



SkyRoots: მდგრადი სოფლის მეურნეობის განვითარება ულტრაბგერითი აეროპონიკისა და აპლიკაციით მართული მაღალი სიზუსტის კონტროლის მეშვეობით

ქეთევან ამისულაშვილი, დავით ნაკაიძე, რომან ქვრივიშვილი, ლიზი შამუგია, ნია ჟვანია

ვლადიმირ კომაროვის თბილისის ფიზიკა-მათემატიკის N199 საჯარო სკოლის მე-12 კლასის მოსწავლე

აბსტრაქტი

წყლის დეფიციტი და ნიადაგის დეგრადაცია დღესდღეობით სოფლის მეურნეობის ყველაზე მწვავე გამოწვევებია, რომლებიც სულ უფრო აშკარად ამხელს ტრადიციული მეთოდების ლიმიტაციებს. ჰიდროპონიკამ ნაწილობრივ უპასუხა ამ პრობლემას, თუმცა წყლის მოხმარებისა და დაავადებებისადმი მგრძნობელობის კუთხით მაინც არსებითი ხარვეზები რჩება. სწორედ ამ ფონზე შეფასდა SkyRoots - აეროპონიკის სისტემა, რომელიც ულტრაბგერითი მფრქვეველის დახმარებით საკვები ნივთიერებებით გაჯერებულ წყალს 5-10 მიკრონის ზომის ნაწილაკებად გარდაქმნის და მცენარის ფესვების მიერ შეიწოვება. სისტემა მართულია ESP32 მიკროკონტროლერითა და სპეციალურად შემუშავებული ბექდური პლატით.

ექსპერიმენტი 30 დღე გაგრძელდა კონტროლირებად გარემოში, სადაც ყოველდღიურად ფიქსირდებოდა მცენარის ზრდის მაჩვენებლები, გარემოს პარამეტრები და რესურსების დანახარჯი. სისტემას თან ახლდა მობილური აპლიკაცია, რომელიც მცენარეთა სახეობების მონაცემთა ბაზასა და ESP32 კამერას იყენებდა დაავადებების ადრეული აღმოჩენისა და გარემოს - მათ შორის ფოტოსინთეზზე მორგებული LED სპექტრის, ტემპერატურისა და ტენიანობის - ავტომატური ოპტიმიზაციისთვის.

მიღებული შედეგები შედარდა ტრადიციულ ჰიდროპონიკასა და ნიადაგზე კულტივირებასთან: ამისთვის მოძიებულ იქნა შესაბამისი ლიტერატურული წყაროები. შედარებამ აჩვენა, რომ SkyRoots წყალს მნიშვნელოვნად უფრო ეფექტურად იყენებს, მცენარეები უფრო სწრაფად იზრდება და მათი ჯანმრთელობის მაჩვენებლებიც უკეთესია, ამასთან ენერგიის ხარჯვაც შემცირებულია. რისკებისა და გარემოსდაცვითი, სოციალურ-ეკონომიკური ზემოქმედების დეტალურმა შეფასებამ დაადასტურა, რომ SkyRoots საკვებით რეალური პოტენციალი აქვს გახდეს მასშტაბირებადი და ეკოლოგიურად სუფთა

აგროტექნოლოგია, რომელსაც შეუძლია წვლილი შეიტანოს გლობალური სასურსათო უსაფრთხოების გამოწვევების გადაჭრაში.

1. შესავალი

1.1 ზოგადი კონტექსტი

წყლის დეფიციტი და ნიადაგის დეგრადაცია დღეს ორ ურთიერთდაკავშირებულ და მწვავე გამოწვევას წარმოადგენს, რომლებიც სასურსათო უსაფრთხოებას საშიშროების წინაშე აყენებს. გაეროს სურსათისა და სოფლის მეურნეობის ორგანიზაციის (FAO) მონაცემებით, გლობალური მტკნარი წყლის დაახლოებით 70% სოფლის მეურნეობაზე მოდის, რაც კლიმატის ცვლილების პირობებში წყლის რესურსზე მოთხოვნას კიდევ უფრო ამძაფრებს. ამავდროულად ნიადაგის ეროზია, სასარგებლო ნივთიერებებისაგან გამოფიტვა და დაბინძურება სახნავ-სათესი მიწების მზარდ ნაწილს ნაკლებ პროდუქტიულს ხდის.

