

UDC 627.8:004.8

SCOPUS CODE 2105

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-244-254>

მდინარეების წყლის შემოდინების პროგნოზირება ხელოვნური ინტელექტის საშუალებით

გურამი მირინაშვილი ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75
E-mail: guram.mirinashvili@gse.com.ge

რეცენზენტები:

ი. გორდიაშვილი, სტუ-ის ენერგეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: gordiashviliirakli02@gtu.ge

თ. ჯიქია, სტუ-ის ენერგეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: tamar.jikia@gse.com.ge

ანოტაცია. ბოლო პერიოდში ხელოვნური ინტელექტის როლი მკვეთრად გაიზარდა ადამიანების საქმიანობის სხვადასხვა სფეროში. განსაკუთრებით აქტიურად ხდება მისი ჩართვა მანქანურ საქმიანობებში, სადაც, სტატისტიკური მონაცემების ანალიზის საშუალებით, შესაძლებელია მომავლის განსაზღვრა. ერთ-ერთი ასეთი მიმართულება მდინარეების შემოდინების პროგნოზირებაა, სადაც სტატისტიკის ანალიზი პირდაპირ კავშირშია მომავლის სწორად განსაზღვრაში.

ხელოვნური ინტელექტის დანერგვას ძალიან დიდი სარგებლის მოტანა შეუძლია წყლის რესურსებისათვის. აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ უმეტეს პროგრამებში ხელოვნური ინტელექტის შეცდომე-

ბი ანუ მისი შედეგების არასწორი ინტერპრეტაცია კატასტროფულ შედეგებს არ იწვევს. სანამ ისინი აკმაყოფილებენ მათზე დაკისრებულ უმეტეს მოთხოვნებს, ზოგიერთი წარუმატებლობა საზიანო არ არის. წყლის რესურსების საკითხი, როგორც წესი, უფრო მგრძნობიარეა, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც საქმე წყალდიდობას და გვალვას ეხება. ნაშრომში აღწერილია წინა გამოცდილება ხელოვნური ინტელექტის წყლის რესურსებზე გამოყენების შესახებ, ხაზს უსვამს მათ უპირატესობებს, ზღვრებს და საფრთხეებს.

საკვანძო სიტყვები: მდ. ენგური; მდინარის შემოდინების პროგნოზირება; ტეტისი; ხელოვნური ინტელექტი.

შესავალი

21-ე საუკუნეში არის იშვიათი ფიზიკური მოვლენა, რომლის განმარტება, გადმოცემა ფორმულირებით ან ფორმულირებათა ერთობლიობით ვერ ხდება. სწორედ ამ იშვიათ მოვლენათა ჯგუფს მიეკუთვნება მდინარეების შემოდიწების პროგნოზირება, რადგან მდინარის შემოდიწებაზე არათუ ერთი ფიზიკური მოვლენა, არამედ, უმეტეს შემთხვევაში, მოვლენათა კასკადი მოქმედებს. აღნიშნული ფაქტორებია: აორთქლება, ჰაერის მასების მოძრაობა, ნალექების მოვლის ინტენსიურობა, მზის რადიაცია, თოვლის მოცულობა, ყინულის სისქე, მუდმივი და დროებითი მყინვარები, მიწისქვეშა წყლების განაწილება, ზედაპირის ტოპოლოგია, ნიადაგის ტენიანობა, ნისლიანობა, ზღვის დინებები და ა.შ. აღნიშნული კვლევა ჩატარდა მდინარე ენგურის აუზზე, სადაც საქართველოს ჰიდროენერგეტიკის როგორც არსებული, ისე პოტენციური რესურსის 50% მოდის. კვლევის მიმდინარეობის დროს შეიქმნა მდინარის შემოდიწების პროგნოზირების პროგრამა „Tethys“, რომელიც ხელოვნური ინტელექტის ბაზაზე სტატისტიკური მონაცემების დამუშავებასა და პროგნოზირებას ახდენს.

სამუშაოს დასკვნები ფართოდ გამოიყენება სხვა სფეროებში და გზას უხსნის წყლის რესურსების უფრო იაფ, საიმედო და მარტივ მართვას.

ძირითადი ნაწილი

ჰიდროლოგიური პროგნოზირების სისტემებს აქვს მნიშვნელოვანი მონაცემების მოთხოვნები და ეყრდნობა თითქმის რეალურ დროში ინფორმაციის მიმოსვლას. დიდი წყალშემკრები აუზის შემთხვევაში ასევე საინტერესო შეიძლება იყოს პროგნო-

ზებში თანამგზავრებიდან და/ან მეტეოროლოგიური რადარის სისტემებიდან მიღებული სივრცითი ინფორმაცია. მეთოდოლოგიური თვალსაზრისით, პროგნოზირების სისტემების უმეტესობა ეყრდნობა „ჯგუფური პროგნოზირების“ კონცეფციას, რომელიც მოკლედ შემდეგნაირად მოქმედებს:

ა) თითქმის რეალურ დროში გროვდება ნიადაგის მონაცემები;

ბ) სინქრონიზებულია მეტეოროლოგიური პროგნოზების ჯგუფურობა;

გ) ჰიდროლოგიური მოდელი განახლებულია უახლესი, თითქმის რეალურ დროში ნიადაგის მონაცემებით და მუშაობს მეტეოროლოგიური პროგნოზების ჯგუფის თითოეული წევრისთვის. ამ ფაზაში შეიძლება იყოს დამატებითი ქვესაფეხური, მაგალითად:

- ჰიდროლოგიური მოდელის შიგა მდგომარეობა (მაგ., ნიადაგის ტენიანობა) შეიძლება ხელახლა დაკალიბრდეს, რათა კარგად განახორციელოს უახლესი დაკვირვებული პირობები;

- ჰიდროლოგიური მოდელის საწყისი პირობები შეიძლება დაირღვეს, რის შედეგადაც მეტეოროლოგიური პროგნოზის ჯგუფის თითოეული წევრისთვის რამდენიმე დამატებითი გადაანგარიშება (დაკალირება) იქნება აუცილებელი. ამ ქმედების მიზანია ჰიდროლოგიურმა პროგნოზებმა უკეთ წარმოაჩინოს პროგნოზირებადი ცვალებადობა;

დ) ყველა ჰიდროლოგიური მოდელის შედეგები შეჯამებულია და პროგნოზირებადი ცვალებადობა შეფასებული. ამის განხორციელების რამდენიმე გზა არსებობს, მაგალითად:

- თითოეული მოდელის გაშვება შეიძლება ჩაითვალოს თანაბრად სავარაუდო;

• ჯგუფზე უფრო დახვეწილი ცვალებადობის შემდგომი პროცესორების გამოყენებით;

ე) გამოქვეყნებულია ჰიდროლოგიური პროგნოზები.

ეს შრომატევადი პროცესი შეიძლება განმეორდეს დღეში რამდენჯერმე, როგორც წესი, როდესაც ახალი დაკვირვებები გახდება ხელმისაწვდომი. ყველაფრის გათვალისწინებით, ჰიდროლოგიური პროგნოზირების სისტემების დაყენება და შენარჩუნება შეიძლება ძვირი იყოს, რაც მნიშვნელოვან გამოთვლით რესურსებს და კვალიფიციურ ოპერატორებს მოითხოვს. ხელოვნური ინტელექტის მოწყობილობების გამოყენება მომხიბვლელია, რადგან ნაკლებად მოითხოვს პროგრამული კონფიგურაციისა და მოწყობილობის განახლება-გადაკეთებას. მართლაც, ამ ინსტრუმენტებს აქვს ზემოჩამოთვლილი გ, დ და ე საფეხურების გაერთიანების პოტენციალი. ხელოვნური ინტელექტის მოდელს შეუძლია მოგვაწოდოს მზა ჰიდროლოგიური პროგნოზები პირდაპირ დაკვირვებული და მეტეოროლოგიური პროგნოზის მონაცემებიდან, თავიდან აიცილოს ძირითადი სირთულეები, რომლებიც დაკავშირებულია ტიპური ჯგუფური პროგნოზირების მიდგომასთან. ასევე ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება დაკავშირებულია მნიშვნელოვან ნაკლოვანებებთან, კერძოდ:

• შედარებით გრძელ ისტორიულ მონაცემთა ბაზის საჭიროება, რომელიც აუცილებელია ხელოვნური ინტელექტის მოდელების მორგებისათვის. ამის მიღება შეიძლება ძალიან რთული იყოს, განსაკუთრებით მეტეოროლოგიური პროგნოზები, რომლებიც საწყის მონაცემებად გამოიყენება.

• ხელოვნური ინტელექტის მოდელების შექმნა, რომელიც ხშირად ჩამოუვარდება კარგად მორგებული ან განაწილებული ჰიდროლოგიური მოდელებით შექმნილ პროგრამებს.

• ხელოვნური ინტელექტის ზოგიერთი მოდელი სტატიკურია, რაც ნიშნავს, რომ ისინი წარსულში ახდენენ დაკვირვების გადმოტანას, მაგრამ არ შეიცავს გრძელვადიან ტენდენციებს (მაგ., კლიმატის ცვლილებით გამოწვეული).

• ხელოვნური ინტელექტის მოდელების ქცევა ექსტრემალური მოვლენების დროს ძნელი სავარაუდოა.

ზემოთ ჩამოთვლილი ნაკლოვანებებიდან ყველაზე პრობლემატურია ხელოვნური ინტელექტის მოდელების ქცევა ექსტრემალური მოვლენების დროს. მართლაც, ხელოვნური ინტელექტის მოდელები ეფუძნება მონაცემებს და განსაზღვრებით ექსტრემალური მოვლენები იშვიათია და წარმოდგენილია ისტორიულ ჩანაწერებში თუ საერთოდ არსებობს. გაანალიზეს მრავალშრიანი პერცეპტრონის (ხელოვნური ნერვული ქსელის ტიპი), დამხმარე ვექტორული რეგრესიისა და უმცირესი კვადრატების მხარდაჭერის ვექტორული რეგრესიის მოდელების ქცევა ექსტრემალური მოვლენების პროგნოზირების ამოცანაში, განმეორების პერიოდებით 10000 წლამდე. აჩვენეს, რომ ეს მოდელები ცუდად იქცევა ტრენინგისთვის გამოყენებული დიპაზონების მიღმა წარმოდგენილი მონაცემებით. ისინი ასკვნიან, რომ ხელოვნური ინტელექტის მოდელების გამოყენებისას მნიშვნელოვანია, რომ მათი ქცევა კარგად იყოს გაგებული. გარდა ამისა, ეს ეხმარება თუ მოდელები გაწვრთნილია გაურკვე-

