშირშია წვიმის ინტენსივობასთან. ნაშრომში მოცემულია ზედაპირული ჩამონადენის ფორმირების ფიზიკურ-მათემატიკური მოდელის დასაბუთება. შემოთავაზებულია ამ მოდელის შესაბამისი საანგარიშო სქემა და კონკრეტული ამოცანის გადაწყვეტა პარამეტრების ცვალებადობის ფართო დიაპაზონში [38].

ზედაპირული ჩამონადენის მოძრაობა ჭავლის სახით, შეიძლება გავაიგივეოთ კალაპოტურ ნაკადებთან და გამოვიყენოთ მათზე გავრცელებული კანონზომიერებანი. ზედაპირული ჩამონადენის რეჟიმზე

დღემდე არ არის ჩამოყალიბებული ერთიანი კონცეფცია, თუმცა ემპირიულად დამტკიცებულია ჩამონადენის მორფომეტრიისა და უპირველესად სიღრმის როლი ტურბულენტური რეჟიმის ჩამოყალიბებაში. რეჟიმის სახეობის დასადგენად გამოიყენება არა ჩვეულებრივი სახით რეინოლდსის კრიტერიუმი, არამედ მისი სახეცვლილება, რომელიც გამოხატავს სიჩქარისა და სიღრმის ურთიერთკავშირს. ნაწილაკების მოგლეჯვა-წატაცება ძირითადად ტურბულენტურ რეჟიმზე ხდება. გარდა ნაკადის ხარჯისა და ქანობისა ფორმირებული სიჩქარის ველზე დიდ ზეგავლენას ახდენს რელიეფის ფორმა და სასაზღვრო შრე. ჩამონადენის ფორმირებაში ასევე დიდ როლს ასრულებს ფერდობის ქანობი, რადგან ის განსაზღვრავს დაწნევის დროს [41].

ზედაპირული ჩამონადენის პარამეტრებიდან შემოთავაზებული მოდელები შესაძლებლობას იძლევიან საწყისი ინფორმაციის არასრულყოფილების გამო გადაწყვიტოთ რიგი პრაქტიკული ამოცანები დასაშვები სიზუსტით. არ შეიძლება იმაზე დათანხმება, რომ თურმე ეს მოდელები გამოიყენებიან ისეთ ამოცანებში, რომელთა გადაწყვეტა გაცილებით მაღალ სიზუსტეს მოითხოვს, რადგან ასეთი მტკიცება მოკლებულია ლოგიკურ დამაჯერებლობას. საბაზისო მოდელი წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} = I - K - l, \quad (3.2.1)$$

- სადაც:  $q$  არის ხარჯის ერთეულ სიგანეზე;  
 $t$  - დრო;  
 $x$  და  $z$  - განსახილველი კვეთის კოორდინატები;  
 $I, K, l$  - შესაბამისად წვიმის, წყალშთანთქმისა და აორთქლების ინტენსივობა.

ამ პარამეტრებიდან ყველაზე დიდ სირთულეს წარმოადგენს  $I$  -სა და  $K$  -ს განსაზღვრა. გაანგარიშებებში აიღება ამ პარამეტრების საშუალო მნიშვნელობები, რაც მიზეზი ხდება ირიგაციის ეროზიული პროცესის საიმედოების ხარისხის დაქვეითებისა და უპირველეს ყოვლისა ეს გამოიხატება იმაში, რომ ერთი და იგივე წვიმის საშუალო ინტენსივობის შემთხვევაში, ირიგაციული ეროზიის პროცესი იქნება სრულიად ურთიერთგანსხვავებული, ვინაიდან, როგორც წესი, ანგარიშისას მხედველობაში მიიღება ერთეულოვანი ჰიდროგრაფის არაერთგვაროვნების კოეფიციენტი. ასევე არანაკლებ მნიშვნელოვანია წყალშთანთქმის საანგარიშო სიდიდის განსაზღვრა, მაჩვენებლიანი ფუნქციით მისი ცვალებადობის წარმოდგენის შემთხვევაში [76].

ზედაპირული ჩამონადენის პარამეტრებიდან, რომლის ფორმირებაშიც მონაწილეობს ხმელეთის ჰიდროლოგიის ციკლის თითქმის ყველა პროცესი, ირიგაციული ეროზიის ამოცანების გადაწყვეტისას ყველაზე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სიჩქარეს. ეს გასაგებიცაა, რადგან სიჩქარე განსაზღვრავს ნიადაგ-გრუნტის ნაწილაკზე ნაკადის დინამიკურ ძალურ ზემოქმედებას და ამასთანავე თვით ნაკადის ტრანსპორტუნარიანობას. ზედაპირული ჩამონადენის ლოკალური (მყისი) სიჩქარის საანგარიშოდ მიღებულია შემდეგი სახის დამოკიდებულება [39]:

$$U = (m_0 \sqrt{I})^{1/n_0+1} (hl)^{1/n_0+1} = m_* h^z I^{n_0 l^p}, \quad (3.2.2)$$

სადაც:  $m$  არის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ხორკლიანობას;

$n_0$  - ფარდობითი ხორკლიანობა;

$h$  - წყალგაცემის ინტენსივობა;

$l$  - ფერდოს სიგრძე;

- $z = \frac{1}{n_0 + 1}$  - ხარისხის მაჩვენებელი;  
 $m_0$  - ვარიაციული რიგის ნომერი;  
 $P$  - ალბათური უზრუნველყოფის მაჩვენებელი.

ზედაპირული ჩამონადენის საშუალო სიჩქარე  $V_{საშ}$  განისაზღვრება:

$$V_{საშ} = \frac{1}{l} \int_0^l u dl = \frac{mh^z \Gamma^n}{l}. \quad (3.2.3)$$

ამ უკანასკნელის გამოყენება მოითხოვს, რიგი ექსპერიმენტული მონაცემების სათანადო დამუშავებას, რომელიც ცალკეულ ავტორთა შეხედულებისამებრ ხორციელდება და ამიტომაც გაანგარიშების შედეგებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან ერთი რიგითაც კი [77].

ჰიდრომელიორაციის პრაქტიკაში საკმაოდ გავრცელებულია ნაკადის საშუალო სიჩქარის განსაზღვრა შეზის ტიპის დამოკიდებულებით, რომელიც გამოხატავს თანაბარ ძრაობას და გულისხმობს ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ქანობს წერტილში, როგორც ფუნქციის წარმოებული (გრადიენტი) ტოლია მიწის ზედაპირის საშუალო ქანობის. საშუალო სიჩქარე წყალგამყოფიდან  $x$  მანძილით დამორებულ კვეთში გამოიხატება შემდეგნაირად:

$$V_x = mc\sqrt{zi}, \quad (3.2.4)$$

სადაც:  $m$  არის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ფერდობზე ნაკადის გადახრას თანაბარი ძრაობის ჰიდრაულიკური რეჟიმისაგან;

$c$  - სიჩქარის კოეფიციენტი;

$i$  - ფსკერის ქანობი.



თუ სიჩქარის კოეფიციენტს  $c$  -ს მივიღებთ მანინგის მიხედვით, მაშინ ხარჯი  $x$  კვეთში იქნება:

$$q = V_x \omega = \frac{z^{0,67} \sqrt{i \cdot 1 \cdot m}}{n_0}, \quad (3.2.5)$$

$$q = \frac{z^{1,67} \sqrt{i m}}{n_0}. \quad (3.2.6)$$

ასევე თუ დაუშვებთ, რომ აორთქლება და წყლის დაგროვება ზედაპირული ჩამონადენის სახით დიდ გავლენას არ ახდენენ ირიგაციულ ეროზიაზე, მაშინ (3.2.1) დამოკიდებულების გათვალისწინებით შეიძლება დავწეროთ:

$$\frac{1,67 z^{0,67} \sqrt{i m}}{n_0} dz = (I - K) dx. \quad (3.2.7)$$

თუ მივიღებთ, რომ  $K = const$ , მაშინ (3.2.7)-ის ინტეგრებით მივიღებთ:

$$\frac{z^{1,67} \sqrt{i m}}{n_0} = (I - K) x. \quad (3.2.8)$$

მაშინ ფსკერული სიჩქარე ხორკლიანობის შვერილზე იქნება [3]:

$$V_{\Delta} = \frac{V_x \cdot \Delta^{1/6}}{z^{1/6}}. \quad (3.2.9)$$

(3.2.9) განტოლებაში  $V_x$ -ის ჩასმით, მივიღებთ:

$$V_{\Delta} = \frac{z^{0,67} \sqrt{i \Delta^{1/6} m}}{n_0 z^{1/6}} = \frac{\sqrt{z i \Delta^{1/6} m}}{n_0}. \quad (3.2.10)$$

ხორკლიანობის კოეფიციენტსა და შვერილის სიმაღლეს შორის კავშირი, შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$\Delta^{1/6} = 22,2 n_0. \quad (3.2.11)$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით გვექნება:

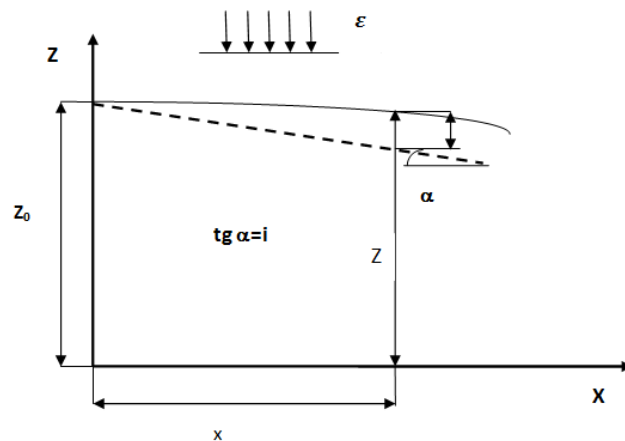
$$V_{\Delta} = 22,2\sqrt{z}im, \quad (3.2.12)$$

შესაბამისად:

$$V_{\Delta} = \frac{(I-K)^{0,3} \chi^{0,3} i^{0,35} \Delta^{1/6} m^{0,7}}{n_0^{0,7}}. \quad (3.2.13)$$

საჭიროა აღინიშნოს, რომ (3.2.12) ფორმულით არ არის გათვალისწინებული ნატანის ფორიანობა, რომ არაფერი ვთქვათ ფიზიკურ-ქიმიური ეფექტის როლზე გამრეცხი დასაშვები სიჩქარის რაოდენობრივი განსაზღვრისას.

არსებული რეკომენდაციები ირიგაციული ეროზიისაგან დაცვის მიზნით ზედაპირული ნაკადის სიჩქარის დანიშვნა (0,1÷0.2) მ/წმ ფარგლებში, მოკლებულია ყოველგვარ დამაჯერებლობას და ამიტომ აუცილებელია მისი სიდიდე განისაზღვროს იმ საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყენებით, რომელიც ითვალისწინებს ნიადაგ-გრუნტების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებათა ფართო კომპლექსს და ამასთანავე ეფუძვნებიან გარეცხვის ფიზიკური პროცესების ყველაზე სრულყოფილ, თეორიულად დასაბუთებულ საანგარიშო მოდელს [78].



ნახაზი. 3.2.1 ზედაპირული ჩამონადენის საანგარიშო სქემა

ზედაპირული ჩამონადენის საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახაზ 3.2.1-ზე.

