

ზამთარში ქ. ქუთაისის ატმოსფერულ ჰაერში ავტომობილებით გამონაბოლქვი PM2.5-ის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება დასავლეთის ძლიერი ფონური ქარის დროს

ნათია გიგაური*, ალექსანდრე სურმავა*, ვეფხია კუხალაშვილი** ლიანა
ინწკირველი*

*საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

**ივანე ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, მიხეილ
ნოდუას გეოფიზიკის ინსტიტუტი

აბსტრაქტი: კომპიუტერული მოდელირებით შესწავლილია ქ. ქუთაისში ავტოტრანსპორტის მიერ გაფრქვეული PM2.5-ის გადატანა - დიფუზიის პროცესი. მოდელირება განხორციელებულია მეზო-მასშტაბის ატმოსფერული პროცესების ევოლუციისა და პასიური ინგრედიენტის გავრცელების განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებით რთული რელიეფის მქონე $13.4 \times 13.4 \times 9$ კმ³ სივრცით არეში. მოდელირდება ჰიპოთეტური შემთხვევა, როდესაც ზამთრის სეზონში PM2.5 გაიფრქვევა მიწის ზედაპირიდან 0.3 მ სიმაღლეზე 5 ტიპის ურბანულ ტერიტორიაზე: ავტომაგისტრალები, ქალაქის ცენტრალური ქუჩები, სამრეწველო, სასოფლო ზონები და დაუსახლებელი ტერიტორიები. მოდელირება ჩატარებულია დროის 24 სთ-იანი ინტერვალისათვის. შესწავლილია დაბინძურების გავრცელების კინეტიკა. აგებულია PM2.5-ის კონცენტრაციის სივრცეში განაწილებისა და დროში ცვლილების გრაფიკები. განსაზღვრულია ქალაქისა და მიმდებარე ტერიტორიები სადაც შეიძლება დაფიქსირდეს მაღალი, საშუალო და დაბალი დაბინძურების დონეები. ნაჩვენებია, რომ მაღალი დაბინძურების ტერიტორიების მიდამოებში კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები არ აღემატება ზღვრულად დასაშვებ ნორმასა და 4-5 და 25 მკგ/მ³-ით ნაკლებია შტილისა და საშუალო სიმძლავრის ქარის დროს მიღებულ სიდიდეებზე. ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ზედა ნაწილსა და სასაზღვრო ფენაში აეროზოლის გავრცელება ხდება ძირითადად ფონური ქარის მიმართულებით და ნაკლებადაა დამოკიდებული ლოკალურ რელიეფსა და გაფრქვევის არეების მდებარეობაზე.

საკვანძო სიტყვები: PM2.5, ატმოსფეროს დაბინძურება, რიცხვითი მოდელირება, კონცენტრაცია, ძლიერი ქარი.

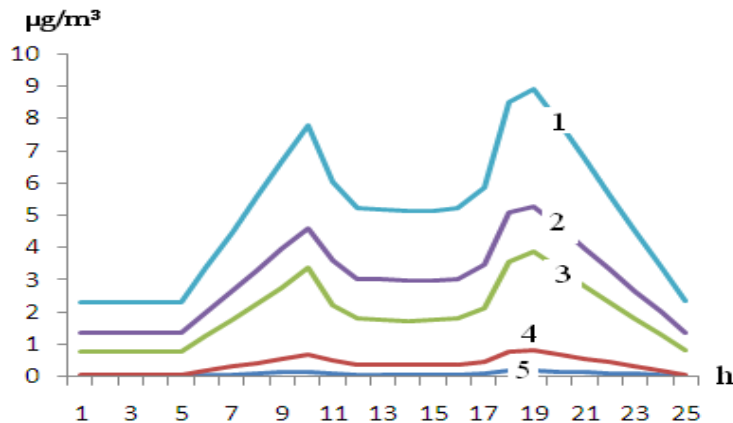
შესავალი. ურბანიზებული ტერიტორიების ოპტიმალური და ჯანმრთელობისათვის უსაფრთხო ლანდშაფტური დაგეგმარება XXI საუკუნის საქართველოს ქალაქების აქტუალური ეკოლოგიური პრობლემაა. ამ თვალსაზრისით აღსანიშნავია ქ. ქუთაისი. ის წარმოადგენს საქართველოსა და მთლიანად სამხრეთ კავკასიის ერთ-ერთ მეტად მნიშვნელოვან, სწრაფად განვითარებად სატრანსპორტო საკვანძო ცენტრს. ვითარდება ქალაქის განაშენიანება და საავტომობილო ქსელი. ქალაქში არაა განლაგებული მსხვილი ინდუსტრიული საწარმოები. შესაბამისად, ქალაქის ატმოსფეროს ეკოლოგიური მდგომარეობა ძირითადად დამოკიდებულია ქალაქის საავტომობილო ინფრასტრუქტურის ოპტიმალურ მართვაზე. ქ. ქუთაისში ატმოსფერული ჰაერის PM 2.5 დაბინძურების მონიტორინგი იწყება 2018 წლიდან. დაკვირვების მონაცემების ანალიზის მიხედვით ქ. ქუთაისი არ მიეკუთვნება მსოფლიოს ძლიერად დაბინძურებული ქალაქების რიცხვს [1, 2], თუმცა, ცალკეული, არახელსაყრელი მეტეოროლოგიური პირობების შემთხვევებში ჰაერში PM2.5-ის კონ-

ცენტრაცია აჭარბებს ზღვრულად დასაშვებ მნიშვნელობას [1,3]. ინტენსიური განაშენიანების პირობებში ქ. ქუთაისის გარემოს ეკოლოგიური მდგომარეობის შეფასებას, დაბინძურების დონის დიაგნოსტიკურ პროგნოზს და შედეგად ლანდშაფტური დაგეგმარების პრობლემების გათვალისწინებას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება.

კვლევის მეთოდი. მეზომასშტაბის ატმოსფერული პროცესების განვითარების და დამბინძურებელი მინარევების გავრცელების 3D არაწრფივი არასტაციონალური განტოლებების ერთობლივი ინტეგრირებით რიცხობრივად მოდელირდება და შეისწავლება ქ. ქუთაისისა და მიმდებარე ტერიტორიაზე ატმოსფეროში ავტოტრანსპორტის მიერ ჰაერში ემისირებული PM_{2.5}-ის გავრცელება და დროში ცვლილების ხასიათი. სტატია წარმოადგენს [4-6]-ში განხილული ამოცანების შემდგომ განვრცობას ზამთარში ძლიერი ქარის და მშრალი ამინდის შესაბამისი მეტეოროლოგიური პირობების დროს. განიხილება ატმოსფეროს 13.4×13.4×9 კმ³ სივრცული არე. არის ცენტრში მოთავსებულია ქ. ქუთაისი. მოდელირების არეში რელიეფი რთულია. ოროგრაფიის სიმაღლე იცვლება 80 მ-დან 400 მ-მდე. მათემატიკური მოდელის [7,8] განტოლებების რიცხვითი ინტეგრირება განხორციელებულია შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით ცხადი ფ. შუმანისა და არაცხადი გ. მარჩუკის რიცხვითი სქემების საშუალებით. რიცხვითი ბადის ბიჯები ჰორიზონტალური მიმართულებით 200 მ-ია, ვერტიკალური მიმართულებით თავისუფალ ატმოსფეროში – 300 მ. ატმოსფეროს მიწისპირა 100 მ სისქის ფენაში ვერტიკალური ბიჯები იცვლება 0.3 -დან 15 მ-მდე. დროითი ბიჯი 1 წმ-ია. გამოთვლები ჩატარებულია 3 დღე-ღამის პერიოდისათვის.

რიცხვითი მოდელირების შედეგები. რიცხვობრივად მოდელირებულია ქ. ქუთაისის ატმოსფეროში PM_{2.5}-ის განაწილება ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში როდესაც ფონური ქარის სიჩქარე ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის საზღვარზე (100 მ) 11 მ წმ-ია. მისი სიდიდე წრფივად იზრდება სიმაღლის ზრდასთან ერთად და 9 კმ-ის სიმაღლეზე აღწევს 26 მ/წმ-ს. ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენასა და თავისუფალ ატმოსფეროში ქრის დასავლეთის ქარი. ატმოსფეროს ფარდობითი ტენიანობა 50%-ია. დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს PM_{2.5} დაბინძურება ხდება ავტოტრანსპორტის მოძრაობის შედეგად ქალაქისა და მის მიმდებარე ტერიტორიაზე. აეროზოლის გაფრქვევა ხდება მიწის ზედაპირიდან 0.3 მ სიმაღლეზე 5 ტიპის არეში: ავტომაგისტრალების, ქალაქის ცენტრალური ქუჩების, საცხოვრებელი, სამრეწველო ზონების, მიმდებარე სოფლების და დაუსახლებელ ტერიტორიებზე. გაფრქვევის სიჩქარე სხვადასხვაა სხვადასხვა უბანში, პერიოდულია 24 სთ-ით და პროპორციულია ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის. ის მინიმალურია 0–4 სთ დროის ინტერვალში, შემდეგ წრფივად იზრდება 4–დან 10 სთ-მდე და მუდმივია 10–დან 18 სთ-მდე დროის ინტერვალში. 18–24 სთ-მდე ინტერვალში გაფრქვევის

სიჩქარე წრფივად მცირდება და ხდება 0 სთ-ზე არსებული გაფრქვევის სიჩქარის ტოლი. ნახ.1-ზე ნაჩვენებია PM2.5-ის გამოთვლებით მიღებული კონცენტრაციის დროში ცვლილების გრაფიკები დაბინძურების 5 ძირითადი ტიპის პუნქტისათვის. ნახ.1-დან ჩანს, რომ კონცენტრაციის დროში ცვლილება თვისობრივად ერთნაირია დაბინძურების ყველა ტიპის პუნქტებისათვის და ხასიათდება ორი დიდი და ორი მცირე მნიშვნელობების ინტერვალებით.

