უაკ 626.823.93

მდინარეებში ტრანზიტული ნაკადის მოძრაობის კანონზომიერებები

ლ. კლიმიაშვილი, დ. გუბელაძე, დ. გურგენიძე, მ. ნაცვლიშვილი
(საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი)

რეზიუმე: *განხილულია ზედაპირული და კალაპოტის შემადგენელი გრუნტის ნაკადის მოძრაობა. დადგენილია ინდუცირებული დინების ზეგავლენა ზედაპირული ნაკადის ჰიდრავლიკურ მახასიათებლებზე. მიღებულია დამოკიდებულება კალაპოტის გამტარუნარიანობის ინტეგრალური მახასიათებლების გამოსათვლელად.*

საკვანძო სიტყვები: *კალაპოტური ნაკადი; მოძრაობის კანონზომიერება; წყალჟონვადი შრე; ინდუცირებული დინება.*

1. შესავალი

ბუნებაში მდინარეების დიდი ნაწილი მიედინება წყალჟონვად კალაპოტებში და ტრანზიტული ნაკადის მოძრაობისას ადგილი აქვს კალაპოტქვეშა დინებას. ამ შემთხვევაში მოსალოდნელია ძირითადი ნაკადის და კალაპოტქვეშა ზედაპირულ შრეში ინდუცირებული დინების ურთიერთზემოქმედება, რომლის დროსაც კინეტიკური ენერგიის მასის გადატანამ შრეთა შეხების საზღვრის გასაყარზე მნიშვნელოვანი როლი უნდა შეასრულოს ძირითადი ნაკადის სტრუქტურის ჩამოყალიბებაში.

2. ძირითადი ნაწილი

განვიხილოთ კუთრი ხარჯის შემდეგი დამოკიდებულება:

$$\frac{d^2 q_\Delta}{dZ^2} = \frac{\left(q_\Delta - U_f Z\right)}{\varepsilon}, \tag{1}$$

სადაც q_Δ არის ნაკადის კუთრი ხარჯი კალაპოტქვეშა ზედაპირულ შრეში ერთეულ სიგანეზე; $U_ფ$ – გრძივი ფილტრაციული სიჩქარე.

თუ დავუშვებთ, რომ ფილტრაციული სიჩქარე არ არის დამოკიდებული Z-ზე, მაშინ (1) განტოლებას, როდესაც $Z \leq 0$, შემდეგი სახე ექნება:

$$q_\Delta = \tilde{C}_1 \exp^{\left(Z/\sqrt{\varepsilon}\right)} + \tilde{C}_2 \exp^{-\left(Z/\sqrt{\varepsilon}\right)} - U_ფ Z \qquad (2)$$

განსაზღვრისას

$$q_\Delta = \int_0^{Z=-\Delta} U_\Delta(Z) dZ \qquad (3)$$

დინების სიჩქარეთა განაწილება კალაპოტქვეშა ზედაპირულ შრეში მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$U_\Delta(Z) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\left[\tilde{C}_1 \exp^{\left(Z/\sqrt{\varepsilon}\right)} - \tilde{C}_2 \exp^{\left(-Z/\sqrt{\varepsilon}\right)}\right] - U_f. \qquad (4)$$

ინტეგრირების მუდმივების განსაზღვრისას ვისარგებლოთ შემდეგი სასაზღვრო პირობით:

$$U_\Delta(Z) = U_{ფს}, \qquad (5)$$

როცა $Z = 0$

$$\frac{dU_\Delta(Z)}{dZ} = \frac{dU}{dZ}, \qquad (6)$$

სადაც U არის ძირითადი ნაკადის დინების სიჩქარე; $U_{ფს}$ – სიჩქარე, როდესაც $Z = 0$.

მიღებული პირობები (6) ნიშნავს ძირითად და კალაპოტქვეშა ზედაპირული ნაკადების უწყვეტობას.