1.2 ინოვაცია ულტრაბგერითი აეროპონიკის მიმართულებით

აეროპონიკა ამ პრობლემისადმი ფუნდამენტურად განსხვავებულ მიდგომას გვთავაზობს: მცენარეს, ნიადაგის ნაცვლად, საკვები ნივთიერებებით გაჯერებული ნისლი კვებავს, რაც წყლის მოთხოვნასაც მნიშვნელოვნად ამცირებს. მისი ქვესახეობა, ულტრაბგერითი აეროპონიკა, 10 მიკრონზე მცირე ზომის წვეთებს აგენერირებს, რაც აუმჯობესებს ფესვების მიერ საკვები ნივთიერებების შეთვისებასა და, შესაბამისად, ხელს უწყობს როგორც ზრდის დაჩქარებას, ასევე დაავადებების გავრცელების შემცირებას.

SkyRoots ამ პრინციპს თანამედროვე ციფრულ და საავტომატიზაციო ტექნოლოგიებთან აერთიანებს: ESP32-ით მართული ულტრაბგერითი ნისლის გენერატორი, სპეციალურად დაპროექტებული PCB, ამა თუ იმ მცენარისათვის საჭირო საკვები ნივთიერებებით სავსე აბები, დაავადებათა ამოცნობაზე გაწვრთნილი ხედვის მოდული, ოპტიმალური ტემპერატურა, ტენიანობა, და ფოტოსინთეზზე მორგებული LED განათება ერთობლივად ქმნის ავტონომიურ და მაღალი სიზუსტის აეროპონიკურ ეკოსისტემას.

1.3 კვლევის მიზნები

წინამდებარე კვლევა ცდილობს:

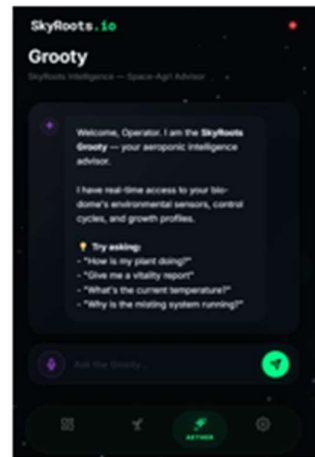
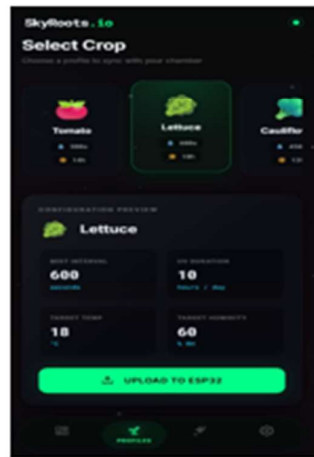
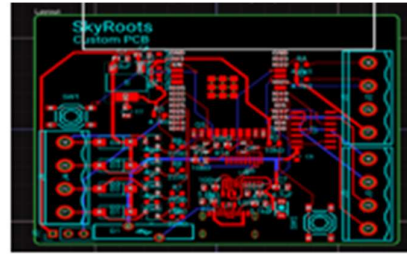
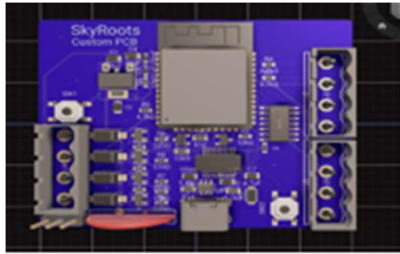
- შეაფასოს, როგორ მუშაობდა SkyRoots-ის ულტრაბგერითი აეროპონიკის სისტემა 30 დღის განმავლობაში;

- ეს შედეგები შეადაროს ტრადიციულ ჰიდროპონიკასა და ნიადაგზე დაფუძნებულ სოფლის მეურნეობას ოფიციალურ ლიტერატურულ მონაცემებზე დაყრდნობით;
- გამოკვეთოს რესურსების მოხმარების ეფექტურობა, ზრდის დაჩქარება და ჯანმრთელობის ინდექსების დინამიკა;
- განიხილოს დაკავშირებული რისკები, უსაფრთხოების ზომები და გარემოსდაცვითი, სოციალურ-ეკონომიკური ზეგავლენა.