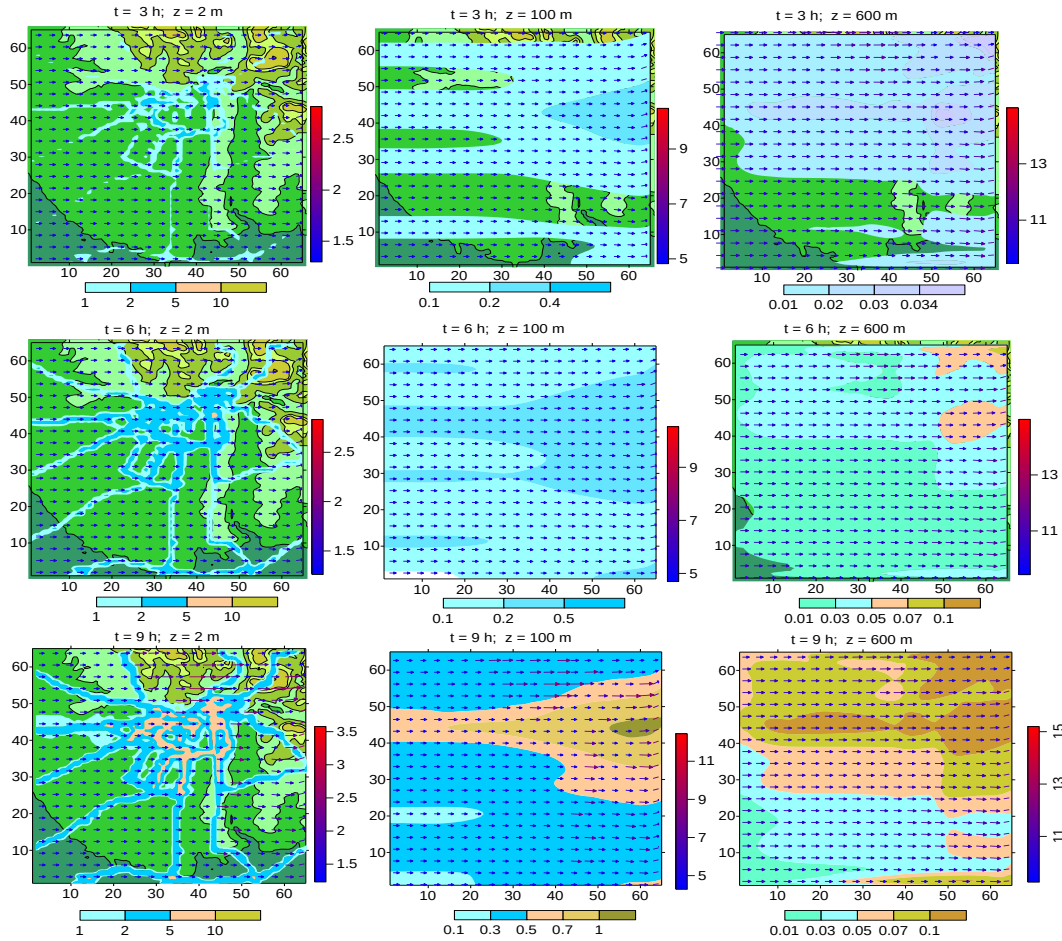


ნახ. 1. გამოთვლებით მიღებული PM2.5-ის კონცენტრაციების დროში ცვლილება ავტომაგისტრალის (1), ქალაქის ცენტრალური ქუჩის (2), სამრეწველო (3), სასოფლო (4) ზონები და დაუსახლებელ (5) პუნქტში მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე.

ძლიერი ქარის დროს კონცენტრაციის დროში ცვლილება ნაწილობრივ განსხვავდება საშუალო ქარის შემთხვევაში მიღებული ცვლილებისაგან. კერძოდ, თუკი ორივე ტიპის ქარის დროს, PM2.5-ის კონცენტრაციების პირველი მაქსიმუმი მიიღება თითქმის ერთი და იგივე დროს 10 სთ-ზე, კონცენტრაციის მეორე მაქსიმუმი ძლიერი ქარის დროს მიიღება 20 სთ-ზე, ხოლო საშუალო სიჩქარის ქარის დროს - 16 სთ-ზე და რჩება უცვლელი 4 სთ-ის განმავლობაში - 20 სთ-მდე. ავტომაგისტრალის, ქალაქის ცენტრალური ქუჩის და სამრეწველო რაიონში 20 სთ-ის მიდამოებში კონცენტრაცია 2 მ სიმაღლეზე დაახლოებით 8,5 და 3 მკგ/მ³-ის ფარგლებშია. სასოფლო ზონებსა და დაუსახლებელ ტერიტორიებზე კონცენტრაციები არ აღემატება 0.5 მკგ/მ³. PM2.5-ის კონცენტრაციის ჰორიზონტალური განაწილების ანალიზისათვის აგებულია დამბინძურებელი ინგრედიენტების გამოთვლებით მიღებული კონცენტრაციების განაწილების იზოზოლები ერთი დღე-ღამის განმავლობაში 3 სთ-იანი ინტერვალით მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე (ნახ. 2).