ვევლობის პროგნოზირებისთვის (ალბათური რეჟიმი), მხოლოდ „საუკეთესო გამოცნობის“ პროგნოზის (დეტერმინისტული რეჟიმი) წარმოების ნაცვლად. თუ გავითვალისწინებთ და შევარბილებთ პოტენციურ ნაკლოვანებებს, ხელოვნური ინტელექტის მოდელები განსაკუთრებით საინტერესო შეიძლება იყოს, როდესაც:

- არსებული კონცეპტუალური ან განაწილებული ჰიდროლოგიური მოდელები არ მუშაობს დამაკმაყოფილებლად (მაგ., კარსტული რეგიონების შემთხვევაში);

- განვითარებისას უნდა იყოს სწრაფი;

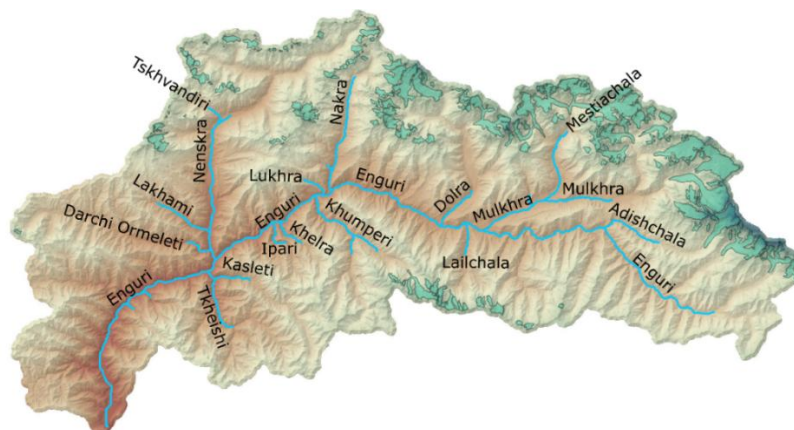
- სისტემა უნდა იყოს საკმარისად ადაპტირებული, რათა ინფორმაცია შეიტანოს სწრაფად მზარდი ნიადაგის ზედაპირის მონიტორინგის ქსელიდან;

- სისტემამ შეიძლება გაიაროს ეტაპობრივი გაფართოება ახალ სფეროებში.

ამ ნამუშევარში გამოყენებულია ხელოვნური ინტელექტის ორი მოდელი, ორივე ალბათური. პარეტოს განუსაზღვრელობის მოდელი გამოიყენება რამდენიმე წლის განმავლობაში, როგორც Tethys პროგნოზირების სისტემის ნაწილი და შეუძლია პროგნოზირებადი გაურკვევლობის ხელახალი წარმოება. ბოლო წლებში ნახტომი მოხდა AI-ს შესაძლებლობებში.

მდ. ენგურის წყალშემკრები აუზის აღწერა და ჰიდროლოგიური ქცევა. მდ. ენგურის წყალშემკრები აუზი მდებარეობს ჩრდილო-დასავლეთ საქართველოში და კავკასიონის მთებიდან (უშგული) შავ ზღვამდე (ანაკლიაში) მოედინება სამხრეთ-დასავლეთით. ნაშრომი ფოკუსირებულია ენგურის

კაშხლის ზემო დინების ენგურის წყალშემკრებ აუზზე (სურ. 1). ჯამური 4 060 კმ²-დან კაშხლის ზემოთ წყალშემკრები მოიცავს დაახლოებით 3 156 კმ² ფართობს. წყალშემკრების სიმაღლე დაახლოებით 500-დან 5000 მ-დეა. წყალშემკრები აუზის ფარგლებში მყინვარის საფარი (235 კმ²) შეესაბამება ზედაპირის 7,5%-ს (სურ. 1-ში მწვანედ დაჩრდილულია). ენგურის კაშხლის ზემოთ მდინარე ენგურის ძირითადი შენაკადებია ნენსკრა, ნაკრა, დოღრა მულხრა და ადიშქალა მარჯვენა სანაპიროზე და ლაილქალა, ხუმპერი, ხელრა, იფარი, კასლეთი და თხეიში მარცხენა სანაპიროზე. ამ შენაკადების უმეტესობა მოიცავს არსებულ ან დაგეგმილ ჰიდროელექტროსადგურებს. საშუალო ხარჯი დაახლოებით 150 მ³/წმ-ია, უფრო დიდი ჩამონადენი წარმოიქმნება ზაფხულში (თოვლისა და მყინვარების დომინირებული ჰიდროლოგიური რეჟიმის გამო). ნალექების საშუალო რაოდენობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება მდებარეობისა და სიმაღლის მიხედვით. მთლიანობაში, ERA5 Land-ის მონაცემთა ბაზის შეფასებით არის 1600 მმ/წელი, რაც მიწის ზემოთ აღირიცხება ხაიშსა (1283 მმ/წელი) და მესტიაში (919 მმ/წელი). რაც შეეხება ტემპერატურას, ERA5 Land იწვევს საშუალო შეფასებას 1.8°C, რაც უფრო დაბალია, ვიდრე ჩანაწერები ლახამიდან (8.7°C). რეგიონის მეტეოროლოგიური სადგურები, როგორც წესი, მდინარის ხეობებთან, დასახლებულ ადგილებთან ახლოსაა. შესაბამისად, მოსალოდნელია შეუსაბამო ფართობის შეფასებებსა და წერტილოვან გაზომვებს შორის.