2. მეთოდოლოგია

2.1 სისტემის არქიტექტურა და აპარატურული ინტეგრაცია

- ESP32 მიკროკონტროლერი და Custom PCB: მართავს ნისლის წარმოქმნის სიხშირეს (დაახლოებით 1700 kHz), LED სპექტრის მოდულაციასა და გარემოს სენსორებს.
- მობილური აპლიკაცია: ზრდის სისტემის პრაქტიკულობასა და მოხმარების სიმარტივეს. მასში ინტეგრირებულია სხვადასხვა მცენარის სახეობისთვის საჭირო ოპტიმალური პირობების მონაცემთა ბაზა.
- ულტრაბერითი მფრქვეველი: აწარმოებს საკვები ნივთიერებების ნისლს, რომლის წვეთების ზომა 5-10 მკმ დიაპაზონში ექცევა - ეს ზომა იდეალურია მცენარის ფესვების მიერ მათი შთანთქმისათვის.
- ESP32-ზე დაფუძნებული კამერის მოდული: იყენებს ჩაშენებული სისტემებისთვის მორგებულ ქსელებს, რომლებიც დაავადებისა თუ მავნებლის პირველივე ნიშნებზე მობილურ აპლიკაციაში შეტყობინებას აგზავნის.
- LED განათება: სპექტრი შერჩეულია ისე, რომ მაქსიმალურად შეესაბამებოდეს ფოტოსინთეზის წარმოებისათვის საჭირო განათებას - ძირითადად წითელ (660 ნმ) და ლურჯ (450 ნმ) დიაპაზონებში.
- საკვები ნივთიერებების მიწოდების სისტემა: წინასწარ დოზირებული საკვები აბები თანაბრად იხსნება რეზერვუარში, რითაც ნისლში საკვები ნივთიერებების კონცენტრაცია სტაბილური რჩება.



2.2 ექსპერიმენტული მოწყობა და პროტოკოლი

- მცენარის სახეობა: სწრაფმზარდი ფოთლოვანი კულტურა (სალათის ფოთოლი).
- ტესტირების ხანგრძლივობა: 30 დღე, კონტროლირებად საცდელ პროტოტიპში, სადაც ტემპერატურა და ტენიანობა ნარჩუნდება.
- გაზომილი პარამეტრები: ტემპერატურა ($^{\circ}\text{C}$), ფარდობითი ტენიანობა (%), pH, წყლის (ლ) და ენერგიის (მგჯ) მოხმარება, მცენარის სიმაღლე (სმ).
- მონაცემთა შეგროვება: სრულად ავტომატიზებულია ESP32 სენსორების საშუალებით და მუდმივად იგზავნება აპლიკაციაში ანალიზისთვის.
- შერჩევის ზომა: 12 ჭიქა, თითოეულში საშუალოდ 250 გ (ჯამურად 3 კგ მოსავალი). ექსპერიმენტი ერთ საცდელ პროტოტიპში ჩატარდა, ამიტომ შედეგები საორიენტაციო

ხასიათისაა და სტატისტიკური სარწმუნოების დასადასტურებლად მეტი მცენარითა და განმეორებითი ციკლებით შემოწმებას საჭიროებს.

- განათების პირობები: სისტემა ნაწილობრივ ბუნებრივ მზის შუქზე იტესტებოდა, ნაწილობრივ კი LED განათებით. ბუნებრივი სინათლის ცვალებადობის გამო LED-ის ენერგომოხმარება შემცირებულია, ამიტომ ექსპერიმენტში მიღებული ენერგომოხმარება სრულად ხელოვნური განათების პირობებში უფრო მაღალი იქნებოდა და ის შედეგის განზოგადებისას გათვალისწინებას საჭიროებს (იხ. შენიშვნა ცხრილის ქვეშ, ნაწილი 3.3).