ძირითად ნაკადში სიჩქარის განაწილება ვერტიკალზე შეიძლება აღწერილ იქნეს მაჩვენებლიანი დამოკიდებულებით. მაშინ (5) და (1) ფორმულების გამოყენებით გვექნება:

$$(\alpha + 1)\overline{U}\left(\frac{0{,}5d}{h}\right)^\alpha = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\left(\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2\right) - U_f. \qquad (7)$$

თუ ვისარგებლებთ (6) დამოკიდებულებით, მივიღებთ:

$$\frac{\alpha}{d}(\alpha + 1)\overline{U}\left(\frac{0{,}5d}{h}\right)^\alpha = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\left(\tilde{C}_1 + \tilde{C}_2\right), \qquad (8)$$

საიდანაც

$$\widetilde{C}_1 = \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon}\left[U_f + (\alpha+1)\overline{U}\left(\frac{0{,}5d}{h}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(\frac{0{,}5d}{h} + \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]; \quad (9)$$

$$\widetilde{C}_2 = \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon}\left[U_f - (\alpha+1)\overline{U}\left(\frac{0{,}5d}{h}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(\frac{0{,}5d}{h} - \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]. \quad (10)$$

საბოლოოდ

$$U_\Delta(Z) = \frac{1}{2}\left\{\left[U_ფ + A\left(\frac{0{,}5d}{h} + \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\cdot \exp^{\left(Z/\sqrt{\varepsilon}\right)}\right] + \right.$$

$$\left. + \left[U_f - A\left(\frac{0{,}5d}{h} - \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\cdot \exp^{\left(-Z/\sqrt{\varepsilon}\right)}\right]\right\} - U_f, \quad (11)$$

სადაც $A = (\alpha+1)\overline{U}(0{,}5d/h)^{\alpha-1}$.

როდესაც $Z = -\Delta$, ინდუცირებული დინების სიჩქარე კალაპოტქვეშა შრეში ტოლია: $U_\Delta(Z) = U_ფ$.

კალაპოტის შრის სისქის შეფასებისას გამოიყენება ფორმულა (11), რომლის გარდაქმნის შედეგად: როდესაც $Z = -\Delta$, დინების სიჩქარე კალაპოტქვეშა ზედაპირულ შრეში $U_\Delta(Z) = U_ფ$ განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$4U_ფ = \left[U_ფ + A\left(\frac{0{,}5d}{h} + \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]\cdot \exp^{\left(\Delta/\sqrt{\varepsilon}\right)} +$$

$$+ \left[U_f - A\left(\frac{0{,}5d}{h} - \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]\cdot \exp^{\left(-\Delta/\sqrt{\varepsilon}\right)}. \quad (12)$$

კალაპოტქვეშა ზედაპირულ შრეში Δ შრის სისქის შეფასებისათვის ვისარგებლოთ (12) ფორმულით. შემოვისაზღვროთ პირველი სამი წევრით, რის შედეგადაც მივიღებთ შემდეგი სახის დამოკიდებულებას:

$$4U_ფ = \left[U_ფ + A\left(\frac{0{,}5d}{h} + \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]\cdot\left(1 - \frac{\Delta}{\sqrt{\varepsilon}} + \frac{\Delta^2}{\sqrt{\varepsilon}}\right) +$$

$$+ \left[U_ფ - A\left(\frac{0{,}5d}{h} - \frac{\alpha\sqrt{\varepsilon}}{h}\right)\right]\cdot\left(1 + \frac{\Delta}{\sqrt{\varepsilon}} + \frac{\Delta^2}{\sqrt{\varepsilon}}\right). \quad (13)$$

(13) ფორმულა ამოვხსნათ Δ-ის მიმართ:

$$\Delta = \frac{\alpha U_{\mathrm{f}} \varepsilon + \sqrt{\alpha^2 U_{\mathrm{fs}}^2 \varepsilon^2 + \left(U_{\mathrm{f}}^2 - U_{\mathrm{fs}}^2\right)\varepsilon d^2}}{d\left(U_{\mathrm{f}} + U_{\mathrm{fs}}\right)}. \tag{14}$$

(14) დამოკიდებულებაში აღებულია მეორე შესაკრების დადებითი მნიშვნელობა მრიცხველში იმ პირობით, რომ კალაპოტქვეშა ზედაპირული შრე მონოტონურად უნდა იზრდებოდეს გრუნტის ნაწილაკის ზომისა და ძირითადი ნაკადის ფსკერული სიჩქარის ზრდასთან ერთად.

თუ შევაფასებთ წყალჟონვადი შრის სიდიდეს, როდესაც $U_{\mathrm{fs}} \rangle\rangle U_{\mathrm{f}}$, მაშინ გვექნება:

$$\Delta = \frac{\alpha\varepsilon\sqrt{\alpha^2\varepsilon^2 - \varepsilon d^2}}{d}, \tag{15}$$

საიდანაც

$$\varepsilon \rangle \frac{d^2}{\alpha^2}. \tag{16}$$

(16) დამოკიდებულება წყალჟონვადი გრუნტის ნაწილაკის ზომის, სითხის სიბლანტის და ფსკერული სიჩქარის გათვალისწინებით შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\varepsilon = \varepsilon\left(d, \nu, g, U_{\mathrm{fs}}\right), \tag{17}$$

სადაც

$$\varepsilon = d^l, \nu^m, g^n, U_{\mathrm{fs}}^p. \tag{18}$$

გრუნტის წყალჟონვადობას თუ აქვს განზომილება, მაშინ

$$l + 2m + n + p = 2; \tag{19}$$

$$m + 2n + p = 0. \tag{20}$$

როგორც კვლევამ გვიჩვენა, გრუნტის წყალჟონვადობა ფილტრაციის კოეფიციენტის პროპორციულია, რაც, თავის მხრივ, ნაწილაკის ზომის კვადრატის პროპორციულია [1, 2, 3, 4], მაშინ (16) დამოკიდებულების გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ $l = 2$ და $\mathrm{m} = \mathrm{n}$. თუ შემოვიღებთ დისიპაციური სიჩქარის ცნებას, მაშინ

$$\varepsilon = \kappa \frac{d^2 U_{\mathrm{fs}}}{\alpha^2 (g\nu)^{1/3}}, \tag{21}$$

სადაც κ არის ემპირიული კოეფიციენტი.

ამ კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ ექსპერიმენტებში მიღებული მონაცემებით, რომლის მიხედვით

$$\varepsilon = 2{,}5\frac{d^2 U_{\mathrm{fs}}}{\alpha^2 (g\nu)^{1/3}}, \tag{22}$$

სადაც $\Delta, \alpha, U_{ფს}$ და $U_{ფ}$ პარამეტრები განისაზღვრება (16) და (21) ფორმულების გამოყენებით.

ექსპერიმენტული მონაცემების გაანგარიშებიდან ჩანს, რომ კალაპოტქვეშა ზედაპირული შრის სისქე იცვლება 10–50 ნაწილაკის დიამეტრის შუალედში, რაც ხარისხობრივად ემთხვევა [3, 4] ნაშრომებში მოყვანილ მონაცემებს.

განვიხილოთ ძირითადი ნაკადისა და ფილტრაციული დინების ურთიერთზემოქმედების გავლენა კალაპოტში ნაკადის ჰიდრავლიკურ პარამეტრებზე. ეს შეიძლება განხორციელდეს რეინოლდსის რიცხვის ანალოგიური პარამეტრის შემოღებით. საერთოდ, რეინოლდსის რიცხვი შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს, როგორც ნაკადის ტურბულენტური ენერგიის შეფარდება ფილტრაციული დინების დისიპაციურ ენერგიასთან, ე.ი.

$$\mathrm{Re} = \frac{U^3/h}{U^2\,\nu/d^2}. \tag{23}$$

ფილტრაციის გათვალისწინებით, მივიღებთ:

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{f}} = \frac{\overline{U}^3/h}{\overline{U}_\Delta^2\,\nu/d^2}. \tag{24}$$

$\mathrm{Re}_{ფ}$ პარამეტრს აქვს პრაქტიკულად იგივე ფიზიკური აზრი, როგორც (23) დამოკიდებულებას, ე.ი. იგი წარმოადგენს ტურბულენტური ენერგიის შეფარდებას დისიპაციურ ენერგიასთან. ამასთან, სიჩქარის სიდიდე $\overline{U}_\Delta$ განისაზღვრება (11) დამოკიდებულებით, როგორც ინდუცირებული დინების სიჩქარე, როდესაც $Z \le 0$:

$$\overline{U}_\Delta = \frac{1}{\Delta}\int_{Z=-\Delta}^{0} U_\Delta(Z)\,dZ. \tag{25}$$

ეს თანაფარდობა კარგად აპროქსიმირდება დამოკიდებულებით, რომელიც მიიღება უმცირეს კვადრატთა მეთოდის გამოყენებით:

$$\lambda = \frac{\alpha^2\Delta^2}{\varepsilon}\left(\frac{1}{50} + \frac{3{,}6}{\mathrm{Re}_{\mathrm{f}}^{2/5}} + \frac{240}{\mathrm{Re}_{\mathrm{f}}^{4/5}}\right)^2. \tag{26}$$

ამრიგად, (26) დამოკიდებულება ადასტურებს ადრე მიღებულ დასკვნებს პროპორციულობის კოეფიციენტის მუდმივობის შესახებ. მიღებული შედეგებით თუ ვი-

ხელმძღვანელებთ, მაგალითად, $\kappa=0{,}9$ ან $\kappa=0{,}88$ [2] წარმოადგენს კერძო შემთხვევას, როდესაც $Re_{ფ} \approx 10^4$, აგრეთვე $\overline{U}_{\Delta}=0$ აზრს კარგავს.

უნდა აღინიშნოს, რომ ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტის პროპორციულობა, რეინოლდსის რიცხვი $-1/4$ ხარისხში, აიღება ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე. როგორც ექსპერიმენტული კვლევის ანალიზმა აჩვენა, კალაპოტქვეშა ზედაპირული დინების შრის სისქე არაერთგვაროვნადაა დამოკიდებული კალაპოტის შემადგენელი გრუნტის ფილტრაციულ მახასიათებლებზე.

3. დასკვნა

წყალჟონვად კალაპოტებში, კალაპოტწარმომქმნელი პროცესების დარეგულირების დროს, თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის მონაცემების ანალიზის საფუძველზე მიღებული საანგარიშო (25) და (26) დამოკიდებულებების პრაქტიკული რეალიზაცია მნიშვნელოვნად დაეხმარება საპროექტო და სამშენებლო ორგანიზაციებს წყალსამეურნეო ობიექტების დაპროექტების, მშენებლობისა და ექსპლუატაციის ეფექტური და საიმედო მეთოდების შემუშავებაში.

ლიტერატურა

1. Джумагулова Н.Т., Дебольский В.К., Губеладзе Д.О. Математическая модель трансформации донных форм при наличии индуцированного течения // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Методы математического моделирования в задачах охраны природной среды экологии". Новосибирск, 1990, с. 15.
2. YamadaT. Kawabata.A theoretical study on the resistance law of the flow over a porous layer. Proc. JSGE. 1982 N 525. pp. 69-80 (in Japanese). M4.
3. Ward J.C. 'Turbulent flow in porous media, Proc.ASCE, .-journal of the Hydraulics Division,vol.90. N 15,1964.ppo1-l2.
4. Walters G.Z., Manam V.P. Hydrodynamic effects Of see page on bed particles л.Hydr.Div.Proc.ASCE.vol.97 l97l. pp.421-459.
5. Zanke I. Grundlagen der sedimen.tbeweKun.g. Berlin Heidelberg. New-York,1982 s 401 pp. 55-59.