ფარავნის ტბაში წყლის მასების ცირკულაციის რიცხვითი მოდელირება

აკაკი გირგვლიანი, აკაკი მნელაძე
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი: *ნაშრომში წარმოდგენილია ფარავნის ტბის ორგანზომილებიანი რიცხვითი მოდელი. შემუშავებული მოდელის საშუალებით გათვლილია ტბაში წყლის ნაკადების ცირკულაციის სურათები სავარაუდო ატმოსფერული ქარის ზემოქმედების პირობებში. მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე მიღებულია შესაბამისი დასკვნები და დასახულია პრაქტიკული ამოცანები.*

საკვანძო სიტყვები: რიცხვითი მოდელირება, გადატანა-დიფუზიის განტოლებები, ფარავნის ტბა, წყლის მასების დინამიკა

შესავალი. ფარავნის ტბა წარმოადგენს ზედაპირის ფართობით საქართველოს უდიდეს ტბას. იგი მდებარეობს ჯავახეთის მთიანეთის ჩრდილო-აღმოსავლეთ ნაწილში, სამსრისა და ჯავახეთის ქედებს შორის მდებარე ქვაბულში, ზღვის დონიდან 2073 მ სიმაღლეზე. ტბის ზედაპირის ფართობი 37.5 კვადრატული კმ-ია, მისი საშუალო სიღრმე 2,2 მეტრია და მაქსიმალური სიღრმე აღწევს 3,3 მეტრს. ტბის ქვაბულის სანაპირო ხაზი შეჭრილ-შემოჭრილია, ორიენტირებულია ჩრდილო-აღმოსავლეთიდან სამხრეთ-დასავლეთით. დროთა განმავლობაში ქვაბულის ძირი ამოვსებულია ტბური ნაფენებით, რომლის სიმძლავრე აღწევს რამდენიმე ათეულ მეტრს. დღეისათვის ტბის ფსკერი თითქმის ბრტყელია.

ფარავნის ტბა პოპულარულია მეთევზეთათვის. წყალი მტკნარია (80 მგ/ლ). გამოიყენება თევზსამეურნეო დანიშნულებით. მასში გვხვდება იშვიათი ჯიშის თევზები: ტბის კალმახი, ფარავნის კობრი, ხრამული, ტბის ქაშაყი, მტკვრის წვერა, აღმოსავლური მარდულა, რიპუსი და სხვა. (Wikipedia, 2026).

ტბა არქეოლოგიური საიდუმლოებებით არის მოცული, მის ფსკერზე აღმოჩენილია ბრინჯაოს ხანის სამარხი და სხვადასხვა საყოფაცხოვრებო ნივთები. ამ მიმართულებით ჯერ კიდევ ბევრი პასუხგაუცემელი კითხვაა და კვლევები არ არის დასრულებული. თავისი გარემო ლანდშაფტის სილამაზით ფარავნის ტბა ზამთარ-ზაფხულს ასევე მრავალ ტურისტს იზიდავს.

იმისათვის, რომ გაზრდილი ანთროპოგენული ზემოქმედების შედეგად არ მოხდეს წყალსაცავის არსებული მდგომარეობის გაუარესება, საჭიროა აუზის სხვადასხვა მახასიათებლების თეორიულად დასაბუთებული შეფასება და მათი შესაძლო ცვლილებების

პროგნოზირება გარეგანი ხელოვნური ზემოქმედებების პირობებში. აღნიშნული ამოცანის წარმატებით გადაჭრა შესაძლებელია მხოლოდ მათემატიკური მოდელირების მეთოდების გამოყენებით, რაც სხვადასხვა იმიტაციური ვარიანტების თეორიულად გათამაშების საშუალებას გვაძლევს.