2.3 შედარებითი ანალიზის მიდგომა

გამოყენებული ლიტერატურული წყაროები:

- ტრადიციული ჰიდროპონიკის რესურსების მოხმარებისა და ზრდის მონაცემები აღებულია Horticulturae წყაროდან.
- ნიადაგზე კულტივირების მონაცემები - FAO-ს სასოფლო-სამეურნეო ანგარიშებიდან (2020) და ScienceDirect-დან.

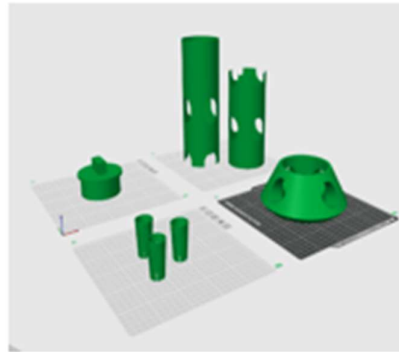
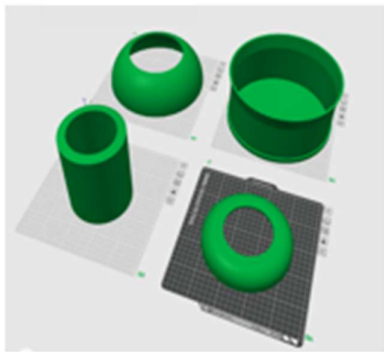
შედარებისას ძირითადად ყურადღება გამახვილდა 30-დღიან მოსავლის ციკლზე წყლისა და ენერგიის ხარჯზე, ასევე ზრდის დაჩქარებასა და საბოლოო მოსავლიანობაზე. ვინაიდან წყაროებში აღწერილი პირობები ერთმანეთისგან ოდნავ განსხვავდება, მონაცემები დახარისხდა მცენარის სახეობისა და გარემო პირობების გათვალისწინებით, რათა შედარება მაქსიმალურად ზუსტი ყოფილიყო.

2.4 სისტემის ფიზიკური კონსტრუქცია და 3D მოდელირება

სისტემის ფიზიკური არქიტექტურა დაპროექტდა Autodesk Fusion 360 პროგრამაში. დიზაინის შემუშავებისას მთავარ პრიორიტეტს წარმოადგენდა აეროდინამიკური ეფექტურობა, სივრცის ოპტიმალური გამოყენება და საკვები ნივთიერებების ნისლის თანაბარი გადანაწილება. დიზაინის ძირითადი მახასიათებლები და ფუნქციური უპირატესობები მდგომარეობს შემდეგში:

- ვერტიკალური იარუსობრივი სტრუქტურა: ცენტრალური სვეტი დაყოფილია რამდენიმე იარუსად, რაც იძლევა მცენარეების ვერტიკალურად განთავსების საშუალებას. ეს მიდგომა მაქსიმალურად ზოგავს ჰორიზონტალურ ფართობს და ზრდის მოსავლიანობას კვადრატულ მეტრზე (ვერტიკალური ფერმების პრინციპი).
- კონუსური ჭრილები (მცენარის დასარგავი ადგილები): თითოეულ იარუსზე არსებული კონუსური ფორმის ჭრილები უზრუნველყოფს ფესვების თავისუფლად ჩამოკიდებას შიდა კამერაში. ეს კონსტრუქცია ხელს უწყობს ულტრაბგერითი მფრქვეველის მიერ გენერირებული 5-10 მკმ ზომის ნისლის წვეთების პირდაპირ და დაბრკოლების გარეშე მიწოდებას ფესვებამდე.

- გარეთა დამცავი ჩარჩო: ოვალური ფორმის გარეთა სტრუქტურა უზრუნველყოფს ვიზუალურ კომპაქტურობას. ამასთან, დიდი გვერდითი ღიობები აადვილებს მცენარეების მონიტორინგს, მოვლასა და ვენტილაციას.
- წისლის ცირკულაციის ოპტიმიზაცია: ოვალური ფორმის შიდა ღრუ ხელს უწყობს ულტრაბგერითი წისლის ბუნებრივ კონვექციასა და თანაბარ გადანაწილებას ყველა იარუსზე, რაც თავიდან გვაცილებს ტენიანობის ლოკალურ დაგროვებას ან მშრალი ზონების გაჩენას.
- მოდულურობა და მასშტაბირებადობა: Fusion 360-ში შექმნილი პარამეტრული მოდელი იძლევა საშუალებას, კონსტრუქციამ მარტივად შეძლოს ადაპტაცია სხვადასხვა ზომის მცენარეზე ან გაფართოვდეს დამატებითი იარუსების დამატებით. ამგვარი დიზაინი ეხმიანება SkyRoots-ის მთავარ მიზანს - შეიქმნას ენერგოეფექტური, კომპაქტური და მაღალი პროდუქტიულობის მქონე ავტონომიური აეროპონიკის ეკოსისტემა.

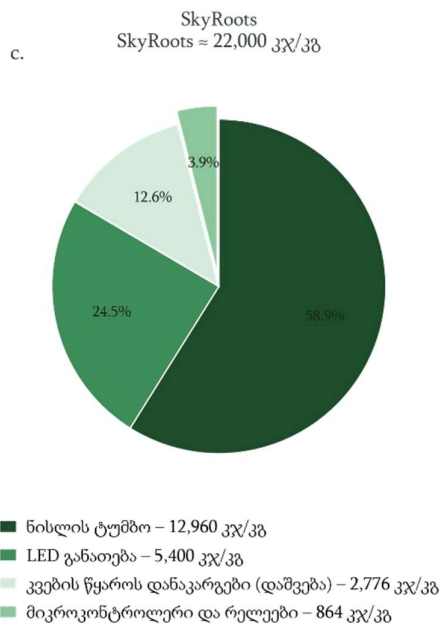


3. შედეგები და შედარებითი ანალიზი

3.1 30-დღიანი ექსპერიმენტის შედეგების შეჯამება (ულტრაბგერითი აეროპონიკა)

დღე	ტემპ (°C)	ტენ. (%)	pH	წყლის მოხმ. (ლ)	ენერგიის მოხმ. (მგჯ)	სიმაღლე (სმ)
1	24.0	73.5	6.0	0.2	2.2	0
5	24.8	74.5	6.0	0.27	2.2	2.2
10	24.3	74.6	6.5	0.34	2.2	6.7
15	24.9	74.0	6.0	0.41	2.2	11.9
20	24.6	76.1	6.5	0.44	2.2	17.4
25	24.6	73.2	6.0	0.56	2.2	20.0
30	24.7	76.4	6.5	0.61	2.2	22.0

შენიშვნა: წყლისა და ენერგიის მაჩვენებლები სადღეღამისო საშუალოა; 30 დღის ჯამური წყლის მოხმარება - 12.7 ლ, ჯამური ენერგიის მოხმარება - 66.0 მგჯ ($2.2 \text{ მგჯ/დღე} \times 30 \text{ დღე} \approx 66.0 \text{ მგჯ}$). აქ და მთელ ნაშრომში მგჯ = მეგაჯოული; 1 კვტ.სთ = 3.6 მგჯ.



*ვინაიდან სისტემა იტესტებოდა ნაწილობრივ მზის შუქზე, ხელოვნურ განათებას ნაკლები ენერგია მოხმარდა.

3.2 გრაფიკების აღწერა

- გრაფიკი 1: გარემოს პარამეტრები 30 დღის განმავლობაში: X-ღერძზე დღეებია (1-30), მარცხენა Y-ღერძზე - ტემპერატურა (°C), მარჯვენაზე - ფარდობითი ტენიანობა (%); ორღერძიანი ხაზოვანი დიაგრამა. ტემპერატურა თანდათან იზრდება 23.9°C-დან 24.9°C-მდე, ტენიანობასთან ერთად - 73.5%-დან 79%-მდე.
- გრაფიკი 2: ქიმიური და რესურსების პარამეტრები: X-ღერძზე გამოყენებული წყლის ჯამური რაოდენობაა (ლ), Y-ღერძზე - pH; გაბნევის დიაგრამა ტრენდის ხაზით. მცენარის ზრდასთან ერთად pH მერყეობს 6.0-დან 6.5-მდე.
- გრაფიკი 3: ზრდის დინამიკა: X-ღერძზე დღეებია (1-30), Y-ღერძზე - მცენარის სიმაღლე (სმ); ხაზოვანი დიაგრამა. ზრდა ლოგისტიკურ მრუდს მიჰყვება და 30-ე დღისთვის 22 სმ-ს აღწევს, რაც სტაბილურ განვითარებაზე მეტყველებს.

