გამოყენებული ლიტერატურა

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Cambridge University Press.
2. International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA.
3. International Energy Agency. (2024). *Hydrogen and energy storage*. IEA.
4. Ministry of Economy, Trade and Industry. (2023). *Basic hydrogen strategy*. Government of Japan.
5. Ministry of Economy, Trade and Industry. (2024). *Strategic energy plan of Japan*. Government of Japan.
6. Ministry of the Environment, Japan. (2025). *Japan’s national greenhouse gas emissions and removals*. Government of Japan.
7. REN21. (2023). *Renewables global status report 2023*. REN21 Secretariat.

N. Kamkamidze, L. Gobejishvili

summary

This study presents the key outcomes of Japan’s energy transition within the framework of the JFNR (Japanese Framework for New Renewables) and highlights the significant role of renewable energy development in environmental protection and climate change mitigation. The analysis confirms that the structural expansion of renewable energy and the integration of technological innovations in Japan contribute substantially to the reduction of greenhouse gas emissions and to the enhancement of the resilience of the energy system. The findings indicate that the JFNR constitutes an effective and potentially replicable model for other technologically advanced yet resource-constrained countries.

ქარისმიერი ტალღების მოდელირების სისტემა შავი ზღვის საქართველოს სექტორისათვის

[1,2]დემური დემეტრაშვილი, [1]დიანა კვარაცხელია, [1]ვეფხია კუხალაშვილი
[1]ივანე ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი
[2]საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

აბსტრაქტი. *სტატიაში წარმოდგენილია SWAN ტალღურ მოდელზე დაფუძნებული ქარით აღძრული ზედაპირული ტალღების მოდელირების სისტემა შავი ზღვის საქართველოს სექტორისათვის. SWAN მოდელს საფუძვლად უდევს ტალღური ენერგიის ბალანსის სპექტრალური განტოლების ამოხსნა სასრულ-სხვაობითი მეთოდის გამოყენებით. მოდელში შემავალი მონაცემებია ქარის სიჩქარე და მიმართულება ზღვის დონის ზემოთ 10 მ სიმაღლეზე, ზღვის ფსკერის რელიეფი, ხოლო გამომავალი ინფორმაციაა ტალღის სიმაღლე და მიმართულება. გამოთვლები ხორციელდება სამ ეტაპად. პირველ ეტაპზე ტალღური მოდელის რეალიზაცია ხორციელდება მთლიანად ზღვის აუზისათვის. ამ ეტაპზე მიღებული გამოთვლის შედეგები გამოიყენება სასაზღვრო პირობის სახით თხევად საზღვარზე მეორე ეტაპისათვის - შავი ზღვის განაპირა აღმოსავლეთ რეგიონისათვის, რომელიც მოიცავს საქართველოს სექტორს და მიმდებარე აკვატორიას. ასევე, მეორე ეტაპზე მიღებული შედეგების გამოყენება ხდება მესამე ეტაპისთვის, რომელიც მოიცავს ბათუმი-ფოთი-ანაკლიის აკვატორიას. ილუსტრაციის მიზნით სტატიაში მოყვანილია ზოგიერთი გამოთვლის შედეგი.*

საკვანძო სიტყვები. *ტალღის სიმაღლე, ქარის ზემოქმედება, სპექტრალური განტოლება, ტალღური რეჟიმი.*

ზღვებსა და ოკეანეებში განვითარებულ ჰიდროდინამიკურ პროცესებს შორის ერთ-

ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი და საინტერესო ფენომენია ქარისმიერი ზედაპირული გრავიტაციული ტალღები, რომელთა მოდელირება და პროგნოზი ფიზიკური ოკეანოგრაფიის ერთ-ერთი აქტუალური ამოცანაა. ტალღური პარამეტრების პროგნოზი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სანაპირო/შელფური წყლებისათვის, რომლებიც დიდ ანთროპოგენურ დატვირთვას განიცდის. ეს შეეხება ბათუმი-ფოთი-ანაკლიის აკვატორიასაც, სადაც მდებარეობს ბათუმისა და ფოთის საზღვაო პორტები და მნიშვნელოვანი რეკრეაციული ზონები. ზღვის ღელვიანობის პროგნოზი ძალზედ მნიშვნელოვანია უსაფრთხო ნავიგაციისა და საპორტო ოპერაციების ოპტიმალურად წარმართვისათვის. გარდა ამისა, ტალღური რეჟიმი მნიშვნელოვანწილად განაპირობებს მდინარეთა მყარი ნატანის გადანაწილებას და არსებითი წვლილი შეაქვს პლაჟწარმომქმნელ და ნაპირების ეროზიულ პროცესებში. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ მიმდინარე კლიმატური ცვალებადობის ფონზე დაიკვირვება შტორმული სიტუაციების მნიშვნელოვანი ზრდა მსოფლიო ოკეანის ცალკეულ რეგიონებში.

შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის საგრანტო პროექტის ფარგლებში (პროექტის ნომერი FR-22-365) ივანე ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მიხეილ ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ზღვისა და ატმოსფეროს დინამიკის მოდელირების სექტორში 2025 წელს განხორციელდა სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები მსოფლიოში ცნობილი **SWAN (Simulating Waves Nearshore)** ტალღური მოდელის დანერგვის მიზნით შავი ზღვის საქართველოს სექტორში. **SWAN** კარგად ცნობილი მესამე თაობის ტალღური მოდელია, რომელიც შემუშავებულია გასული საუკუნის 90-იან წლებში ჰოლანდიაში (**Delft University of Technology, Netherlands).** იგი ფართოდ გამოიყენება მსოფლიო ოკეანის ცალკეული რეგიონებისათვის - შავი ზღვის, ხმელთაშუა ზღვის, ბალტიის ზღვის, მექსიკის ყურისათვის და სხვ [1-4].

SWAN დაფუძნებულია ტალღური ენერგიის ბალანსის სპექტრალური განტოლების ამოხსნაზე სასრულ-სხვაობითი მეთოდის გამოყენებით. დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში განტოლებას შემდეგი სახე აქვს

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(c_x N\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_y N\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(c_\sigma N\right) + \frac{\partial}{\partial \theta}\left(c_\theta N\right) = S / \sigma ,$$

სადაც $S = S_{in} + S_{nl} + S_{diss} + S_{fd}$, $N = E/\sigma$.

აქ გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები: E არის ტალღების ენერგეტიკული სპექტრი, N - ტალღური მოქმედების სიმკვრივე (the action density spectrum), σ, θ - სიხშირული და კუთხური კოორდინატები, c_x, c_y, c_σ, c_θ - -- N -ის გადატანის სიჩქარეები სივრცითი და სიხშირულ- კუთხური კოორდინატების გასწვრივ.

განტოლების მარჯვენა მხარე წარმოადგენს წყაროს ფუნქციას, რომელიც ცალკეული შესაკრებებისაგან შედგება: პირველი წევრი S_{in} აღწერს ტალღების გენერაციას ქარის მიერ, მეორე წევრი S_{nl} - არაწრფივ სპექტრალურ ურთიერთქმედებას ჰარმონიკებს შორის. მესამე წევ-

რი S_{diss} - ტალღური ენერგიის დისიპაციას ტალღის თხემის ჩამოშლის გამო, მეოთხე წევრი S_{fd} - ფსკერთან ხაუნის გამო [5].

SWAN მოდელში შემავალი მონაცემებია ზღვის ზედაპრის ზემოთ 10 მ სიმაღლეზე ქარის სიჩქარე და მიმართულება და ზღვის ფსკერის რელიეფი. მოდელის რეალიზაციის შედეგად გამოითვლება მნიშვნელოვანი ტალღის სიმაღლე (მტს) და მიმართულება. საჭიროა გარკვეული განმარტება გავაკეთოთ მტს ტერმინთან დაკავშირებით, რომელიც ოკეანოგრაფიაში პირველად შემოტანილი იყო 1947 წელს ცნობილი ოკეანოგრაფების სვერდრუპისა (Sverdrup H. U.) და მანკის (Munk W. H) მიერ [6]. ინგლისურენოვან ლიტერატურაში გამოიყენება ტერმინი **Significant wave height (SWH),** ხოლო რუსულენოვან ლიტერატურაში - **Значительная высота волн**. **SWH** არის ტალღურ სპექტრში ყველაზე დიდი სიმაღლის ტალღების 1/3-ის საშუალო სიმაღლე მოცემულ დროით პერიოდში და მოცემულ არეალში. **SWH** დაახლოებით შეესაბამება ადამიანის მიერ ვიზუალურად აღქმულ ტალღების სიმაღლეს. მათემატიკურად **SWH** ასე შეიძლება გამოვსახოთ

$$H_{1/3} = \frac{1}{1/3N} \sum_{m=1}^{1/SN} H_m ,$$

სადაც H_m არის ცალკეული ტალღის სიმაღლე.

SWAN მოდელის რეალიზაცია შავი ზღვისათვის განხორციელდა საქართველოს სანაპირო ზონაზე ფოკუსირებით სფერულ კოორდინატთა სისტემაში MATLAB სისტემის გამოყენებით. მოდელის რეალიზაცია ხორციელდება 3 გამოთვლით დონეზე, ანუ 3 ეტაპად. პირველ ეტაპზე ტალღური პარამეტრები გამოითვლება მთლიანად შავი და აზოვის ზღვების აუზისათვის. მეორე ეტაპზე მოდელის რეალიზაცია ხორციელდება რეგიონულ არეში, რომელიც მოიცავს შავი ზღვის საქართველოს სექტორს და მიმდებარე აკვატორიას. ამასთანავე, პირველ დონეზე გამოთვლილი ტალღური პარამეტრები გამოიყენება რეგიონული არის თხევად საზღვარზე, როგორც სასაზღვრო პირობები. საბოლოო მესამე ეტაპზე ტალღური პარამეტრები განისაზღვრება ბათუმი-ფოთი-ანაკლიას აკვატორიაში. ამასთანავე, სასაზღვრო პირობებად თხევად საზღვარზე გამოიყენება მეორე ეტაპზე მიღებული შედეგები.

SWAN მოდელის რეალიზაცია სხვადასხვა დონეზე ხდება სხვადასხვა სივრცითი გარჩევისუნარიანობით და სათვლელი ბადის პარამეტრებით. პირველ დონეზე სივრცითი გარჩევისუნარიანობა არის 0.08^0 x 0.08^0, ხოლო ბადის კვანძების რაოდენობა - 176 x 76. მეორე დონეზე გარჩევისუნარიანობაა 0.01^0 x 0.02^0 , ხოლო კვანძების რაოდენობა - 245 x152. მესამე დონეზე გარჩევისუნარიანობა - 0.002^0 x 0.001^0 , ხოლო კვანძების რაოდენობა - 408 x 476.

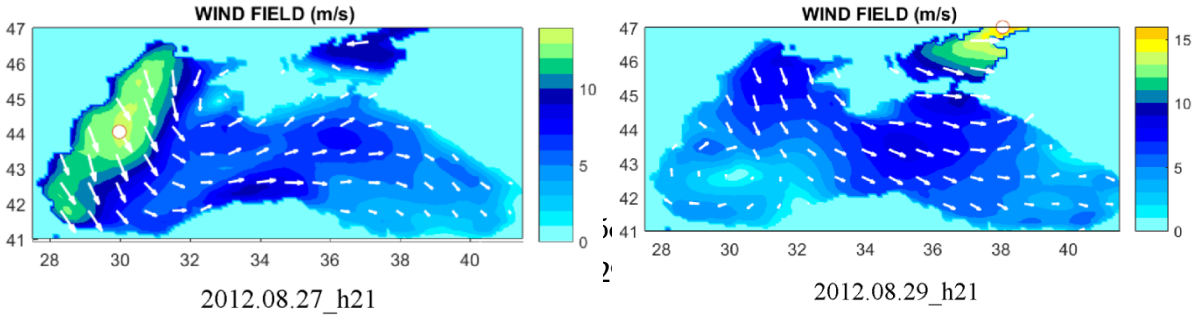
გამოთვლებისას გამოიყენებოდა ქარის ველის რეანალიზის შედეგები COPERNICUS სერვისიდან
https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download

მოდელში გამოიყენებოდა ქარი ზღვის დონიდან 10 მ სიმაღლეზე, სივრცითი გარჩევისუნარიანობით 10 კმ ყოველი 3 საათის შემდეგ მთელი პროგნოზული დროის განმავლობაში.

SWAN მოდელით გამოთვლილი ტალღების მოდელირების შედეგები შევადარეთ ცნობილი ტალღური მოდელის **WavewatchIIIv.3.14** (http://193.7.160.230/web/esimo/black/wwf/wwf_black.php) შედეგებს მთლიანად შავი ზღვის აუზისათვის დაახლოებით 9 კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით. შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა, რომ რომ ორივე მოდელით გამოთვლილი ტალღური პარამეტრები მთლიანობაში კარგ თანხმობაშია ერთმანეთთან.

ილუსტრაციის მიზნით, წარმოდგენილ სტატიაში ნაჩვენებია გამოთვლითი ექსპერიმენტის შედეგები, როცა პროგნოზული ინტერვალი იყო 00 GMT, 27-29 აგვისტო, 2012. ნახ.1-ზე ნაჩვენებია ქარის ვექტორული ველი 27 და 29 აგვისტოს 21 საათისათვის (გრინვიჩის დრო).

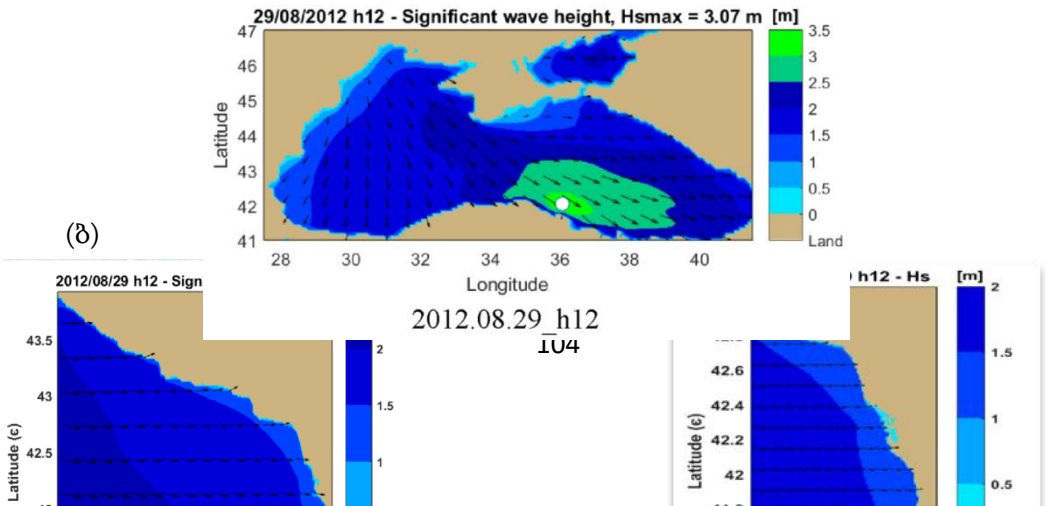
(ა) (ბ)



ქარის ანალიზმა აჩვენა, რომ ქარის მიმართულება ცვალებადია პროგნოზურ ინტერვალში. ზღვის აუზის აღმოსავლეთ ნაწილში დაიკვირვებოდა ქარის სიჩქარის მცირე მნიშვნელობები, მაგრამ 28 აგვისტოდან ქარის სიჩქარე გაძლიერდა აღმოსავლეთ ნაწილში საქართველოს სანაპირო ზონის ჩათვლით. ამავე დროს ქარის მიმართულებამ მიიღო უპირატესად აღმოსავლეთისაკენ მიმართულება.

ნახ.2-ზე ნაჩვენებია გამოთვლილი ტალღების სიმაღლე და მიმართულება 2012 წლის 29 აგვისტოს 12 საათისათვის (გრინვიჩის დრო) მთლიანად შავ ზღვაში, აღმოსავლეთ რეგიონულ არეში და ბათუმი-ფოთის აკვატორიაში. გამოთვლების ანალიზმა აჩვენა, რომ საქართველოს სანაპირო ზონაში 27 და 28 აგვისტოს ტალღის სიმაღლე არ აღემატება 0,5 მ-ს. ამ დროს ღელვიანობა მნიშვნელოვანი იყო აუზის დასავლეთ ნაწილში. 29 აგვისტოს უკვე ტალღების სიმაღლე საკმაოდ გაიზარდა საქართველოს სანაპირო ზონაში და ტალღის სიმაღლე 2 მეტრამდე დაიკვირვებოდა.

(ა)



ნახ. 2. მოდელირებული ტალღური ველი 2012 წლის 29 აგვისტოს 12 სთ-ზე (გრინვიჩის დრო) მთელი შავი ზღვის აუზისათვის (ა), რეგიონული არისათვის (ბ) და ბათუმი-ფოთის აკვატორიისათვის (გ).

მადლიერება. ავტორები მადლობას უხდიან რუმინეთის მეცნიერებათა აკადემიის წევრ-კორესპონდენტს, პროფ. ევგენ რუსუს (Eugen Rusu) და პროფ. ლილიანა რუსუს (Liliana Rusu) დახმარებისათვის SWAN მოდელის ინსტალაციაში შავი ზღვის საქართველოს სანაპირო ზონისათვის.

ლიტერატურა

1. Soares C. G., Rusu L., Remardino M., Pilar P. An operational wave forecasting system for the Portuguese continental coastal area. Journal of Operational Oceanography, 2011, V.4, № 2, pp. 1-11.
2. Rusu L., Bemardino M., Soares C. G. Wind and wave modeling in the Black Sea. Journal of Operational Oceanography, 2014, V.7, № 1, pp. 5-19.
3. Rusu E. An analysis of the storm dynamics in the Black Sea. Ro. J. Techn. Sci.-Appl. Mechanics, 2018, V.63, № 2, pp.127-142.
4. Polonsky A. B., Fomin V. V., Garmashov A. V. Characteristics of wind waves of the Black Sea. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2011, № 8, pp. 108-112.
5. SWAN Scientific and Technical Documentation. https://swanmodel.sourceforge.io/download /zip/swanuse.pdf.
6. Перри А. Х., Уокер Дж. М. Система океан-атмосфера. Ленинград, Гидрометеоиздат, 195 с.
7. Anthropogenization in Georgia, NM Berdzenishvili. European Researcher, 2266-2270

Wind wave modeling system for the Georgian sector

of the Black Sea

Demuri Demetrashvili, Diana Kvaratskhelia, Vepkhia Kukhalashvili

Summary

The paper presents a surface wind wave modeling system for the Georgian sector of the Black Sea based on the SWAN wave model. The SWAN model is based on solving of the wave energy balance spectral equation using a finite-difference method. The input data of the model are wind speed and direction at 10 m above sea level and seabed relief, while the output information is wave height and direction. The calculations are performed in three stages. In the first stage, the wave model is implemented for the entire sea basin. The calculations results obtained in this stage are used as boundary conditions at the liquid boundary for the eastern region of the Black Sea, and the results obtained in the second stage are used for the third stage, which includes the Batumi-Poti-Anakia water area. Some calculation results are presented for illustrative purposes.

Key words: wave height, wind forcing, spectrum equation, wave regime.

შიგაწვის ძრავების მიერ ჰაერის დაბინძურების ბუნებრივი წყაროებიდან გარემოში გამოყოფილი ტექნოგენური მტვრის და ხელოვნური წარმოშობის მტვრისმაგვარი ნაწილაკებისაგან ატმოსფერული ჰაერის ნაწილობრივი გაწმენდის ეფექტი

რომან კენკიშვილი
საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის რაფიელ დვალის სახელობის მანქანათა მექანიკის ინსტიტუტი

ანსტრაქტი: *ნაშრომში გამახვილებულია ყურადღება რომ, წიაღისეულ საწვავზე მომუშავე შიგაწვისძრავიანი ტრანსპორტი, გავრცელების მასშტაბებიდან გამომდინარე, წარმოადგენს გარემოს ერთ-ერთ დამბინძურებელს. შიგაწვის ძრავას მუშა პროცესის თავისებურებებიდან გამომდინარე, ასეთი ტრანსპორტი, შესაბამისი ღონისძიებების გატარების შემდეგ, პერსპექტივაში შეიძლება განხილულ იქნას როგორც არა მხოლოდ გარემოს დამბინძურებელ, არამედ როგორც დამსუფთავებელ საშუალებად. კერძოდ, ატმოსფერული ჰაერის გარკვეული ნაწილი მტვერთან და მყარ ნაწილაკებთან ერთად გადის შიგაწვის ძრავების კვების სისტემის ფილტრებში და ამ ნაწილაკების დიდი ნაწილის ჰაერიდან გამოყოფა-დალექვა ხდება მფილტრავ ელემენტებზე, ხოლო ნაწილი იწვება ძრავაში. ამასთან, ვინაიდან შიგაწვის ძრავას გამონაბოლქვი აირების სახით გააჩნია აუთვისებელი სიმძლავრე, საერთო სიმძლავრის 25-27 %-ის ოდენობით, გარკვეული საინჟინრო გადაწყვეტებით შესაძლებელია ამ სიმძლავრის გამოყენება ავტომობილის გარემომცველი ჰაერის მყარი ნაწილაკებისაგან გასასუფთავებლად, რაშიც იგულისხმება ნამუშევარი აირების გამომშვებ სისტემაზე ეჟექტორული კვანძებისა და დამატებითი ფილტრების მოწყობა. გარდა ამისა, საზოგადოებრივი ტრანსპორტის სა-*