ძირითადი ნაწილი. ტბის სხვადასხვა ფიზიკური პარამეტრების შესწავლისას განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა ენიჭება წყლის მასების დინამიკური მახასიათებლების შეფასებას, ვინაიდან მათზე არის დამოკიდებული აუზში მიმდინარე მრავალი ფიზიკური, ბიოლოგიური და ქიმიური პროცესები. ისეთ მცირე ზომების მქონე წყალსაცავში, როგორიცაა ფარავნის ტბა წყლის ნაკადების ძირითად მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს ატმოსფერული ზემოქმედება - ქარის ხახუნის დაძაბულობის ძალები წყლის ზედაპირზე, ამასთან წყლის ნაკადების ცირკულაციას მნიშვნელოვანწილად აყალიბებს ფსკერის რელიეფი. ატმოსფერული ქარის ზემოქმედების შედეგად ტბაში განვითარებული დინამიკური პროცესების შესასწავლად ჩვენს მიერ შემუშავებული იქნა მათემატიკური მოდელი, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია წყლის ნაკადების ცირკულაციისა და ტბის თავისუფალი ზედაპირის ფორმირების რიცხვითი გათვლა (გირგვლიანი, 2015; გირგვლიანი 2016).

მოცემულ ნაშრომში ფარავნის ტბა, მასში წყლის მცირე სიღრმის გათვალისწინებით, წარმოდგენილია, როგორც ორგანზომილებიანი $D(x, y)$ არე, რომლის საზღვარი S - აღიწერება ფსკერის რელიეფისა და წყლის თავისუფალი ზედაპირის თანაკვეთით. ამასთან იგულისხმება, რომ კოორდინატთა სისტემა xoy, ემთხვევა წყლის თავისუფალ ზედაპირს, ox ღერძი მიმართულია აღმოსავლეთისაკენ, ხოლო oy ღერძი კი - ჩრდილოეთისაკენ.

აღვნიშნოთ $h(x, y)$ - ით ფუნქცია, რომელიც აღწერს ფსკერის რელიეფს, ხოლო $-\xi(x, y, t)$ - ით წყლის ზედაპირის გადახრა შეუშფოთებელი მდგომარეობიდან. ცხადია მაშინ წყლის სიღრმე განსახილველ არეში აღიწერება ფუნქციით: $H(x, y, t)= h(x, y)+ \xi(x, y, t)$. მაშინ $D(x, y)$ არეში წყლის მასების მოძრაობისა და უწყვეტობის განტოლებები შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით (გირგვლიანი, 2015; გირგვლიანი 2016):

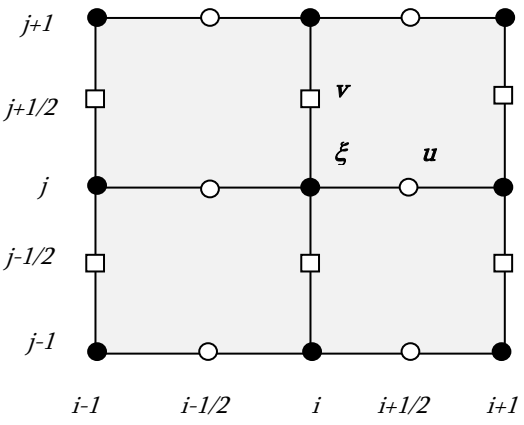
$$\begin{aligned}
&\frac{\partial uH}{\partial t}+\frac{\partial u^2H}{\partial x}+\frac{\partial uvH}{\partial y}-fvH+gH\frac{\partial \xi}{\partial x}=F_x,\\
&\frac{\partial vH}{\partial t}+\frac{\partial uvH}{\partial x}+\frac{\partial v^2H}{\partial y}-fuH+gH\frac{\partial \xi}{\partial y}=F_y,\\
&\frac{\partial \xi}{\partial t}+\frac{\partial uH}{\partial x}+\frac{\partial vH}{\partial y}=0,
\end{aligned} \qquad (1)$$

სადაც, u და v წყლის ნაკადის სიჩქარის ვექტორის კომპონენტებია შესაბამისად ox და oy ღერძების გასწვრივ, f - კორიოლისის პარამეტრია, g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა დედამიწაზე, F_x და F_y ფუნქციები აღწერენ ქარის ხახუნის დაძაბულობას და დაძაბულობას ფსკერთან ხახუნის გამო: ($F_x = \tau_x^1 - \tau_x^0$ და $F_y = \tau_y^1 - \tau_y^0$).