3.3 რესურსების მოხმარებისა და ზრდის მაჩვენებლების შედარება

მაჩვენებელი	ერთეული	ნიადაგი	ჰიდროპონიკა	SkyRoots
წყლის მოხმარება	ლ/კგ	250	20	4.23
ენერგიის მოხმარება	მგჯ/კგ	1.1	90	22
ენერგიის მოხმარება	კვტ.სთ/კგ	0.31	25.0	6.1
მოსავლიანობა	კგ/მ ² /წელი	3.9	41	36.5
ზრდის ციკლი	დღე	45	36	30
წყლის დაზოგვა ნიადაგთან შედარებით	%	0%	92%	98.3%
მოსავლიანობის უპირატესობა ნიადაგთან შედარებით	×	1×	10.5×	9.4×
ენერგიის მოხმარება ნიადაგთან შედარებით	×	1×	81.8×	20×

*ნიადაგზე დაფუძნებულ სოფლის მეურნეობას ფაქტობრივად არ სჭირდება ენერგია გარედან, რის გამოც ამ მაჩვენებლის პირდაპირი შედარებისას სიფრთხილეა საჭირო. ენერგიის ერთეულები: მგჯ = მეგაჯოული, 1 კვტ.სთ = 3.6 მგჯ.

*** SkyRoots-ის ენერგომოხმარება გაზომილია ნაწილობრივ მზის შუქზე ტესტირებისას, რის გამოც LED განათების დატვირთვა შემცირებული იყო; სრულად ხელოვნური განათებისას მაჩვენებელი უფრო მაღალი იქნებოდა და ენერგიის დაზოგვის პროცენტიც შესაბამისად დაბალი. ამასთან, ჰიდროპონიკისა და ნიადაგის ლიტერატურული მონაცემები შეიძლება განსხვავებული განათებისა და გარემო პირობებისთვის იყოს მოცემული, ამიტომ ენერგიის შედარება საორიენტაციოდ უნდა განიხილებოდეს.*

3.4 მათემატიკური ანალიზი

3.4.1 წყლის ჯამური მოხმარება და დაზოგვის პროცენტი

SkyRoots - 4.23 ლ/კგ, ჰიდროპონიკა - 20 ლ/კგ, ნიადაგი - 250 ლ/კგ.

წყლის დაზოგვა ნიადაგთან შედარებით: $((250 - 4.23) / 250) * 100 \approx 98.3\%$

წყლის დაზოგვა ჰიდროპონიკასთან შედარებით: $((20 - 4.23) / 20) * 100 \approx 78.85\%$

შენიშვნა: 250 ლ/კგ არიდული რეგიონის ღია გრუნტის მაჩვენებელია. დახურულ გრუნტში ჰიდროპონიკის უპირატესობა წყლის მოხმარებაში გაცილებით მცირეა (გამოქვეყნებული შედარებებით $\approx 50-64\%$), ამიტომ ამ ბაზისთან შედარებით დაზოგვის პროცენტიც დაბალი იქნება.

3.4.2 ენერგიის მოხმარება და ეფექტურობა

30-დღიანი ჯამური ენერგიის მოხმარება შეადგენს $2.2 \text{ მგჯ/დღე} \times 30 \text{ დღე} = 66.0 \text{ მგჯ-ს}$ ($\approx 18.3 \text{ კვტ.სთ.}$). მიღებული მოსავალი $\approx 3 \text{ კგ.}$ SkyRoots - $66.0 / 3 = 22 \text{ მგჯ/კგ}$ ($\approx 6.1 \text{ კვტ.სთ/კგ.}$). შედარებისთვის: ჰიდროპონიკა - 90 მგჯ/კგ (25.0 კვტ.სთ/კგ.), ნიადაგი - 1.1 მგჯ/კგ (0.31 კვტ.სთ/კგ.).

ჰიდროპონიკასთან შედარებით ენერგიის დაზოგვა: $((90 - 22) / 90) \times 100 \approx 75.6\%$.