ნახ. 2-დან ჩანს, რომ რელიეფის ზემოქმედება არსებულ ფონურ ქარზე დილის საათებში (3-9 სთ) არ იწვევს ქარის სიჩქარის და მიმართულების მნიშვნელოვან ცვლილებას. ფორმირებული ლოკალური ქარი დასავლეთისაა და მისი სიჩქარეები მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეზე იცვლებიან დაახლოებით 1-3, 5-8.5 და 10-15 მ/წმ-ის ფარგლებში, შესაბამისად. რაც შეეხება ავტოტრანსპორტის მი-

ერ გაფრქვეულ PM_{2.5}-ის განაწილებას კონცენტრაცია მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე მინიმალურია დილის 3 სთ-ზე.



ნახ. 2. PM_{2.5} –ის კონცენტრაციის ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) და ქარის სიჩქარის (m/s) ველის განაწილება მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600მ სიმაღლეებზე t = 3, 6 და 9 სთ.

კონცენტრაციები 2 - 5 მკგ/მ³ მიღებულია ქალაქი მუზეუმის, გამარჯვების მუზეუმის, ნიკეას და სულხან-საბას აე-ბის ტერიტორიაზე გამავალ გამზირების მიდამოებში. უფრო მცირე კონცენტრაციები (1-2) მკგ/მ³, მიღებულია ქალაქის ცენტრალური ნაწილებიდან დასავლეთით და სამხრეთის მიმართულებით მიმავალ გამზირებზე (ავტომშენებლის, წყალტუბოს, ნიკეას და სხვა ქუჩების მიდამოებში). დროის შემდგომი მომენტებისათვის (6-9 სთ), ავტომობილების მოძრაობის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად იზრდება მიწისპირა დაბინძურების დონე. კონცენტრაციები 2-5 მკგ/მ³, მიღებულია ქალაქის ცენტრალურ ინტენსიურად ურბანიზებულ ტერიტორიებზე, ქუთაისის გარს შემომვლელი მაგისტრალისა და ქალაქიდან გამომავალი გამზირების ქალაქის მიმდებარე მონაკვეთებში. კონცენტრაციების ზრდა გრძელდება 9 სთ-მდე. შედეგად, მიიღება დაბინძურების სურათი, რომლის

დროსაც ქალაქის ცენტრალურ გამზირებზე კონცენტრაცია 5-10 მკგ/მ³-ის ფარგლებშია. კონცენტრაციის ზემოთ აღწერილ ცვლილებას ადგილი აქვს მიწის ზედაპირიდან 100 და 600 მ სიმაღლეებზე. ამ დონეებზე 3, 6 და 9 სთ-ზე კონცენტრაციების მნიშვნელობები 100 მ სიმაღლეზე 0.1-0.6, 0.1-0.8 და 0.1-1.76 მკგ/მ³, ხოლო 600 მ სიმაღლეზე - 0.01-0.04, 0.01- 0.13, და 0.01-0.13 მკგ/მ³ -ის ინტერვალში იცვლება.

დასკვნა. ატმოსფეროში მეზომეტეოროლოგიური პროცესების და გაფრქვეული სორბენტის გავრცელების 3D არაწრფივი არასტაციონალური განტოლებების ინტეგრირებით გამოკვლეულია ქ. ქუთაისის ატმოსფეროში ავტოტრანსპორტის მოძრაობის შედეგად მოხვედრილი PM2.5-ის სივრცეში განაწილება და დროში ცვლილება ზამთარი ფონური დასავლეთის ძლიერი ქარის დროს. შესწავლილია ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებისათვის ავტომაგისტრალის, ქალაქის ცენტრალური ქუჩების, სამრეწველო, სასოფლო ზონებსა და დაუსახლებელ ტერიტორიაზე. განსაზღვრულია აღნიშნულ პუნქტებში კონცენტრაციათა ცვლილების დიაპაზონები. მიღებულია კონცენტრაციათა ჰორიზონტალური განაწილებების სურათები ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე. განსაზღვრულია მაღალი დაბინძურების და შედარებით ნაკლებად დაბინძურებული ზონები. ნაჩვენებია რომ ავტოტრანსპორტით გაფრქვეული PM2.5 კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა აღწევს 10 მკგ/მ³ და ის მიიღება ავტომაგისტრალის უშუალო სიახლოვეს. ამასთან ძლიერი ქარის შემთხვევაში ჰაერის დაბინძურების მაქსიმალური დონე დაახლოებით 25 და 4-5 მკგ/მ³-ით ნაკლებია შტილისა და საშუალო სიმძლავრის ქარის დროს მიღებულ დონესთან შედარებით.