სურ. 1. მდინარე ენგურის აუზი და ძირითადი
შენაკადები ენგურის კაშხლის ზედა ნაწილში

პროგნოზირების მოდელები. განზოგადებული პარეტოს განუსაზღვრელობის ალგორითმი, რომელსაც იყენებს Tethys-ი, არ ითვალისწინებს პროცესის სიმულაციას, სწავლობს ყველაფერს, რაც უნდა იცოდეს ისტორიული მონაცემებიდან. ამის გამო, ცვლადების დიდი მასივის პროგნოზირება შესაძლებელია, თუ არსებობს საკმარისი გრძელი ისტორიული სერია (სასურველია 10 წელი ან მეტი). მოქმედებს როგორც მრავალმიზნობრივი ოპტიმიზაციის ალგორითმი, რომელიც ავრცელებს რეგრესიის მოდელების ერთობლიობას (მათგან, რომლებიც ყოველთვის პროგნოზირებს დაკვირვებებს ქვემოთ, რომლებიც ყოველთვის პროგნოზირებს ზემოთ), ხოლო თითოეული მოდელის შეცდომას მინიმუმამდე ამცირებს. თითოეული ეს მოდელი არის $y = f(X, W)$ ტიპის დეტერმინისტული ფუნქცია, სადაც X რამდენიმე შეყვანის ცვლადია, რომლებიც გამოიყენება შესაყვანად, ხოლო W არის მოდელის პარამეტრების მატრიცა. ადეკვატური რეგრესიის მოდელის არჩევანი დამოკიდებულია პრობლემაზე. ამ შემთხვევაში აირჩიეს მარტივი მრავალშრიანი ხელოვნური ნერვული ქსელები.

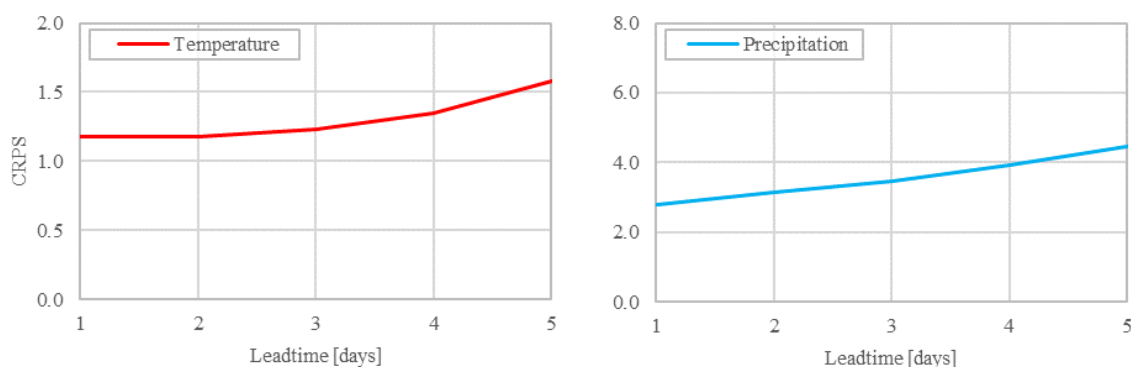
პროგნოზირების შესრულების შეფასება. CRPS (უწყვეტი შეფასებული ალბათობა) და სამართლიანი სტატისტიკური მეტრიკა გამოიყენება ალბათური პროგნოზების სიზუსტის შესაფასებლად, განსაკუთრებით ალბათობის უწყვეტი განაწილების პროგნოზირებისას. CRPS არის საშუალო აბსოლუტური შეცდომის ეკვივალენტური, როდესაც გამოიყენება ჯგუფის ერთ წევრზე, რაც განსაკუთრებით საინტერესოს ხდის ალბათური, შეჯამებული და დეტერმინისტული პროგნოზების შედარებას. CRPS რაოდენობრივად განსაზღვრავს განსხვავებას პროგნოზირებულ-კუმულაციური განაწილების ფუნქციასა და დაკვირვებულ ფუნქციას შორის, რაც უზრუნველყოფს პროგნოზის სანდოობის ყოვლისმომცველ შეფასებას, რომელიც აერთიანებს სანდოობას და გარჩევადობას. ქვედა უწყვეტი ალბათობის მნიშვნელობები მიუთითებს უკეთეს სიზუსტეს, ნულოვანი მნიშვნელობით მიუთითებს სრულ შესაბამისობას პროგნოზირებულ და დაკვირვებულ განაწილებებს შორის. უწყვეტი შეფასებული ალბათობა შეიძლება გამოითვალოს შემდეგნაირად:

$$CRPS = \frac{1}{T} \sum_t \int_{-\infty}^{\infty} [\hat{F}(x) - 1(x - Q_t)]^2 dx,$$

სადაც T არის რიცხვების პროგნოზირების საფეხურები; $\hat{F}(x)$ – პროგნოზირებული CDF; Q_t – დაკვირვებული გამონადენი t საფეხურზე; "1" – Heaviside ნაბიჯის ფუნქცია.