ნიადაგთან შედარებით SkyRoots ≈ 20 -ჯერ მეტ ენერგიას მოიხმარს ($22 / 1.1 = 20$).

ენერგიის გამოყენების ეფექტურობის კოეფიციენტი (წლიური მოსავალი 1 მ^2 -ზე ÷ ენერგიის ხვედრითი მოხმარება, $\text{კგ/მ}^2/\text{წელი} \div \text{მგჯ/კგ}$): SkyRoots-ისთვის $36.5 / 22 \approx 1.66$, ჰიდროპონიკისთვის $41 / 90 \approx 0.46$, ნიადაგისთვის $3.9 / 1.1 \approx 3.55$.

ზრდის დაჩქარება (დაშვებული 45-დღიანი ნიადაგური და 36-დღიანი ჰიდროპონიკული ციკლის პირობებში): ნიადაგთან შედარებით $((45 - 30) / 45) * 100 = 33.3\%$; ჰიდროპონიკასთან შედარებით $((36 - 30) / 36) * 100 \approx 16.7\%$.

4. რისკების შეფასება და უსაფრთხოების ზომები

- ელექტრული უსაფრთხოება: ESP32 და გარდამქმნელების სქემები იზოლირებულია და აღჭურვილია ავარიული თერმული გათიშვის მექანიზმით.

- ბიოლოგიური დაბინძურების კონტროლი: ულტრაბგერითი მფრქვეველი და რეზერვუარები რეგულარულად სტერილიზდება.
- ულტრაბგერითი მფრქვეველის ტექნიკური გამოწვევები: ულტრაბგერითი აეროპონიკის ცნობილი პრობლემაა მინერალური მარილების დალექვა მემბრანაზე (გაბიდვანა/ნადების წარმოქმნა), რაც ამცირებს ნისლის გამომუშავებასა და კომპონენტის სიცოცხლისუნარიანობას. ამ რისკების შესამცირებლად გამოიყენება შემდეგი მექანიზმები: (1) სრულად ხსნადი საკვები აზები; (2) pH-ისა და ხსნარის კონცენტრაციის შენარჩუნება დადგენილ დიაპაზონში (pH 6.0-6.5); (3) მფრქვეველის მემბრანისა და რეზერვუარის პერიოდული დეზინფექცია (მაგ. ლიმონმჟავას სუსტი ხსნარით); (4) მფრქვეველის ინტერვალური რეჟიმი და რეზერვუარში ხსნარის ტემპერატურის კონტროლი გადახურებისას ავტომატური გათიშვით.
- დაავადებების მონიტორინგი: სპეციალურად გაწვთვნილი კამერა ადრეულ სტადიაზევე ამოიცნობს პრობლემურ ნიშნებს და პრევენციული რეაგირების საშუალებას იძლევა.
- სისტემის დუბლირება: მობილურ აპლიკაციაში ავტომატური შეტყობინებები უზრუნველყოფს, რომ ადამიანი დროულად ჩაერთოს პროცესში საჭიროების შემთხვევაში.

5. გარემოსდაცვითი და სოციალურ-ეკონომიკური ზეგავლენა

- წყლის დაზოგვა: ჰიდროპონიკასთან შედარებით მოხმარება 78%-ზე მეტად მცირდება, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია რეგიონებისთვის, სადაც წყლის დეფიციტია.
- ნიადაგის დაცვა: სისტემა ნიადაგს საერთოდ არ საჭიროებს, რაც ურბანული ვერტიკალური მეურნეობისა და დეგრადირებული ტერიტორიების ხელახლა ათვისების საშუალებას იძლევა.
- ენერგოეფექტურობა: დაბალი საოპერაციო ენერგომოთხოვნა სისტემას განახლებადი ენერგიით მუშაობის შესაძლებლობასაც აძლევს.
- ავტომატიზაცია: ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მონიტორინგი ამცირებს ხელით კონტროლის საჭიროებას და პროდუქტიულობასაც ზრდის.
- სასურსათო უსაფრთხოება: ზრდის დაჩქარებული ციკლი და მაღალი რესურსეფექტურობა პასუხს სთავაზობს მზარდი მოსახლეობის სასურსათო მოთხოვნებს.