მადლიერების გამოხატვა. სამეცნიერო კვლევა დაფინანსებული და შესრულებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის FR-22-4765 გრანტის ფარგლებში.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Environmental pollution, 2021. https://air.gov.ge/reports_page
2. World's most polluted cities (historicaldata 2017-2022). <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>.
3. ნ.გიგაური, ა.სურმავა, ვ.კუხალაშვილი, ლ.ინწკირველი, ნ.ბეგლარაშვილი. ქ. ქუთაისის ატმოსფეროში PM2.5 და PM10-ის გავრცელების გამოკვლევა ექსპერიმენტული დაკვირვებებით. სტუ-ის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის სამეცნიერო რეფერირებადი შრომათა კრებული, ტ.135, 2024, გვ. 82-87. Doi.org/10.36073/1512-0902-2024-135-82-87.
4. Surmava A., Intskirveli L., Kordzakhia G. (2020) Numerical modeling of dust propagation in the atmosphere of a city with complex terrain. The case of background

eastern light air. Journal of Applied Mathematics and Physics, v.8.7:1222-1228. <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.87092>.

5. Surmava A., Intskirveli L., Kukhalashvili V. (2021) Numerical Modeling of the Transborder, Regional and Local Diffusion of the Dust in Georgian Atmosphere, p.139, Publishing House, Technical University”, Tbilisi, Georgia. ISBN 978-9941-28-810-4, <http://www.gtu.ge> (in Georgian).

6. ა. სურმავა, ლ. ინჭკირველი, ნ. გიგაური. PM_{2.5} და PM₁₀ მიკროაეროზოლები ქ.თბილისის ატმოსფეროში. თბილისი, ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის გამომცემლობა, 2021, 94 გვ.

7. S. Chae, J. Shin, S. Kwon, S. Lee, S. Kang, D. Lee. PM₁₀ and PM_{2.5} real-time prediction models using an interpolated convolutional neural network. *Scientific Reports*, volume 11, 11952, 2021. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91253-9>.

8. J. Deters, R. Zalakeviciute, M. Gonzalez, Y. Rybarczyk. Modeling PM_{2.5} Urban Pollution Using Machine Learning and Selected Meteorological Parameters. Machine Intelligence in Signal Sensing, Processing, and Recognition, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5106045>.

Numerical modeling of the distribution of PM_{2.5} from vehicle emissions in the ambient air of Kutaisi in winter during strong westerly background winds

Summary

The integration of 3D nonlinear non-stationary equations of mesometeorological processes and dispersion of dispersed sorbent in the atmosphere has been investigated spatial distribution and temporal change of PM_{2.5} emitted into the atmosphere of c. Kutaisi as a result of vehicle traffic during winter with strong background westerly winds. The vertical distribution of atmospheric concentration in the ground layer has been studied for different moments of time along a highways, in central city streets, industrial, rural areas and uninhabited areas. The ranges of concentration changes at these points have been determined. Images of horizontal concentration distributions in the atmospheric boundary layer at heights of 2, 100, and 600 m above the ground surface were obtained. Highly polluted and relatively less polluted zones have been identified. It has been shown that the maximum concentration of PM_{2.5} emitted by motor vehicles reaches 10 µg/m³ and is obtained in the immediate vicinity of the highway. In addition, in the case of strong winds, the maximum level of air pollution is approximately 25 and 4-5 µg/m³ lower than the levels obtained during calm and medium-strength winds, respectively.

Keywords: PM_{2.5}, atmospheric pollution, numerical modeling, concentration, strong wind.