მოცემული სისტემის ამონახსნი შეიძლება ვეძებოთ შემდეგი სასაზღვრო და საწყისი პირობებით:

$u = v = 0$, S - საზღვარზე,

$u = u^0$, $v = v^0$, $\xi = \xi^0$ როცა $t = t^0$. (2)



ნახ. 1. სხვაობიანი ბადის სტრუქტურა.

(1), (2) ამოცანის ამოხსნა მისი სირთულის გამო ანალიზური მეთოდებით ვერ ხერხდება, რის გამოც იძულებული ვართ შესაბამისი მიახლოებითი ამოხსნები ვეძებოთ რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით. ამისათვის განსახილველი უწყვეტი ორგანზომილებიანი $D(x, y)$ არე შევცვალოთ სხვაობიანით $D^h(x, y)$, რომელშიც მთელინდექსიანი (i, j) წერტილების პარალელურად განვიხილოთ შუალედურებიც $(i+1/2, j)$ და $(i, j+1/2)$ (ნახ. 1.). საძიებელი უწყვეტი ფუნქციები u, v და ξ უნდა შევცვალოთ ბადური ფუნქციებით u^h, v^h და ξ^h, ამასთან ξ^h ფუნქცია მოთავსებულია ბადის მთელინდექსიან კვანძებში, ხოლო u^h და v^h ფუნქციები გადაადგილებულია ნახევარი ბიჯით შესაბამისად ox და oy ღერძების გასწვრივ.

საჭიროების შემთხვევაში ბადური ფუნქციების ინტერპოლაცია შუალედური კვანძებიდან მთელში და პირიქით ხორციელდება წრფივი ფორმულებით: $\phi_k = \frac{\phi_{k-1/2}+\phi_{k+1/2}}{2}$, $\phi_{k+1/2} = \frac{\phi_k+\phi_{k+1}}{2}$.

(1) დიფერენციალური განტოლებათა სისტემის სივრცითი დიფერენციალური ოპერატორი A უნდა შევცვალოთ შესაბამისი სასრულ სხვაობიანი ანალოგით A^h ისე, რომ ამ უკანასკნელმა შეინარჩუნოს საწყისი ოპერატორის ძირითადი ინტეგრალური მახასიათებლები. ზემოთაღწერილ ბადეზე ამის გაკეთება საკმაოდ მარტივია. საკმარისია ყველა სივრცითი კერძო წარმოებული შევცვალოთ შესაბამისი სასრულ-სხვაობიანი ანალოგით ცენტრალური სხვაობების გამოყენებით.

ინტერპოლაციის შდეგად ვღებულობთ შემდეგი სახის სხვაობიან ამოცანას:

$$\frac{d\varphi^h}{dt} + A^h\varphi^h = F^h, \quad \varphi^h = 0 \quad S^h - \text{ზე}, \quad \varphi^h = \varphi^0 \ \text{როცა} \ t = t_0. \qquad (3)$$

სადაც, $\varphi^h((uH)^h, (vH)^h, (\xi)^h)$ საძიებელი ვექტორ ფუნქციაა, ხოლო $F^h\left((F_x)^h, (F_y)^h, 0\right)$ - ცნობილი მარჯვენა მხარეა.

ამოცანის ინტეგრირება დროის მიხედვით მიმდინარეობს ცხადი სქემით. საბოლოოდ ვღებულობთ ამოცანის რეალიზაციის შემდეგ სქემას:

$$\varphi_{n+1}^h = \varphi_n^h - \Delta t \cdot A^h \varphi_n^h + F_n^h, \qquad (4)$$

სადაც: A^h - საწყისი ამოცანის შესაბამისი სივრცითი ოპერატორის სხვაობიანი ანალოგია, ხოლო Δt - კი ინტეგრების ბიჯია დროის მიხედვით.

რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგები: აღწერილი მოდელის საშუალებით ჩატარებული იქნა საცდელი რიცხვითი ექსპერიმენტები ფარავნის ტბის არისათვის.

მოდელში გამოიყენებოდა პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობები: გრავიტაციული მუდმივა g = 980 სმ/წმ²; კორიოლისის პარამეტრი f = 0.95$_{10}$-04 წმ$^{-1}$; ფსკერზე ხახუნის დაძაბულობის ვექტორი $\vec{\tau}^1(\tau_x^1, \tau_y^1)$ გამოითვლება ფორმულებით:

$\tau_x^1 = b \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot u, \quad \tau_y^1 = b \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot v,$ სადაც b = 0,003;

ატმოსფერული ქარის ხახუნის დაძაბულობის ვექტორი $\vec{\tau}^0(\tau_x^0, \tau_y^0)$ გამოითვლება ფორმულებით:

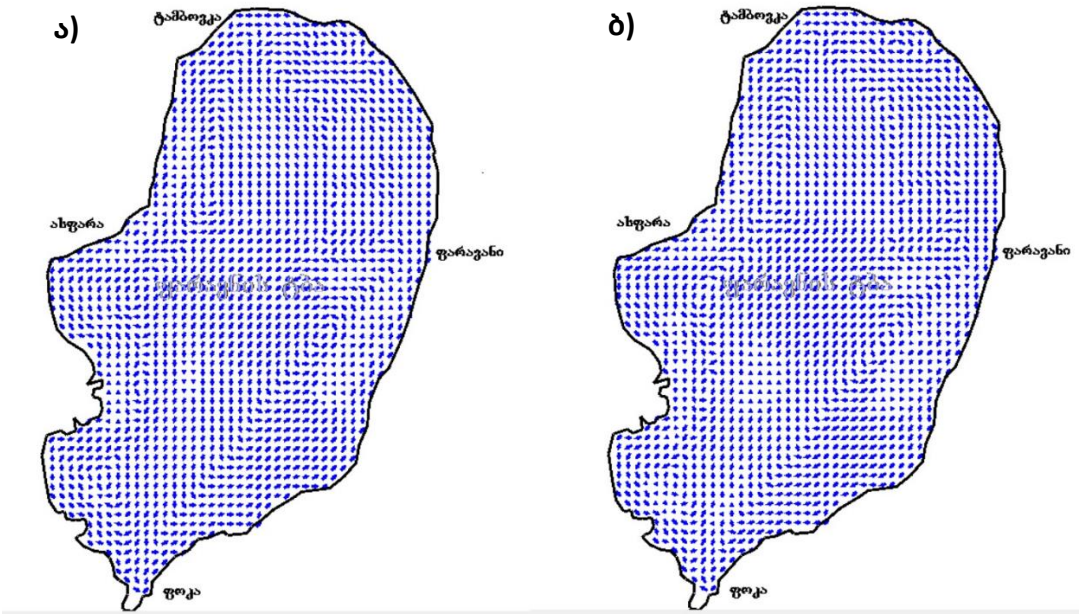
$\tau_x^0 = b_1 \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \cdot W_x, \ \tau_y^0 = b_1 \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \cdot W_y,$ სადაც b_1 = 3,2$_{10}$-06.

წყლის მასების მთავარი მამოძრავებელ ძალას მოცემულ მოდელში წარმოადგენს ატმოსფერული ქარის ზემოქმედება. შესაბამისი ინფორმაციის მოსაპოვებლად ვაკვირდებოდით The Weather Company კომპანიის მიერ Weather Channel მობილურ ვებ-გვერდზე არსებულ ყოველდღიურ ინფორმაციას რეგიონში ატმოსფერული ქარის მონაცემების შესახებ (The Weather Company, 2026). აღნიშნულ ინფორმაციაზე დაკვირვების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ქარის სიჩქარე ფარავნის ტბის რეგიონში მერყეობს 5-15 მ/წმ-ის ფარგლებში. რაც შეეხება მიმართულებას ის საკმაოდ ხშირად ცვალებადია, მაგრამ დღის პერიოდში დომინირებს სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ქარი, ხოლო ღამის საათებში სამხრეთის ქარი.