6. დასკვნა

SkyRoots-ის ულტრაბგერითი აეროპონიკის სისტემა ცხადად აჩვენებს, რომ უმნიშვნელოვანესი რესურსები - ნიადაგის, წყლისა, და ელექტროენერგიის - გამოყენება გამორიცხული ან მინიმუმამდე დაყვანილია. ამასთან მცენარეთა ზრდაც უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე ეს ტრადიციულ ჰიდროპონიკასა თუ ნიადაგზე დაფუძნებულ სოფლის მეურნეობაშია დაფიქსირებული. ეს გარემოება ტექნოლოგიას ტრადიციული მეთოდების პერსპექტიულ და მდგრად ალტერნატივად წარმოაჩენს, არსებითი გარემოსდაცვითი სარგებლითა და სოციალურ-ეკონომიკური პოტენციალით. ამ დასკვნების გასამყარებლად შემდგომ კვლევებში საჭირო იქნება გრძელვადიან მოსავლიანობაზე დაკვირვება, სხვადასხვა კულტურის ინტეგრირება და რეალურ პირობებში დანერგვისას წარმოქმნილი გამოწვევების შესწავლა.

ლიტერატურა

Li, Q., Li, X., Tang, B., & Gu, M. (2018). Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. *Horticulturae*, 4(4), 35. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040035>

Mirzabe, A.H., Hajiahmad, A., Fadavi, A. et al. Ultrasonic Atomizer for Aeroponic Cultivation: Effect of Nutrient Solution Dosage, Voltage, and Horn Dimensions. *J. Biosyst. Eng.* 47, 130–151 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42853-022-00135-z>

Lei, Chunli and Nicki J. Engeseth. "Comparison of growth characteristics, functional qualities, and texture of hydroponically grown and soil-grown lettuce." *Lwt - Food Science and Technology* 150 (2021): 111931.

FAO. (2020). Water Use in Agriculture. Food and Agriculture Organization Statistical Report.

დანართი: 30-დღიანი აერობიკური ექსპერიმენტის ყოველდღიური მონაცემები

დღე	ტემპერატურა (°C)	ტენიანობა (%)	pH	წყალი (ლ)	ენერგია (მკვ)	სიმაღლე (სმ)
1	24.0	73.5	6.0	0.20	2.20	0.0
2	24.3	75.2	6.0	0.22	2.20	0.7
3	24.1	79.0	6.0	0.23	2.20	1.5
4	24.5	76.4	6.0	0.26	2.20	2.2
5	24.8	74.5	6.0	0.25	2.20	2.6
6	24.1	74.0	6.0	0.27	2.20	3.2
7	23.9	76.2	6.0	0.28	2.20	4.2
8	24.2	77.8	6.0	0.30	2.20	4.6
9	24.2	76.5	6.5	0.35	2.20	5.7
10	24.3	74.6	6.5	0.34	2.20	6.7
11	24.2	73.9	6.0	0.36	2.20	7.8
12	24.6	75.4	6.0	0.42	2.20	8.7
13	24.8	76.1	6.0	0.39	2.20	10.2
14	24.7	76.2	6.0	0.44	2.20	11.1
15	24.9	74.0	6.0	0.41	2.20	11.9
16	24.9	74.4	6.0	0.46	2.20	13.0
17	24.5	75.0	6.5	0.44	2.20	14.3
18	24.6	75.2	6.5	0.47	2.20	15.3
19	24.3	76.8	6.5	0.51	2.20	16.5
20	24.6	76.1	6.5	0.44	2.20	17.4
21	24.6	76.6	6.5	0.53	2.20	17.8
22	24.5	75.9	6.0	0.54	2.20	18.2
23	24.3	76.2	6.0	0.52	2.20	18.7
24	24.7	76.3	6.0	0.49	2.20	19.7
25	24.6	73.2	6.0	0.56	2.20	20.0
26	24.4	73.7	6.0	0.55	2.20	20.5
27	24.4	73.8	6.0	0.60	2.20	20.8
28	24.6	73.3	6.0	0.59	2.20	21.2
29	24.7	73.5	6.5	0.67	2.20	21.7
30	24.7	76.4	6.5	0.61	2.20	22.0
საბოლოო	24.5	75.3	6.0-6.5	12.70	66.0	22.0