ზოგადად, ბრტყელი ნაკადის შემთხვევაში, ხარჯის ბალანსის განტოლება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\frac{dQ}{dx} = (\varepsilon - h_{\text{ინფ}} - h_s)y, \quad (3.2.14)$$

სადაც:  $Q$  არის ხარჯი, სათავიდან (წყალგამყოფიდან), რაღაც  $x$  მანძილით დაშორებულ კვეთში;  
 $\varepsilon, h_{\text{ინფ}}, h_s$  - შესაბამისად, მოსული ნალექების, ინფილტრაციული წყალშთანთქმისა და აორთქლების ინტენსივობათა საანგარიშო გასაშუალებული მნიშვნელობანი დროის ადებულ ინტერვალში;  
 $y$  - წყალშემკრები ფართობის სიგანე.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ყველა კონკრეტულ შემთხვევაში, შეიძლება საანგარიშო მოდელმა ვერ უზრუნველყოს ამა თუ იმ ფაქტორის სრულყოფილი რაოდენობრივი ასახვა, მაგრამ წინასწარ დანიშნული სარწმუნო დონის შესაბამისად მოხდეს მათემატიკაში ცნობილი რომელიმე რიცხვითი მეთოდის გამოყენებით მისი სისტემატური სრულყოფა.

ზედაპირული ჩამონადენის ხვედრითი ხარჯი ბრტყელი ნაკადებისათვის, გარბენის გზის ადებულ კვეთში, წარმოადგენს დროის უწყვეტ ფუნქციას კოორდინატებთან ერთად. ეს ნიშნავს, რომ როცა აორთქლებას უგულებელვყოფთ, მაშინ ხარჯი განისაზღვრება:

$$q = \varphi(x, z, t); \quad \varepsilon = \varepsilon(t); \quad K = K(t), \quad (3.2.15)$$

სადაც:  $q$  არის ხარჯი ნაკადის სიგანის ერთეულზე;

$x, z$	-	აღებული კვეთის კოორდინატები;
$t$	-	დროის პარამეტრი;
$\varepsilon$ და $K$	-	შესაბამისად დროის არებული მომენტისათვის.

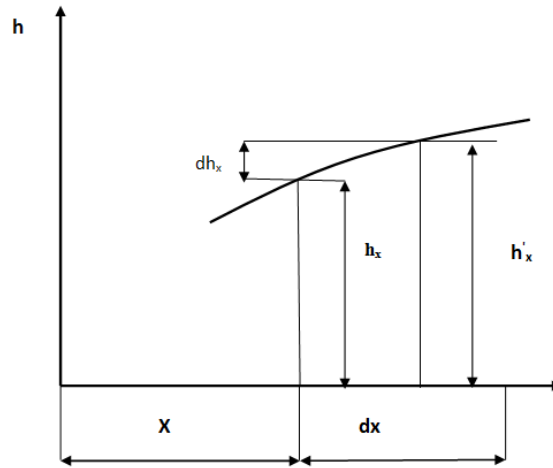
როგორც არაერთხელ აღვნიშნეთ, თითოეული ამ კომპონენტის ცვალებადობა (წყალშთანთქმა-ინტენსივობა) დროის ფუნქციაა და ამიტომაც სხვადასხვა ანალიზური კანონით (მრუდით) აისახება, რაც გამორიცხავს სუპერპოზიციის (ძალთა მოქმედების დამოკიდებულების) პრინციპის გამოყენებას პროცესის ჯამური ეფექტის შესაფასებლად [35].

ზედაპირული ჩამონადენის ღია წყალშემკრებისა და მარეგულირებელი ქსელის პროექტირების პრაქტიკაში ფართო გამოყენებას პოულობს აკად. ა. კოსტიაკოვის [1] მიერ შემოთავაზებული შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$h_x = \sqrt{\frac{\varepsilon - K}{c}} x, \quad (3.2.16)$$

სადაც:	$h_x$	არის	ნაკადის სიღრმე განსახილველ კვეთში;
	$x$	-	მანძილი სათავიდან ნაკადის განსახილველ კვეთამდე;
	$c$		კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს წყალშემკრები ზედაპირის ქანობსა და ხორკლიანობას;
	$\varepsilon$ და $K$		შესაბამისად წვიმის და წყალშთანთქმის ინტენსივობები.

(3.2.16) დამოკიდებულება მიღებულია საანგარიშო სქემის (ნახაზი 3.2.2) გამოყენებით.



ნახ. 3.2.2 ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის საანგარიშო სქემა თანაბარი ძრავისათვის

ორ მეზობელ  $dx$  მანძილით დაშორებულ კვეთს შორის დროის რაღაც პერიოდში ხდება მოსული ნალექების ნაწილის ჩაქონვა (ინფილტრაცია), ხოლო მეორე ნაწილის ტრანზიტი, რაც იძლევა ხვედრითი ხარჯის ნაზრდს. ეს ცვლილება შეიძლება გამოვხატოთ შემდეგნაირად:

$$dq = h'_x V'_x - h_x V_x = \varepsilon dx - K dx. \quad (3.2.17)$$

საშუალო სიჩქარე ნაკადის ნებისმიერ კვეთში განისაზღვრება შეზის მიხედვით:

$$V_x = \frac{87\sqrt{h_x}}{n_0} \sqrt{h_x i} = C h_x, \quad (3.2.18)$$

სადაც: 
$$C = \frac{87\sqrt{h_x}}{n_0}.$$

(3.2.18)-ის გათვალისწინებით (3.2.17) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$C(h_x^2 + 2h_x dh_x + (dh_x)^2) - ch_x^2 = (\varepsilon - K) dx. \quad (3.2.19)$$

მაღალი რიგის  $dh_x^2$  უსასრულოდ მცირე სიდიდის უგულებელყოფით გვექნება:

$$2ch_x dh_x = (\varepsilon - K)dx. \quad (3.2.20)$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრებით მივიღებთ:

$$h_x = \sqrt{\frac{x}{c}(\varepsilon - K)}. \quad (3.2.21)$$

მიღებული დამოკიდებულება ნაკადის ზედაპირის ფორმის აღწერისათვის ეყრდნობა დაშვებას, რომლის მიხედვითაც არათანაბარი ძრაობა შეცვლილია თანაბარი ძრაობით. თავისთავად ასეთი დაშვება გამორიცხავს დიფერენციალური განტოლების გამოყენებით პროცესის გამიფვრის აუცილებლობას, რადგან (3.2.16) განტოლება სავსებით მარტივად მიიღება ხარჯის უწყვეტობის პირობიდან. დავუშვათ გვაქვს  $x$  სიგრძის ერთეული სიგანის სწორკუთხა ფართობი, რომელზედაც ჩამოედინება დროის ერთეულში წყლის მოცულობა ტოლი  $x(\varepsilon - K)$ , ცხადია ეს უწყვეტობის პირობის თანახმად უნდა გაუტოლდეს ხარჯს  $x$  კვეთში -  $ch_x h_x$ , ანუ მივიღებთ  $h_x$  -ის განმსაზღვრელ (3.2.21) განტოლებას.

ნაკადის სიღრმის განსაზღვრის მოყვანილი მეთოდი ეყრდნობა მეტად უხემ ლინეარიზაციას და ამასთანავე დიფერენცირებული აღრიცხავს ჩამონადენის ფორმირების პროცესის აღწერისათვის მოკლებულია მიზანდასახულ მათემატიკიზაციას, რაც გამოიხატება სარწყავი ფართობის ზედაპირის ქანობის ჰიდრაულიკურ ქანობთან გატოლებაში  $i = I$ .

საანგარიშო სქემის მიხედვით (ნახაზი 3.2.1) შეიძლება დავწეროთ შემდეგი განტოლება:

$$z = z_0 + h_x - ix, \quad (3.2.22)$$

საიდანაც:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{dh_x}{dx} - i. \quad (3.2.23)$$

ვინაიდან  $dz/dx$  არის ალბულო წერტილში თავისუფალი ზედაპირის წარმოებული, ანუ სხვანაირად ჰიდრავლიკური ქანობი  $I$ , რომელიც ჩაენაცვლება ფსკერის ქანობს და შეხის ფორმულით მოგვცემს შემდეგი სახის დამოკიდებულებას:

$$(\varepsilon - K)x = \frac{87}{n_0} \sqrt{h_x} \sqrt{h_x} I h_x. \quad (3.2.24)$$

ამ უკანასკნელი განტოლების სრული იდენტიფიკაციის მიზნით (3.2.21) განტოლებასთან, (3.2.24) დამოკიდებულებას წარმოვადგენთ შემდეგი სახით:

$$\frac{(\varepsilon - K)n_0}{87\sqrt{i}} \frac{x}{h_x^2} = \frac{1}{\sqrt{i}} \sqrt{\frac{dh_x}{dx} - i}. \quad (3.2.25)$$

ამ განტოლების მარცხენა მხარე მიღებული დაშვების საფუძველზე შეიძლება ჩავთვალოთ 1-ის ტოლად და ამიტომ (3.2.25) განტოლება მოგვცემს:

$$\sqrt{i} = \sqrt{\frac{dh_x}{dx} - i}, \quad (3.2.26)$$

საიდანაც: 
$$\frac{dh_x}{dx} = 2i. \quad (3.2.27)$$

სასაზღვრო პირობის გათვალისწინებით,  $x = 0, h_x = 0$  (3.2.27)-ის ინტეგრება გვამღევს:

$$h_x = 2ix. \quad (3.2.28)$$

(3.2.28)-ის გათვალისწინებით და სათანადო გარდაქმნებით, მივიღებთ:

$$ax^2 dx = h_x^4 dh_x - ih_x^4 dx. \quad (3.2.29)$$

დიფერენცირებული განტოლება, ცხადია არ ამოიხსნება ჩვეულებრივი ტაბულის ინტეგრალების გამოყენებით, ამიტომაც თუ მივიღებთ  $b = ih_x^4$ , მაშინ (3.2.29)-ის ინტეგრება სასაზღვრო პირობის გათვალისწინებით მოგვცემს:

$$h_x = \sqrt[5]{5/3 ax^3 + 5bx}. \quad (3.2.30)$$

ეს განტოლება შორს არის ჩამონადენის რეალური ფიზიკური სურათის ასახვისაგან, მაგრამ ის გაცილებით უკეთ გამოხატავს ნაკადის ძრაობის არასტაციონალურობას, ვიდრე შემოთავაზებული (3.2.21) განტოლება. მაშასადამე, პირველი უხეში მიახლოვებით ჩვენ შეგვიძლია განვსაზღვროთ ნაკადის ნებისმიერ  $x$  კვეთში მორფომეტრიული მახასიათებელი  $h_{x1}$ . ზემოთ ნაჩვენები წესით  $h_x$  -ის შესაბამისად დავადგინოთ დასაშვები ქანობი, ანუ ის ქანობი, რომელიც პასუხობს კალაპოტის გაურეცხვადობის პირობას. ირიგაციული ეროზიის რაოდენობრივი შეფასება შესაძლებელია მხოლოდ საინჟინრო მეთოდით ან უშუალო გაანგარიშებით ამა თუ იმ ფორმულის გამოყენებით. როგორც არაერთხელ ავღნიშნეთ სხვადასხვა ავტორის მიერ შემოთავაზებული დასაშვები სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებანი ერთი და იგივე ანალოგ-სტრუქტურით ხასიათდებიან, ასევე მივიღეთ, რომ ისინი თუ ჩაითვლებიან მართებულად მყარი ნატანისათვის, სავსებით გაუმართლებელია მათი გამოყენება ნიადაგ-გრუნტების ირიგაციული ეროზიის რაოდენობრივი შეფასებისათვის, ვინაიდან მყარი სხეულის კუთრი წონა მკვეთრად განსხვავებულია ფოტოვანი ფიზიკური ტანის, კერძოდ კი ნიადაგ-გრუნტის წყალმედვეი აგრეგატის კუთრი წონისაგან.

გარდა ამისა, ნიადაგ-გრუნტების აგრეგატების მიდრეკილება ზედაპირულ-მოლეკულური ეფექტების წარმოშობისაკენ და მათი ფორმირება წყალშევის ხარისხის შესაბამისად, რადიკალურად ცვლის ირიგაციული ეროზიის სხვადასხვა სტადიაზე აგრეგატების ზღვრული წონასწორობის



პირობებს. (3.2.30) ფორმულით განსაზღვრულ  $h_x$  ნაკადის სიღრმეს, ჩვენ ყოველთვის შეგვიძლია შევუსაბამოთ ის დიამეტრი, რომელიც არ დაექვემდებარება ირიგაციულ ეროზიას და უზრუნველყოფს თვითგარეცხვადი კალაპოტის მდგრადობას [79]. წყლისმიერი ეროზიის რაოდენობრივი პროგნოზი უშუალოდ უკავშირდება დასაშვები სიჩქარის განსაზღვრას. ზემოთ დავადგინეთ, რომ სხვადასხვა ავტორთა მიერ შემოთავაზებული დასაშვები (არაგამრეცხი) სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებანი შეიძლება გამოხატულ იქნას ერთიანი, მოდიფიცირებული, საერთო სტრუქტურის შემდეგი სახის ფორმულით:

$$V_{\phi}^I = A\sqrt{(\gamma_1 - \gamma_0)d}. \quad I$$

რომლის ადაპტაციაც ნიადაგ-გრუნტების სპეციფიკური თვისებების გათვალისწინებით გამოვხატოთ შემდეგი სახის კორექტირებული დამოკიდებულებით:

$$V_{\phi}^{II} = A\sqrt{(\gamma_1 - \gamma_0)(1 - n)d}. \quad II$$

I და II ფორმულის თანაფარდობა  $\alpha$  შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$\alpha = \frac{V_{\phi}^I}{V_{\phi}^{II}} = \frac{A\sqrt{(\gamma_1 - \gamma_0)d}}{A\sqrt{(\gamma_1 - \gamma_0)(1 - n)d}} = \sqrt{\frac{1}{1 - n}}. \quad (III)$$

ცხადია II ფორმულით გამოთვლილი დასაშვები სიჩქარე შევცვალოთ მხოლოდ დიამეტრით და გამოვიყენოთ I ფორმულა, ე.ი. ის განვსაზღვროთ ახალი დიამეტრის ჩასმით, რომელიც რიცხვობრივად ტოილ იქნება  $(1 - n)d$ . ეს ნიშნავს, რომ კორექტირებულ ფორმულას (რომელიც ითვალისწინებს აგრეგატის ფორიანობას) და არსებულ ნორმატიულ საანგარიშო ფორმულის გამოყენებით მიღებულ შედეგებს შორის განსხვავება, გაანგარიშების „ცდომილება“ მივაკუთვნოთ, ამის მიხედვით ირიგაციული ეროზიის

პროგნოზი, სფერული ნაწილაკებისათვის, შესაბამისი დამოკიდებულების გამოყენებით გვადლევს:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 = \left(\sqrt{\frac{1}{1-n}}\right)^6 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^6 = \alpha^6. \quad (IV)$$

მეტი თვალსაჩინოებისათვის, ჩავატაროთ გაანგარიშება კონკრეტულ მაგალითზე, როცა  $n = 0,3$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1-n}} = \sqrt{\frac{1}{0,7}} = 1,2.$$

(IV)-ს მიხედვით:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{V_{d1}}{V_{d2}}\right)^6 = \alpha^6 = 1,2^6 \approx 3,0.$$

საბოლოოდ, მივიღებთ, რომ როცა  $n = 0,3$ , დასაშვებ სიჩქარეთა შორის განსხვავება, გაანგარიშებული არსებული ნორმატიული და ჩვენს მიერ შემოთავაზებული კორექტირებული ფორმულის გამოყენებით შეადგენს 20%-ს, ხოლო ირიგაციული ეროზიის პროგნოზი შესაბამისად იძლევა 300% ცდომილებას.

აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ აუცილებელია ნიადაგ-გრუნტების წყლისმიერ ეროზიის რაოდენობრივი პროგნოზისათვის დასაშვებ სიჩქარეთა კორექტირებული დამოკიდებულების გამოყენება. ეს დამოკიდებულება ითვალისწინებს ზოგიერთ სპეციფიკას, რომელიც განპირობებულია ნიადაგ-გრუნტებში მიმდინარე ფიზიკურ-ქიმიური პროცესების ფართო სპექტრით და უზრუნველყოფს ირიგაციული ეროზიის პროგნოზის მაღალ საიმედოობას.

## ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

- მიღებულია, ნიადაგში წყლის ორთქლის საანგარიშო ხარისხობრივი ემპირიული დამოკიდებულებები, ნიადაგში წყლის ორთქლის ადსორბცია-დესორბციის დადგენის მეშვეობით;
- რწყვის რეჟიმის პარამეტრების დასაზუსტებლად და მაღალი მოსავლის მისაღებად, ნიადაგების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია საკვლევი ობიექტის ნიადაგების მოცულობითი მასა;
- ექსპერიმენტალური მონაცემებით განსაზღვრულია სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყალმოთხოვნილების კოეფიციენტის მნიშვნელობა. ჩატარებული კვლევის შედეგად განხორციელდა მიღებული წყალმოთხოვნილების ფორმულის ექსპერიმენტული შემოწმება და შემდგომი განზოგადება ნიადაგების რწყვის სხვადასხვა რეჟიმის პირობებში, ნიადაგის ზღვრული ტენტევადობის 60%-ის, 70% და 80%-ის ვარიანტების დროს;
- ჩვენი ცდის პირობებში განსაზღვრულია რწყვის ვადების კორექტირება დეკადების მიხედვით, ჰაერის, ტემპერატურის, ნიადაგ-გრუნტებში საჭირო ჰაერის და წყლის შემცველობის, მოსული ნალექების სათანადო შეფასებითა და გათვალისწინებით.
- FAO - ს მიერ რეკომენდებული კომპიუტერული პროგრამა AquaCrops-ი, მეშვეობით მოვახდინეთ კონკრეტული რეგიონის კლიმატური მონაცემების დამუშავება და ევაპოტრანსპირაციის გაანგარიშება, კონკრეტული ნიადაგური მონაცემებისა და მცენარის წყალმოთხოვნილების გათვალისწინებით.
- განსაზღვრულია წყლის ჩამონადენის ბალანსის განტოლება, სადაც შესაბამისი დაშვებების და მათემატიკური გარდაქმნების საფუძველზე მიღებულია დამოკიდებულება, რომელიც ითვალისწინებს ფილტრაციული დაწნევის გრადიენტის ცვალებადობას ჩაჟონვის სიღრმის მიხედვით;

- დასაბუთებულია, დაწნევის გრადიენტის გათვალისწინების აუცილებლობა წყლის ნაკადის გარბენის სიგრძის განსაზღვრისას;
- ნიადაგ-გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური შემადგენლობის, ნაკადის გარბენის სიგრძისა და მიწოდებული წყლის მოცულობის გათვალისწინებით მიღებულია რწყვის ნორმის საანგარიშო დამოკიდებულება.
- ნიადაგ-გრუნტების სპეციფიკური თვისებების გათვალისწინებით მიღებულია სარწყავი წყლის დასაშვებ სიჩქარეთა საანგარიშო კორექტირებული დამოკიდებულება, რაც უზრუნველყოფს ირიგაციული ეროზიის პროგნოზის მაღალ საიმედოობას.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Костяков А.Н.- Основы мелиорации. Судьхозизд. М. 1962, 452 стр;
2. ჩხენკელი ი . - სასოფლო-სამეურნეო მელიორაცია, თბილისი, 1960წ. 300გვ.;
3. Мировой агро-климатический справочник, Гидрометеорологическое издательство. Ленинград. 1937г, 414 с;
4. ჩხენკელი ი. - აღმოსავლეთ საქართველოს მიკროდარაიონება მორწყვის საჭიროების მიხედვით, თბილისი, 1959 წ.
5. ცუცუნაშვილი ო. - სასოფლო-სამეურნეო მელიორაციის პრაქტიკული, „განათლება“, თბილისი, 1965წ, 206გვ.;
6. Шредер В.Р., Сафонов В.Ф., Васильев И.К., Паренчик Р.И., Рифтина А.Р. - Расчетные значения оросительных норм сельскохозяйственных культур в бассейнах рек Сырдарьи и Амударьи, Средазгипроводхлопок, Ташкент, 1970, 292 с;
7. Зайдельман Ф.Р., Смирнова Л.Ф., Шваров А.П. , Никифорова А.С. –Практикум по курсу „Мелиорация Почв“ Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, 2007, 66 стр;
8. ტულუში გ.ი.- სასოფლო-სამეურნეო კულტურების მორწყვის წესები და მათი სრულყოფის გზები. თბილისი, 1986, 242 გვ.
9. <http://www.agrobook.ru/blog/user/admin/kogda-i-kak-polivat-ovoshchnye-kultury> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 2.11.2015;
10. Тищенко А.П. - Оперативное управление режимами орошения сельскохозяйственных культур по инструментальному методу, Научно-практический журнал Выпуск № 1(61)/2016, 17-23 с.
11. Marcel DÎRJA, Tudor Salagea-Economic Efficiency of Irrigation Regime of Tomatoes and Cucumbers Crops Cultivated in Of Protected Areas, Bulletin UASVM Horticulture, 69(2)/2012 Print ISSN 1843-5254; Electronic ISSN 1843-5394, 419-421pp.
12. Труновой Т.А; <http://www.cawater-info.net/bk/4-2-1-1-3-4.htm> -უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 22.12.2016;
13. Алпатьев С.М. Состояние и задачи орошения сельскохозяйственных культур на Украине. «Вестник с.х. науки», №12, 1963, 188 стр;
14. Роде А.А., Смирнов В.Н. -Почвоведение, Издательство: Высшая школа, 1972 г. УДК: 631.4 481 стр.;
15. Зайдельман Ф. - Мелиорация почв. 3-е издание. Изд. Моск. ун-та. 2003,446 стр;
16. ყრუაშვილი ი., ლობჯანიძე ზ. - მორწყვის ტექნიკის ელემენტების განსაზღვრა ფილტრაციის გრადიენტის გათვალისწინებით. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სსაუ. თბილისი 2001წ, გვ. 284-292;

17. ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ბზიავა კ.- წყლის მიგრაციისა და ნიადაგის მახასიათებლების გავლენა რწყვის რეჟიმზე. სტუ, ჰიდროინჟინერია, # 1-2 (15-16), 2013, გვ. 79-84;
18. ხარაიშვილი ო. - რწყვის რეჟიმისა და სასუქების გავლენა სიმინდის დაპროგრამებულ მოსავლიანობაზე მუხრან-სამგორის ველის პირობებში, თბილისი, 2009 წ., 135 გვ;
19. Manual on calculation and choosing the norms and elements of irrigation technique for cotton and winter wheat based on results of IWRM-Ferganaproject, TASHKENT - 2005, 20 p.
20. Великанов М.А.-Гидрология суши. Изд. пятое, Гидрометеиздат, Л., 248 с.
21. Фегелер П. -Режим катионов и воды в минеральных почвах. Пер. с нем. Сельхозгиз, 1938;
22. Дараселия М.К.-Красноземные и подзолистые почвы Грузии и их использование под субтропические культуры. Всесоюзн. Нии чая и субтропических культур, 1949 с;
23. Рыбкина А.Я.-Особенности питания рек восточной части Карпат. Ж. «Метеорология и гидрология» №7, 1968;
24. Сочеванов В.Е.-Величина испарения в полевых условиях. Зап. метеорол. станции ЛСХИ в Детском Селе, т. VI, 1958;
25. Тимошенко С.В. Поливной режим сахарной свеклы при дождевании. Докл. Васхнил, 16, 1940;
26. Алпатьев С.М. Состояние и задачи орошения сельскохозяйственных культур на Украине. «Вестник с.х. науки», №12, 1963;
27. ხარაიშვილი ო. -კლიმატური ფაქტორების და ნიადაგის ტენის დინამიკის გათვალისწინებით სიმინდის წყებათა განაწილება , სსაუ, სამეცნიერო შრომათა კრებული ტ111, 1998 წ. 98-103 გვ;
28. <http://www.agrobook.ru/blog/user/admin/kogda-i-kak-polivat-ovoshchnye-kultury> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 2.11.2015;
29. ხარაიშვილი ო. - „რწყვის რეჟიმისა და სასუქების გავლენა სიმინდის დაპროგრამებულ მოსავლიანობაზე მუხრან-სამგორის ველის პირობებში, თბილისი 2009წ., 135 გვ;
30. Алпатов А. М. Влагооборот культурных растений. Л.: Гидрометиздат. 1954 ,248 с;
31. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), 2006, 174 pp ;
32. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометиздат. с. 532. 1968;
33. ნატროშვილი გ.-სასოფლო-სამეურნეო კულტურების რწყვის ოპტიმალური რეჟიმის დადგენა რესურსზომი ტექნოლოგიები, 2015 წ. 100 გვ;

34. Hensley, M., Botha J.J., Anderson, J.J., Van Staden, P.P. & Du Toit, A.-Optimizing rainfall use efficiency for developing farmers with limited access to irrigation water. Water Research Commission report no. 878/1/00, Pretoria, South Africa. 2000.
35. Мирцхулава Ц.Е.-Водная эрозия почв. (Механизм, прогноз). Тбилиси, Мецниереба 2000.
36. Мирцхулава Ц.Е.-Методические рекомендации по прогнозу водной (дождевой) эрозии почв. М., ВАСХНИИЛ, 1978.
37. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., ნატროშვილი გ. - ფილტრაციის თავისებურებანი ნიადაგ-გრუნტებში, წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული 67, 2012 წ, 221-226 გვ;
38. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., ნატროშვილი გ. - ნიადაგ-გრუნტში წყლის ფილტრაციის ანომალიებთან დაკავშირებული საკითხების შესწავლა, წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული 67, 2012წ, 226-236 გვ;
39. Kruashvili I.G., Inashvili I.D. - Mathematical model of defining concentration and turbulent exchange coefficient in suspended streams, Ann. Agrar. Sci. 3 (1) (2005). 98-100 pp;
40. Kruashvili I, Inashvili I. ,Bziava K., Lomishvili M.- Soil Moisture Regulation in Irrigated Agriculture, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering Vol:10, No:12, 2016, 791-794 pp;
41. Бзиава К.Г. -Гидравлическая модель расчета фильтрации из естественных каналов. Сб. научных трудов ГрузГАУ, т. XXIX, Тбилиси, 2004, 143-146 с;
42. Швец Г. И.-Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка, Ленинград, Гидрометеизд, 1974, 184 с;
43. ღორჯომელაძე, ო., გოგიჩაიშვილი, გ., თურმანიძე ნ.-ნიადაგის ეროზიული საშიშროების შეფასება სხვადასხვა ფაქტორებთან (ნალექები, რელიეფი, ნიადაგი, მცენარეულობა) დაკავშირებით. საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე#26, 2009, 175-179გვ;
44. ლობჯანიძე ზ.-ზედაპირული მორწყვის დროს ნიადაგ-გრუნტების წყლისმიერი ეროზიის პროგნოზი, 2009წ, 160გვ;
45. Гогичаишвили Г. П.-Эрозия почв в речных бассейнах Грузии. Почвоведение 6, 2016, 745-754с;
46. ღორჯომელაძე ო., თურმანიძე ნ., გოგიჩაიშვილი გ. - ნიადაგის ეროზია და სტაციონარული კვლევის შედეგები, საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, 2012წ. #31, გვ. 193-198;
47. Мдинарадзе, Л. А., Мачавариани, В. М., Хундадзе, З. Г. Генеральная схема противоэрозионных мероприятий Грузинской ССР на 1981-1990 годы и на период до 2000 года. Тбилиси, Сабчота Сакартвело, 1988.

48. Karaburun, A. Estimation of C Factor for Soil Erosion Modeling using NDVI in Buyukcekmece Watershed . *Ozean Journal of Applied Sciences* 3(1), (2010). 77-85.9 სტ;
49. ურუშაძე თ., ბლუმი ვ. - ნიადაგების გეოგრაფია ნიადაგმცოდნეობის საფუძვლებით. თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა 2011;
50. Al-Quraishi, A. Soil Erosion Risk Prediction with RS and GIS for the northwestern part of Hobei Province, China. *Pak J Appl Sci* 3 (10-12), 2003, 659-669pp.
51. [ftp://ftp.fao.org/fi/cdrom/fao\\_training/fao\\_training/general/x6706e/x6706e09.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/cdrom/fao_training/fao_training/general/x6706e/x6706e09.htm) - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 02.03.2017;
52. Натишвили О., Круаშვილი И., Инашвили И. - Проблемы водной эрозии почвы в сельском хозяйстве: Экологические проблемы, Lambert Academic Publishing, 2016, pp;
53. <http://marneuli.ge/index.php/> გზამკვლევი/ზოგადი-ცნობები-უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 22.12.2015;
54. საქართველოს მეცნიერთა ეროვნული აკადემია - საქართველოს ბუნებრივი რესურსები I ტომი - 2015წ. 539გვ;
55. <https://www.meteoblue.com/ru-> უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული 20.01.2016;
56. იტრიაშვილი ლ. - ნიადაგ-გრუნტების თვისებების მიზნობრივი მართვა, (საქ. ჰიდროეკოლოგია), 2005 წ, 322გვ;
57. Urushadze Tengiz F., Ghambashidze Giorgi O. - Soils of Georgia. (JRC Technical Reports “Soil Resources of Mediterranean and Caucasus Countries Extension of the European Soil Database”) European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. (2013), 79–97 pp;
58. Лебедев А.Ф. - Почвенные и грунтовые воды., М.Л. Изд-во АН СССР, 1936, 224 с;
59. Овчаренко Ф. Д. Влияние адсорбированных катионов на теплоту смачивания глин., УКЖ, 19, 2, 1953, 139-143 с;
60. Exesutive sumari a water resurces technical puplikation. Bureau of reclamation USA, Denver, 1982.
61. Ребиндер П. А. Физико-химические механика дисперсных структур. М., Наука, 1966, 186 с;
62. Гуссак П.В. Результаты производственных опытов с гуминовыми прераратами в народном хозяйстве. Наука, М., 1964 76-90 с;
63. Kruashvili I, Inashvili I. ,Bziava K., Lomishvili M.-, Determination of Optimal Irrigation Mode Considering Soil and Climate Properties of Lomtagora Settlement of Marneuli Municipality, Lower Kartli", *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, ISSN 23074531 Volume 33, No 2, 166-175 pp;
64. Kruashvili I, Inashvili I. ,Bziava K., Lomishvili M.- Determination of optimal irrigation rates of agricultural crops under consideration of soil properties and



- climatic conditions, *Annals of Agrarian Science*, Volume 14, Issue 3, September 2016, 217–221 pp;
65. Kukhalashvili E.G., Undilashvili N.A., Sichinava O.O. - Condition of movement of multicomponent streams, *Ann. Agrar. Sci.* 3 (4) (2005), 98-100 pp;
  66. Danelia R.V., Gogsadze I.Z. - Stationary hydrodynamic processes due to exposal reason in reservoir and canals, *Ann. Agrar. Sci.* 3 (3) (2005), 166-168 pp;
  67. გუბელაძე დ. ბუნებრივ კალაპოტებში ნაკადის კვლევის მეთოდები ჟურნალი „მეცნიერება და ცხოვრება „ – 1(16 ) ტომი , თსაუ, თბილისი 2017წ.100-105 გვ;
  68. Lonjanidze Z.K., Bziava K.G. - Investigation of deformations of earthen canals, *Ann. Agrar. Sci.* 4 (4) (2006) 53-57pp;
  69. Kukhalashvili E.G, Sakhvadze A.L., Omsarashvili G.G. - Laws of change of characteristics of ameliorative water reservoirs at possible break of dams, *Ann. Agrar. Sci.* 4 (4) (2006) 50-52 pp;
  70. Lobzhanidze Z.K. - To the theory of flow irrigation, *Ann. Agrar. Sci.* 7 (3) (2009). 73-75 pp;
  71. Kukhalashvili E.G, Inashvili I.D.- Influence of morphometrical and hydraulic characteristics on the form of cross-section of a channel, *Ann. Agrar. Sci.* 7 (2) (2009). 114-117 pp;
  72. Kruashvili, I. Inashvili, K. Bziava, M. Lomishvili - „Impact of surface irrigation on the intensity of irrigation erosion“, *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, ISSN 2307-4531, Vol 35, No 1, (2017), 101-108 pp;
  73. Kukhalashvili E.G., Omsarashvili G.G., Sakhvadze, M.V. Loria - Determination of the distance between distributirs of subsoil-drip irrigation, *Ann. Agrar. Sci.* 7 (1) (2009). 77-80 pp;
  74. Натишвили О. Г. Тевзадзе В.И. -Гидравлические закономерности связанных селей, „Мецниереба “, 1996 г.156 с;
  75. Гувელაძე დ. - Некоторые соображения о гидравлическом моделировании связанных селевых потоков Журнал “ Экологические системы и приборы”, Москва 2017г., 12-18 с;
  76. Агроскин И. И. и др. - „Гидравлика,, . М. 1964г., ст. 483. 1. Костяков А.Н. Основы мелиорации. Судьхозизд. М. 1962, с. 452.
  77. Kruashvili I.G., Inashvili I.D.-Mathematical model of defining concentration and turbulent exchange coefficient in suspended streams, *Ann. Agrar. Sci.* 3 (1) (2005). 98-100 pp;
  78. Мирцхулава Ц.Е. -Основы физики и механики эрозии русел, Л. Гидрометеиздат, 1988, 303 с;
  79. ყრუაშვილი ი., ლობჯანიძე ზ. - მორწყვის ტექნიკის ელემენტების განსაზღვრა ფილტრაციის გრადიენტის გათვალისწინებით, აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სსაუ. თბილისი 2001წ, 284-292გვ.