შედეგები და განხილვა. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ამ სამუშაოში გამოყენებული მეტეოროლოგიური პროგნოზები დამზადებულია NCEP-ის გლობალური პროგნოზირების სისტემის მიერ. მდინარე ენგურის აუზში, მეტეოროლოგიური სადგურების მწირი ქსელით, GFS-ის გამომავალი შედეგები (ჰაერის ტემპერატურა და ნალექი) შედარებულია ERA5-Land-ის მონაცემებთან. მიუხედავად იმისა, რომ ERA5-Land მონაცემები არ შეიძლება ჩაითვა-

ლოს „ნიადაგის“ ჰუმანიტ შეფასებად, მიზანშეწონილია ვივარაუდოთ, რომ ის ადგილობრივ მეტეოროლოგიას უკეთესად ასახავს, ვიდრე თითქმის რეალურ დროში GFS, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც პროგნოზირების დრო იზრდება. მე-2 სურათი მნიშვნელოვან ინფორმაციას გვიჩვენებს GFS-სა და ERA5-Land-ს შორის საბაზისო სხვაობასთან დაკავშირებით ენგურის აუზზე, ასევე ტემპერატურის ხარისხის დეგრადაციისა და ნალექების პროგნოზის მზარდი დროით. GFS-ის ონლაინგვერდი ტემპერატურას, ხარისხს 3 დღემდე ინარჩუნებს, ნალექის პროგნოზის შესრულება კი პირველივე დღის შემდეგ კლებას იწყებს.



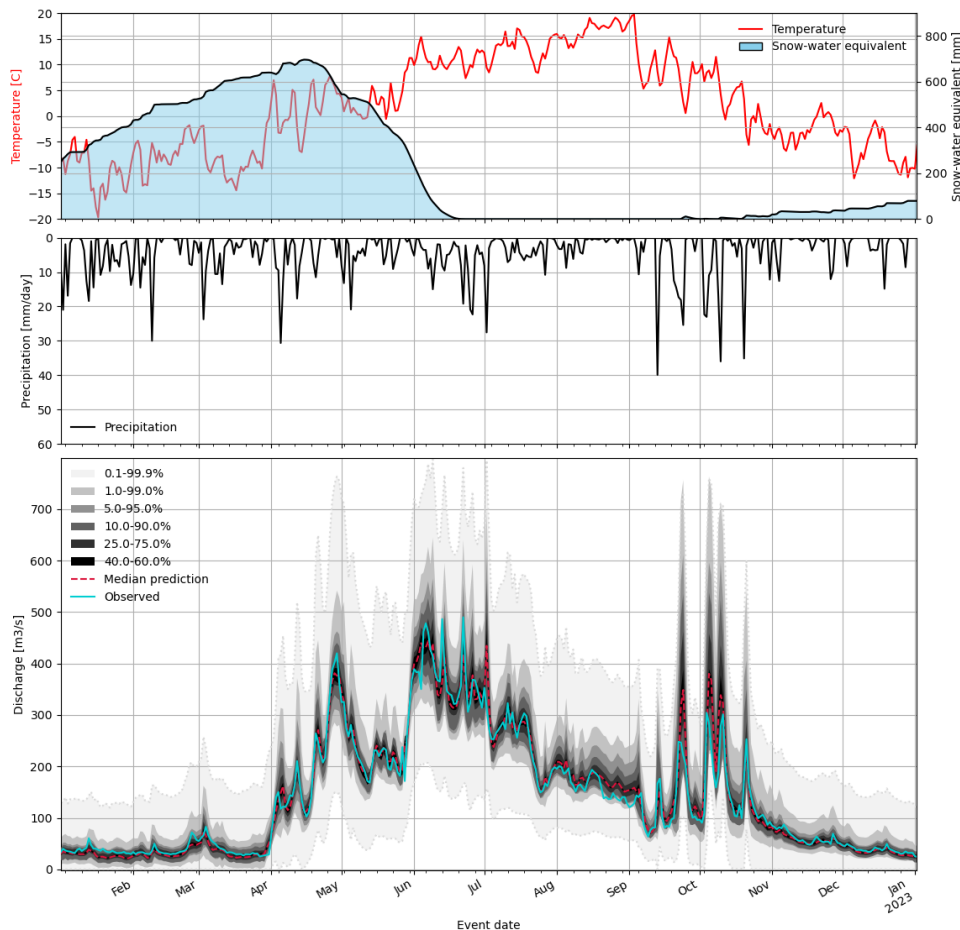
სურ. 2. GFS-ის პროგნოზებისა და ERA5-Land-ის ხელახალი ანალიზის მონაცემების შედარება ERB-ზე

ჰიდროლოგიური პროგნოზების მუშაობა. ყველა მოდელი მომზადდა მონაცემებით 2000 წლის იანვრიდან 2018 წლის სექტემბრამდე და შემოწმდა 2018 წლის ოქტომბრიდან 2023 წლის სექტემბრამდე. პირველ რიგში, ნაჩვენებია ვალიდაცია მთელი წლის განმავლობაში. როგორც მე-3 სურათზე ჩანს, ხელოვნური ინტელექტის თანამედროვე მოდელებს შეუძლია ძალიან კარგად აღბეჭდოს