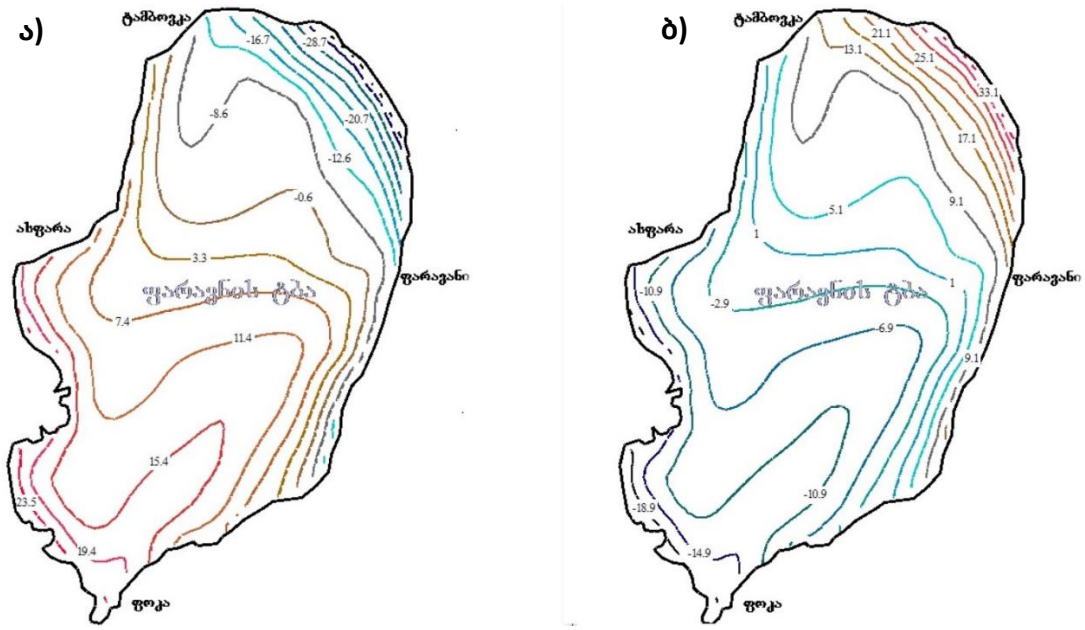
მოცემოლ ნაშრომში მოყვანილია 10 მ/წმ სიჩქარის ქარის ზემოქმედების ქვეშ ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგები, რომლებშიც აუზის თავზე მოქმედებს სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ან მისი საპირისპირო ქარი. ორივე შემთხვევაში თვლა მიმდინარეობდა პირობითი კვაზი სტაციონალური მდგომარეობის დამყარებამდე. ასეთი მდგომარეობა მიიღწევა თვლის დაწყებიდან დაახლოებით 36-48 საათის განმავლობაში. აღსანიშნავია, რომ ქარის მიმართულების შეცვლა საპირისპიროთი გვაძლევს აუზში წყლის ნაკადების მიმართულებების ცვლილებას ასევე საპირისპიროდ (ნახ. 2.). იგივე შეიძლება ითქვას წყლის ზედაპირის გეომეტრიაზე (ნახ. 3.).

დასკვნა: ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგებიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ წარმოდგენილი მოდელი კარგად ასახავს რეალურ გარემოში მიმდინარე დინამიკურ პროცესებს და მისი გამოყენებით შეიძლება სხვადასხვა იმიტაციური ექსპერიმენტების ჩატარება:

1. ატმოსფერული ქარის შესახებ ინფორმაციის რეალურ დროში მიღების შემთხვევაში შეიძლება ტბაში წყლის მასების ცირკულაციის რეალური სურათების მიღება და მათი დროში ცვალებადობის პროგნოზირება.
2. აუზის ფსკერის რელიეფისა და სანაპირო ზოლის დეტალური ტოპოგრაფიის არსებობის პირობებში მოდელის საშუალებით შესაძლებელია ისეთი პროცე-სების მოდელირება როგორიცაა სანაპირო ზოლის დატბორვა და დაშრობა.