ჰიდროლოგიური პროცესები. ბუნებრივია, პროგნოზები არ არის სრულყოფილი. ეს გამოწვეულია ჰიდროლოგიური პროცესების თანდაყოლილი გაურკვევლობით, იმ ფაქტით, რომ მეტეოროლოგიური ცვლადები იქნა მიღებული, ეს ხელს უშლის განსხვავებას მდინარეების წყალშემკრებებსა და სიმაღლეებს შორის, ზედაპირის დაკვირვების ნაცვლად, მეტეოროლოგიურ მონაცემებზე დაყრდნო-

ბით და, ცხადია, თავად AI მოდელების ნაკლოვანებებით. რთულია იმის თქმა თუ როგორ ხდება ნალექის (ოქტომბრიდან ნოემბრის ჩათვლით) და ტემპერატურის უეცარი მატების (მაისის ბოლოს)

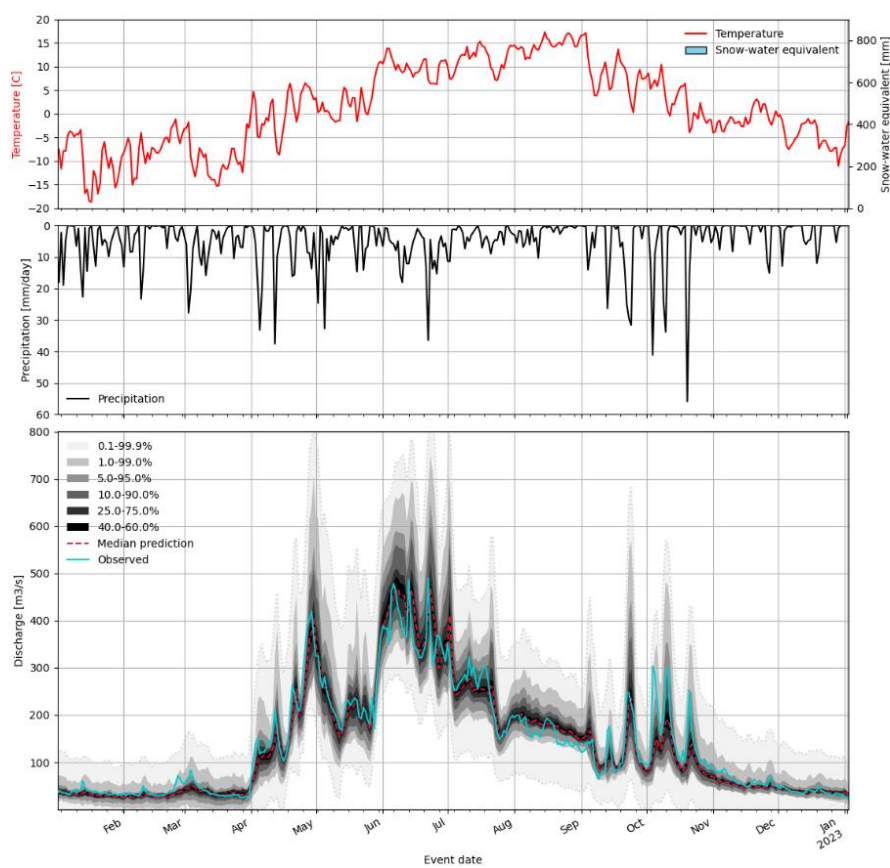
გავლენა, დაკალიბრების ანგარიშების გარეშე. გარდა ამისა, შეიძლება აღინიშნოს, როგორ შეესაბამება გაურკვევლობის ზოლები სათანადო დაკვირვებებს.



სურ. 3. 1 დღით ადრე პროგნოზები "ცნობილი" მეტეოროლოგიის გამოყენებით ERA5-Land

მე-3 სურათი ასახავს ხელახალი ანალიზის მონაცემების გამოყენებას, როგორც შეყვანის მოდელებს, ხოლო მე-4 სურათი – ნამდვილ შესრულებას, რომლის მიღწევაც შესაძლებელია პროგნოზირების სისტემით. პროგნოზირების პირობებში, მოდელები გაწვრთნილი იყო GFS მეტეოროლოგიური პროგნოზებით (რომლის ხარისხი ქვეითდება, როდესაც

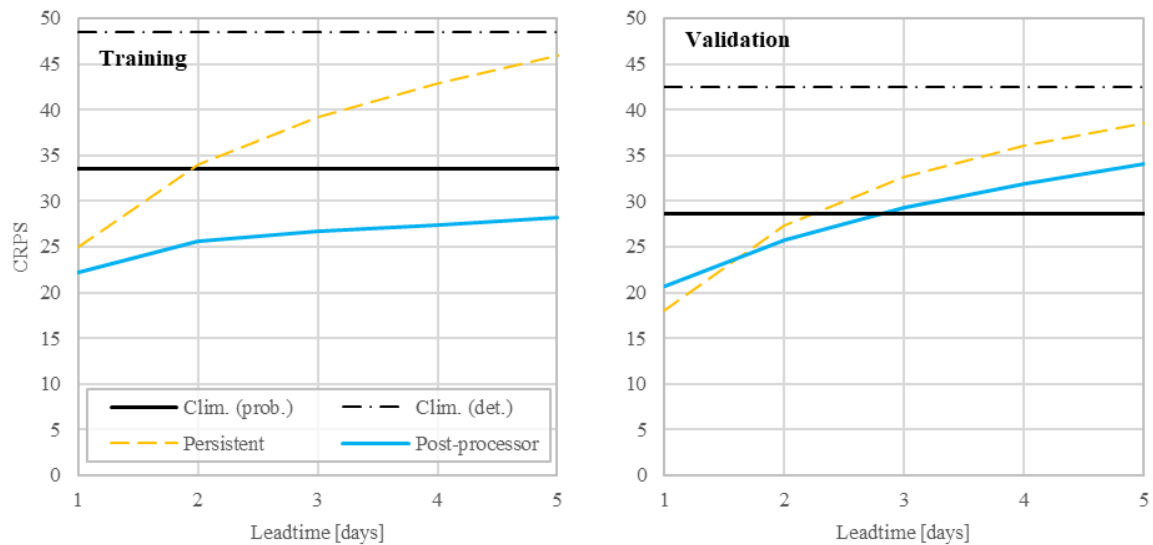
დრო იზრდება, სურ. 2). გარდა ამისა, არ იყო გამოყენებული თოვლის დაგროვების შესახებ ინფორმაცია (GFS აწარმოებს ინფორმაციას თოვლის წყლის ეკვივალენტის შესახებ, მაგრამ ძალიან განსხვავდება ERA5-Land-ისგან და, შესაბამისად, არ იყო გამოყენებული).



სურ. 4. 1 დღით ადრე TFT პროგნოზები GFS მეტეოროლოგიური პროგნოზების გამოყენებით (თოვლ-წყლის ეკვივალენტის გამოკლებით)

CRPS მეტრიკა გამოიყენებოდა დაგეგმვისა და პროგნოზების ხარისხის შესაფასებლად, სხვადასხვა დროისთვის. მე-5 სურ-ზე ვცდილობთ შევაფასოთ ალბათური პროგნოზების გამოყენების მნიშვნელობა, დეტერმინისტულის ნაცვლად. მასში გაურკვევლობის შემდგომი პროცესორის შედეგები შედარებულია დეტერმინისტულ კლიმატოლოგიასთან (მედიანური ისტორიული განმუხტვა წლის დღის მიხედვით), ალბათურ კლიმატოლოგიასთან (წინასერია პლუს გაურკვევლობა, გამოითვლება GPU-ით), მდგრადობასა (ბოლო დაკვირვებული მნიშვნელობა ვარაუდობს, რომ გამძლეა) და GPU-ს შედეგებთან, გაურკვევლობის წინასწარი კორექტირება.

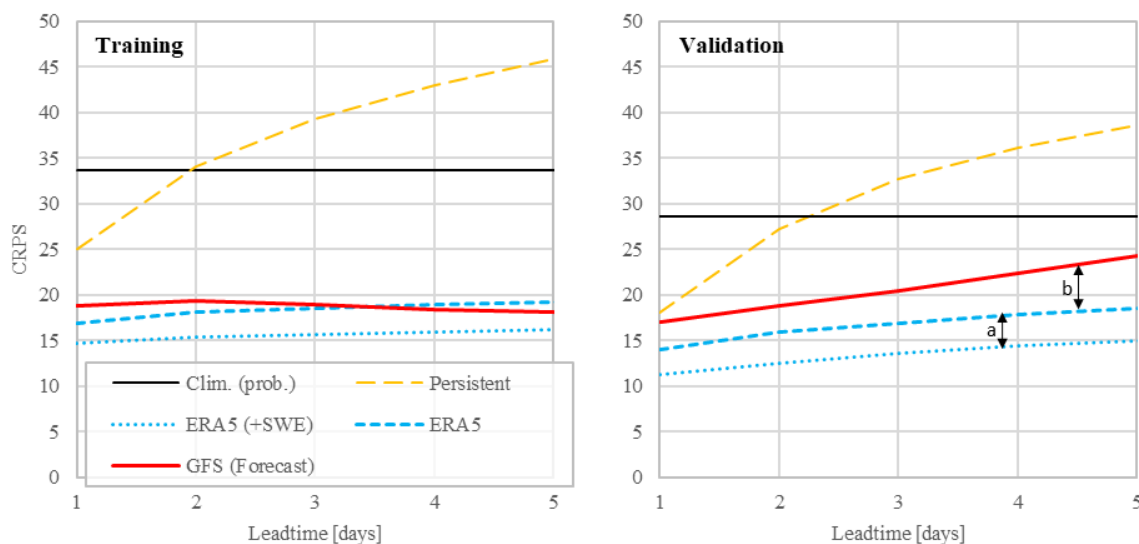
გახსოვდეთ, რომ CRPS შეცდომის მეტრიკას შემოქმედებდა დეტერმინისტული და ალბათური პროგნოზები, ნახავთ, რომ მხოლოდ გაურკვევლობის დამატებით შეგიძლიათ CRPS-ის 1/3 „ამოიღოთ“ კლიმატოლოგიიდან, 2 დღის და მეტი პროგნოზისთვის, ეს ტოლია ან უკეთესია, ვიდრე ვარაუდობთ მდგრადობას. გაურკვევლობის შემდგომი პროცესორის გამოყენების შედეგები ავტომატურად დაკავშირებულია, პროგნოზისთვის დამამუშავებელი ჩანდა, მაგრამ დადასტურდა, რომ არასაკმარისი იყო შემოწმების პერიოდისთვის. ეს იყო გადაჭარბებული მორგების სავარაუდო შედეგი.



სურ. 5. დეტერმინისტული და ალბათური მიდგომების მნიშვნელობა

დასასრულ, მე-6 სურათი ასახავს შედეგებს პროგნოზირებაში ერთნაირი და მონაცემთა დაშლის შედეგად. „შემოწმების“ ფოკუსირებით, ყველაზე მნიშვნელოვანია, ვხედავთ, რომ AI პროგნოზები (სრული წითელი მრუდი) აშკარად აღემატება კლიმატოლოგიასა და მდგრადობას, რაც ადასტურებს პროგნოზირების მნიშვნელობას. უფრო

მეტიც, შეიძლება ERA5-Land მონაცემები მართლაც აღემატება GFS-ს (ანოტაცია „b“, რომელიც აჩვენებს განსხვავებას CRPS-ში) პროგნოზირების მიზნით. ანოტაცია „a“ აღნიშნავს შესრულების ზრდას, რაც მიიღწევა მოდელისთვის თოვლის შესახებ ინფორმაციის მიწოდებით.



სურ. 6. ევექტურობის პროგნოზირებაში მონაცემთა დაშლა

დასკვნა

სამუშაო მიზნად ისახავს AI-ის პოტენციალის შესწავლას მდინარის ჩამონადენის პროგნოზირებისთვის, რადგან ისინი შეიძლება იყოს მართებული ალტერნატივა ტრადიციული ჰიდროლოგიური პროგნოზირების მიდგომებისთვის, რომლებიც უფრო ადვილია დასაყენებლად და იაფია მუშაობაში. შედეგები აჩვენებს, რომ AI მოდელები მართლაც პერსპექტიულია. მიუხედავად ამისა, მათი შემდგომი გაუმჯობესება შესაძლებელია რამდენიმე ღონისძიების გატარებით. პირველი არის უკეთესი ხარისხის მეტეოროლოგიური მონაცემების შეყვანა, განსაკუთრებით თოვლში არსებული ინფორმაციის შესახებ. ამ დროს, ჰიდროლოგიური პროგნოზების შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით, შესაძლებელია ალტერნატიული მეტეოროლოგიური პროგნოზების

შესწავლა (მაგ., ECMWF-დან). პარალელურად დაიწყო ენგურის ჰიდრომეტეოროლოგიური ქსელის გაძლიერება, რომელიც მალე უნდა შესრულდეს და რომლის ახლად შეგროვებული მონაცემების შესწავლა გვინდა. AI მოდელის პარამეტრების შემდგომი ტესტირება ასევე შეიძლება ჩატარდეს, რაც პოტენციურად გარკვეულ გაუმჯობესებას გამოიწვევს. ზემოთ წარმოდგენილი შედეგებიდან და ენგურის ჰიდროლოგიის გამოცდილებიდან გამომდინარე, ხელოვნური ინტელექტის ინსტრუმენტებისა და სავარაუდო მიდგომების გამოყენებას აზრი აქვს ისეთ შემთხვევებში, როგორიცაა მდინარე ენგურის აუზი, რომელიც ეხმარება გადაწყვეტილების მიმღებებს და ხელს უწყობს წყლის რესურსების უკეთ მართვას.

ლიტერატურა

1. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., & others. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
2. U.S. National Centers for Environmental Prediction (NCEP). (n.d.). *Global forecasting system documentation*. https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs/documentation.php (Accessed October 1, 2023)
3. Matos, J. P., Hassan, M. A., Lu, X. X., & Franca, M. J. (2018). Probabilistic prediction and forecast of daily suspended sediment concentration on the Upper Yangtze River. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(8), 1982–2003. <https://doi.org/10.1029/2017JF004240>

UDC 627.8:004.8

SCOPUS CODE 2105

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-244-254>

Forecasting of River Inflow Using Artificial Intelligence

Gurami Mirinashvili

Department of Electrical Power Engineering and Electronics, Technical University,
Georgia, 0160, Tbilisi, 75, M. Kostava str.

E-mail: guram.mirinashvili@gse.com.ge

Reviewers:

I. Gordiashvili, Associate Professor, Faculty of Power Engineering, GTU

E-mail: gordiashviliirakli02@gtu.ge

T. Jikia, Associate Professor, Faculty of Power Engineering, GTU

E-mail: tamar.jikia@gse.com.ge

Abstract. Recently, the role of artificial intelligence has increased dramatically in various areas of human activity. It is especially actively involved in machine activities, where statistical data analysis can be used to predict the future. One such area is river flow forecasting, where statistical analysis is directly related to the correct prediction of the future.

The introduction of artificial intelligence can bring great benefits to water resources. It is worth noting the fact that in most programs, errors in artificial intelligence, that is, incorrect interpretation of its results, do not lead to catastrophic consequences. As long as they meet most of the requirements imposed on them, some failures are not harmful. The issue of water resources is usually more sensitive, especially when it comes to floods and droughts. The paper describes previous experience in the application of artificial intelligence to water resources, highlighting their advantages, limitations and threats.

Keywords: Artificial intelligence; Enguri River; River flow prediction; Tethys.

განხილვის თარიღი 15.04.2025

შემოსვლის თარიღი 15.09.2025

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2025