ნახ. 2. დინების ვექტორული ველები: ა) სამხრეთ-დასავლეთის ქარი, ბ) ჩრდილო აღმოსავლეთის ქარი.



ნახ. 3. თავისუფალი ზედაპირის იზოწირები: ა) სამხრეთ-დასავლეთის ქარი, ბ) ჩრდილო აღმოსავლეთის ქარი.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. გირგვლიანი ა., (2015), წყლის ნაკადების დინამიკური მახასიათებლების რიცხვითი მოდელირება „ბრტყელი“ წყალსაცავებისათვის. // აწსუ მოამბე, № 2(6), ქუთაისი, გვ. 132-138

2. გირგვლიანი ა., (2016), წყალსაცავებში წყლის ნაკადების ჰორიზონტალური ცირკულაციის მათემატიკური მოდელირება.// აწსუ მოამბე, № 1(7), ქუთაისი, გვ. 145-151
3. about.ge (2026). www.about.ge/ka/pois/?poid=622
4. The Weather Company, LLC (2026). https://weather.com/ru

Numerical modeling of the influence of bottom relief on the dynamics of water masses in Lake Paravani

Akaki Girgvliani, Akaki Dzneladze

summary

The paper presents a two-dimensional numerical model of Lake Pharavani. Using the developed model, numerical experiments were conducted to calculate the circulation regimes of water flows in the lake under the influence of assumed atmospheric winds. Based on the analysis of the obtained results, relevant conclusions have been drawn and practical tasks have been set.

განახლებადი ენერგია და გარემოს დაცვა: იაპონიის გამოცდილება JFNR (Japanese Framework for New Renewables) კონტექსტში

ნათია კამკამიძე, ლამარა გობეჯიშვილი
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
საქართველოს ეკოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემია

***აბსტრაქტი**: განახლებადი ენერგიის განვითარება თანამედროვე გარემოსდაცვითი პოლიტიკისა და კლიმატის ცვლილების შემსუბუქების ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ინსტრუმენტს წარმოადგენს. წინამდებარე სტატიაში გაანალიზებულია იაპონიის ენერგეტიკული ტრანსფორმაციის პროცესები JFNR (Japanese Framework for New Renewables) კონცეპტუალური ჩარჩოს ფარგლებში. კვლევა მოიცავს იაპონიის განახლებადი ენერგიის სტრუქტურულ თავისებურებებს, მათი განვითარების შედეგად წარმოქმნილ ეკოლოგიურ ეფექტებსა და ტექნოლოგიური ინოვაციების როლს ენერგეტიკული სისტემის დეკარბონიზაციის პროცესში. ანალიზი ეფუძნება საერთაშორისო ორგანიზაციების მიერ გამოქვეყნებულ სტატისტიკურ მონაცემებსა და მათ სისტემურ შეფასებას.*

***საკვანძო სიტყვები:** განახლებადი ენერგია, გარემოს დაცვა, იაპონია, JFNR, ენერგეტიკული პოლიტიკა*

შესავალი

თანამედროვე მსოფლიოს წინაშე მდგომი ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევა არის ენერგეტიკული განვითარების ისეთი მოდელის ჩამოყალიბება, რომელიც ერთდროულად უზრუნველყოფს ეკონომიკურ ზრდას, ენერგეტიკულ უსაფრთხოებასა და გარემოს დაცვას. მე-20 საუკუნის განმავლობაში ენერგეტიკული პროგრესი უმეტესად ეფუძნებოდა ფოსილურ საწვავებზე დამოკიდებულ სისტემებს, რამაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა