



ა. სურმავა, ლ. ინჟპირველი, ნ. გიბაური.
ვ. კუხალაშვილი

PM2.5 და PM10 მიკროაეროზოლები
ბ. თბილისის ატმოსფეროში



თბილისი-TBILISI
2021

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

**INSTITUTE OF HYDROMETEOROLOGY OF THE
GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY**

ალექსანდრე სურმავა, ლიანა ინჟკირველი,
ნათია გიგაური, ვეპხია კუხალაშვილი

**ALEKSANDRE SURMAVA, LIANA INTSKIRVELI,
NATIA GIGAURI, VEPKHIA KUKHALASHVILI**

PM2.5 და PM10 მიკროაეროზოლები ქ. თბილისის
ატმოსფეროში

**PM2.5 AND PM10 PARTICULATE MATTERS IN THE
ATMOSPHERE OF TBILISI CITY**

დამტკიცებულია მონოგრაფიად
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის
სამეცნიერო საბჭოს მიერ. 24/12/2021 ოქმი#6

თბილისი-TBILISI
2021

რედაქტორი - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის დირექტორი ტექნ.
მეცნ. აკად. დოქტორი თენგიზ ცინცაძე

რეცენზენტები:

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი
დ. დემეტრაშვილი.

ფიზიკა-მათემატიკის აკადემიური დოქტორი
გ. კორძახია.

**Editor: Director of the Institute of Hydrometeorology of the Georgian
Technical University, Doctor of Technician Sciences**

Reviewers:

**Doctor of Sciences in Physics and Mathematics D. Demetrashvili,
PhD Physics and Mathematics G. Kordzakhia.**

მადელიერების გამოხატვა. მონოგრაფიაში გადმოცემული
სამეცნიერო კვლევა განხორციელდა „შოთა რუსთაველის
საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის“ ფინანსური
მხარდაჭერით, საგრანტო პროექტი № FR-18 -3667.

Acknowledgment. The scientific research was carried out with the
financial support of Shota Rustaveli National Science Foundation of
Georgia, grant project №FR-3667-18.

**სტუ ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის
გამომცემლობა-2021 წ.**

ISBN 978-9941-8-4028-9

აუკ 519.6

მონოგრაფია ეძღვნება თბილისის ატმოსფეროში მიკროაეროზოლების PM2.5 და PM10 გავრცელების რიცხვითი მოდელირების პრობლემებს. მასში მოცემულია ატმოსფეროში პასიური ინგრედიენტის გადატანა-დიფუზიის მათემატიკური მოდელი, განტოლებათა რიცხვითი ინტეგრირების ალგორითმი და გაანალიზებულია მოდელის რეალიზაციის შედეგები. შესწავლილია PM2.5 და PM10-ის ქ. თბილისის ატმოსფეროში გავრცელება ფონური სუსტი ქარის დროს. მოდელი შეიძლება წარმატებით იყოს გამოყენებული რთული რელიეფის ტერიტორიებზე ატმოსფეროს დამბინძურებელი ნივთიერებების გავრცელების თეორიული შესწავლისათვის.

მონოგრაფია განკუთვნილია გარემოს დაბინძურების პრობლემებზე მომუშავე მეცნიერ-მკვლევარების, პრაქტიკოს ეკოლოგებისა და ატმოსფერული ჰაერის უსაფრთხოების საკითხებით დაინტერესებული სპეციალისტებისათვის. ის შეიძლება გამოყენონ როგორც დამხმარე ლიტერატურა ეკოლოგიური პროფილის სტუდენტებმა, მაგისტრანტებმა და დოქტორანტებმა.

UDC 519.6

The monography is dedicated to the problems of numerical modeling of the propagation of microaerosols PM2.5 and PM10 (Particulate Matter) in the atmosphere of Tbilisi. It includes a mathematical model of the transfer-diffusion of a passive ingredient into the atmosphere, an algorithm for the numerical integration of equations, and an analysis of the results of the model implementation. The propagation of PM2.5 and PM10 in the atmosphere of Tbilisi during a background light air was studied. The model can be successfully used for the theoretical study of the distribution of air pollutants in a complex terrain.

The monography is intended for researchers working in the field of environmental pollution, practicing ecologists and specialists interested in air safety issues. It can be used as auxiliary literature by students, undergraduates and doctoral students of environmental profile.

შინაარსი

გვ.

შესავალი.....5

თავი 1. ატმოსფეროს ჰიდროთერმოდინამიკის და მინარეჟების გავრცელების განტოლებები.....6

1.1 ატმოსფერული ჰაერის მიკროაეროზოლებით დაბიძურების კვლევის მოკლე მიმოხილვა.....6

1.2 რთული რელიეფის ტერიტორიაზე ატმოსფეროში დამაბინძურებელი მინარეჟების გავრცელების განტოლებათა სისტემა.....8

1.3 ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მეტეოროლოგიურის ველებისა და კონცენტრაციების განსაზღვრის მეთოდი.....16

1.4 რიცხვითი ინტეგრირების ალგორითმი.....17

თავი 2. ატმოსფეროში PM2.5 და PM10 განაწილების განსაზღვრა ოპერატიული დაკვირვების და ექსპერიმენტული გაზომვების საშუალებით.....25

2.1 ოპერატიული დაკვირვების მონაცემთა ანალიზი.....25

2.2 ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგები.....48

თავი 3. ქ. თბილისში PM2.5 და PM10 ლოკალური გავრცელების რიცხვითი მოდელირება.....61

3.1. PM2.5-ის გავრცელება ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს.....63

3.2 PM2.5-ის გავრცელება ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს.....69

3.3 PM10-ის გავრცელება ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს.....75

3.4 PM10-ის გავრცელება ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს.....80

დასკვნა.....85

ლიტერატურა.....89

შესავალი

XX საუკუნის უკანასკნელ მეოთხედში დადგენილია, რომ წვრილდისპერსიული ნაწილაკები, რომელთა ზომები იცვლება 10 ნმ-დან 2.5 და 10 მკმ-მდე (PM2.5 და PM10-Particulate Matter), იწვევენ რთულ ნეგატიურ ზემოქმედებას ადამიანთა ჯამრთელობაზე, ლეტალურ დასასრულამდეც. PM2.5 და PM10 ატმოსფეროს დამაბინძურებელი მყარი და თხევადი ნაწილაკებია. ისინი წარმოიშვებიან როგორც ანტროპოგენული, ისე დედამიწაზე მიმდინარე ბუნებრივი პროცესების შედეგად. მრავალფეროვანია PM-ის შემადგენლობა: ჭვარტლი, ავტომობილის საბურავების, სამუხრუჭე ხუნდების მტვერი, მძიმე მეტალები, ქიმიური, ბიოლოგიური და სხვა უმცირესი გარემოს დამაბინძურებელი ნაწილაკები.

ატმოსფერული ჰაერის მიკრონაწილაკებით დაბინძურების მონიტორინგის სისტემა სათავეს იღებს XXI საუკუნის დასაწყისიდან, საქრთველოში მისი განხორციელება იწყება 2017 წლიდან, ჯერ ქ. თბილისში ერთ სადამკვირვებლო პუნქტზე, ხოლო შემდგომ წლებში სხვა ქალაქებშიც. დღეისათვის ქ. თბილისში PM2.5 და PM10-ის მონიტორინგი ხორციელდება სამი სადამკვირვებლო პუნქტის საშუალებით, სამეცნიერო კვლევა კი ამ მიმართულებით პრაქტიკულად არ არსებობს. ერთადერთი ინფორმაცია, რომელშიც ასახულია ატმოსფეროს მიკრონაწილაკებით დაბინძურება არის საქართველოს გარემოს დაცვისა და სოფლის მეურნეობის სამინისტროს გარემოს ეროვნული სააგენტოს ჰაერის ხარისხის მონიტორინგის რეჟიმული ინფორმაცია.

მონოგრაფიაში არის პირველი მცდელობა შეისწავლოს ქ. თბილისის ატმოსფერული ჰაერის მიკროაეროზოლებით დაბინძურება რეგულარული დაკვირვების, საველე გაზომვების მონაცემების ანალიზისა და თეორიულად, ჰაერის დაბინძურების კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით.

თავი 1. ატმოსფეროს ჰიქროთემომოდინამიკის და მინარეჟების გავრცელების განტოლებები

1.1 ატმოსფერული ჰაერის მიკროაეროზოლებით დაბინძურების კვლევის მოკლე მიმოხილვა

მიკროაეროზოლები (PM) ატმოსფეროს ერთ-ერთი ძალიან საშიში დამაბინძურებელი ნაწილაკებია, რომლებიც ნეგატიურ ზემოქმედებას ახდენენ ადამიანთა ჯანმრთელობასა და გარემოს ეკოლოგიურ მდგომარეობაზე. მცირე ზომების გამო ისინი თავისუფლად აღწევენ ადამიანთა გულ-სისხლძარღვთა სისტემაში, სხვადასხვა შინაგან ორგანოებში, ილექებიან და იწვევენ სერიოზულ დავადებებს: დიაბეტს, ფილტვების კიბოს, სისხლის მაღალ წნევას და ნაადრევ სიკვდილს [1-6]. ჯანმრთელობის დაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის უახლოესი (2016 წ.) მონაცემებით [7] მსოფლიოში მოსახლეობის სიკვდილიანობის 4.2% გამოწვეული იყო ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებით. დიდია ასევე დაბინძურებული ატმოსფერული ჰაერის უარყოფითი გავლენა მცენარეთა ზრდა-განვითარებაზე და სოფლის მეურნეობაზე [8].

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მიკროაეროზოლების ნეგატიური მოქმედება ადამიანთა ჯანმრთელობაზე დიდ ქალაქებში, ადმინისტრაციულ და ინდუსტრიულ ცენტრებში. ამის მიზეზს წარმოადგენს ავტოტრანსპორტის მოძრაობისას წარმოშობილი საბურავების, ასფალტის, სამუხრუჭე ხუნდების უმცირესი ნაწილაკები. ინდუსტრიულ ცენტრებში მათ ემატებათ საწარმოების მიერ ამოფრქვეული და დიდ მანძილებზე გავრცელებული მინერალური მარილების, ქიმიური, ბიოლოგიური და სხვა გარემოს უმცირესი დამბინძურებელი მიკროაეროზოლები.

მსოფლიოში არსებული 80 ათასი სადამკვირვებლო პუნქტის მონაცემების ანალიზის საშუალებით დადგენილია 2018-2020 წლებში PM_{2.5}-ით ყველაზე მეტად დაბინძურებული სახელმწიფოები [9]. მათ პირველ ათეულში შედის: ბანგლადეში, პაკისტანი, ინდოეთი, მონგოლეთი, ომანი, კატარი, ყირგიზეთი, ინდონეზია და ბოსნია-ჰერცეგოვინა. 2020 წელს ამ სახელმწიფოებში PM_{2.5}-ის საშუალო წლიური კონცენტრაციები 77.10-40.60 მკგ/მ³ ფარგლებში იყო. ყველაზე უფრო მეტად დაბინძურებულ 50 ქალაქებს შორის ძირითადად ჩინეთის და ინდოეთის ქალაქებია. ევროპის სახელმწიფოებს შორის 10 ძლიერად დაბინძურებული ქალაქების რიცხვში შედიან პოლონეთის, ბოსნია-

ჰერცოგოვინას, სერბეთის, კოსოვოს, იტალიის ქალაქები. 2020 წელს ამ ქალაქებში PM2.5-ის საშუალო წლიური კონცენტრაციები 44.1-32.1 მკგ/მ³ ფარგლებში იყო.

საქართველოს დედაქალაქი ქ. თბილისი და ინდუსტრიული ცენტრები: ქალაქები რუსთავი, ზესტაფონი და ქუთაისი არ შედის მსოფლიოს 500 ყველაზე დაბინძურებულ ქალაქთა რიცხვში [10]. მაგრამ, გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემებით ატმოსფეროს დამაბინძურებელ ძირითად ინგრედიენტთა კონცენტრაციები ხშირად აღემატებიან ზღვრულად დასაშვებ დონეს [11-14]. ქ. თბილისში არაა ატმოსფერული ჰაერის დამაბინძურებელი მძლავრი სამრეწველო ობიექტები, ამიტომ დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ავტოტრანსპორტის გამონაბოლქვი, ტრანსპორტის მოძრაობისას და ადამიანთა საყოფაცხოვრებო საქმიანობით წარმოშობილი მიკროაეროზოლები. ავტოტრანსპორტის გავლენა ჰაერის დაბინძურებაზე შეისწავლება სტაციონალური ნატურული დაკვირვების, ექსპერიმენტული გაზომვების, მათემატიკური და რიცხვითი მოდელირების საშუალებით [1-20]. ქ.თბილისში ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებაზე რეგულარული დაკვირვებები იწყება მე-20 საუკუნის 60-იანი წლებიდან. რაც შეეხება მიკროაეროზოლებს - PM2.5 და PM10-ს, მათზე დაკვირვება ქ. თბილისში წარმოებს 2017 წლიდან [11].

ნაშრომებში [21-24] შესწავლილია დიდ ქალაქებში და ავტომაგისტრალზე ავტოტრანსპორტის მოძრაობით წარმოშობილი PM-ების კონცენტრაციის დამოკიდებულება მოძრაობის ინტენსივობაზე. გაზომვებით მიღებულია, რომ 1200 ავტ/სთ-ში ინტენსივობით მოძრაობისას მტვრის კონცენტრაცია აღწევს 0.75 მკგ/მ³, ხოლო PM2.5, PM10-ის საშუალო დღეღამური კონცენტრაციები ზღვრულად დასაშვები მნიშვნელობების ფარგლებშია. მტვრის კონცენტრაციების და ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობას შორის არსებობს დაახლოებით წრფივი დამოკიდებულება. განსაზღვრულია საბურავების და ხუნდების ცვეთის შედეგად გამოფრქვეული მიკრონაწილაკების რაოდენობები და ქუჩებში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების ცვლილების ინტერვალები.

ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების თეორიული კვლევებისათვის დამუშავებულია მრავალრიცხოვანი მათემატიკური და რიცხვითი მოდელი. მონოგრაფიებში და სტატიებში [25-30] აღწერილია მოდელირების თეორიული საფუძვლები, მოდელის რეალიზაციის მეთოდები და პრაქტიკული სახის ამოცანების გადაწყვეტის გზები.

ატმოსფეროს დაბინძურების მოდელების მნიშვნელოვანი ნაწილი ინტეგრირებულია ამინდის ოპერატიული პროგნოზის სისტემებში და მათი რეალიზაცია ხორციელდება სუპერკომპიუტერებზე.

საქართველოსა და მის რეგიონებში ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების პრობლემის შესასწავლად გამოყენებულია ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდის გეოფიზიკის ინსტიტუტში დამუშავებული ატმოსფეროში ნივთიერებათა გავრცელების რეგიონული [31-34] და ლოკალური [35-38] მოდელი. დაბინძურებელ ნივთიერებათა გავრცელების აღსაწერად მოდელები იყენებენ ატმოსფეროს ჰიდროთერმოდინამიკის არასტაციონალურ, არაწრფივ სამგანზომილებიან განტოლებათა სისტემას და ნივთიერების გადატანა-დიფუზიის განტოლებას. კავკასიისა და საქართველოს რთული რელიეფის გავლენის ადექვატური გათვალისწინებისათვის გამოყენებულია ოროგრაფიის მიმყოლი კოორდინატთა სისტემა. რიცხვითი ინტეგრირების ალგორითმის დასამუშავებლად გამოყენებულია როგორც ცხადი, ასევე არაცხადი რიცხვითი სქემები.

1.2. რთული რელიეფის ტერიტორიაზე ატმოსფეროში დაბინძურებელი მინარევების გავრცელების განტოლებათა სისტემა

როდესაც ტროპოსფეროში მიმდინარე რეგიონული, ლოკალური ჰიდრომეტეოროლოგიური და ეკოლოგიური პროცესების ჰორიზონტალური მასშტაბები 1-1000 კმ-ის ფარგლებშია, მაშინ შეიძლება არ გავითვალისწინოთ დედამიწის სფერულობა, მოვახდინოთ ბუსინესკუს გამარტივება, გამოვიყენოთ თავისუფალი კონვექციის მიახლოება და რელიეფის მიმყოლ კოორდინატთა სისტემაში ატმოსფეროს ჰიდროთერმოდინამიკის და მინარევის გადატანა-დიფუზიის განტოლებები ჩავწეროთ შემდეგი სახით [39-41] :

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\bar{P}}{\bar{\rho}} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + g(1 + 0.6q)\vartheta \frac{\partial z}{\partial x} + lv + \Delta u + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial u}{\partial \zeta},$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\bar{P}}{\bar{\rho}} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + g(1 + 0.6q)\vartheta \frac{\partial z}{\partial y} - lu + \Delta v + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial v}{\partial \zeta},$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = \frac{g}{R_m \bar{T}} (1 + 0.6q)\vartheta h,$$

$$\begin{aligned}
\bar{P} &= R\bar{T}\bar{\rho}, \\
\frac{\partial h}{\partial t} + u\frac{\partial h}{\partial x} + v\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{w}h}{\partial \zeta} - \sigma wh &= 0, \\
\frac{\partial \vartheta'}{\partial t} + u\frac{\partial \vartheta'}{\partial x} + v\frac{\partial \vartheta'}{\partial y} + \tilde{w}\frac{\partial \vartheta'}{\partial \zeta} + Sw &= \Delta\vartheta' + \frac{1}{h^2}\frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial \vartheta'}{\partial \zeta} \\
L/\rho c_p \bar{T} - \frac{\partial \theta}{\partial t}, \\
\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y} + \tilde{w}\frac{\partial q}{\partial \zeta} &= \Delta q + \frac{1}{h^2}\frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial q}{\partial \zeta} \\
-L + \phi_c - \frac{\partial Q}{\partial t}, \\
\frac{\partial m'}{\partial t} + u\frac{\partial m'}{\partial x} + v\frac{\partial m'}{\partial y} + \tilde{w}\frac{\partial m'}{\partial \zeta} &= \Delta m' + \frac{1}{h^2}\frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial m'}{\partial \zeta} \\
-\phi_c - \frac{\partial N}{\partial t},
\end{aligned}
\tag{1}$$

$$\frac{dCo}{dt} - \frac{w_s}{h}\frac{\partial Co}{\partial \zeta} = \Delta Co + \frac{1}{h^2}\frac{\partial}{\partial \zeta} \nu \frac{\partial Co}{\partial \zeta} + So,$$

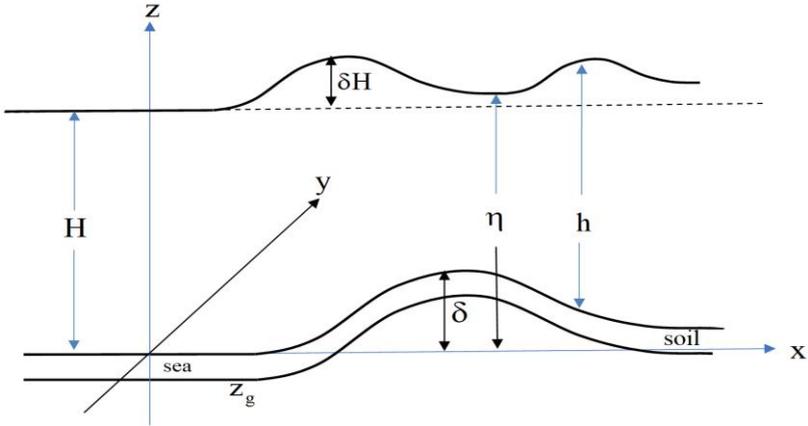
$$w = \frac{\partial z}{\partial t} + u\frac{\partial z}{\partial x} + v\frac{\partial z}{\partial y} + \tilde{w}h, \quad z = \zeta h(t,x,y) + \delta(x,y),$$

ოპერატორები

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + \tilde{w}\frac{\partial}{\partial \zeta}, \quad \Delta = \frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial}{\partial y},$$

სადაც t დროა; x , y და z აღმოსავლეთით, ჩრდილოეთით და ვერტიკალურად ზევით მიმართული დეკარტეს კოორდინატთა ღერძებია, შესაბამისად; $\zeta = (z - \delta)/h$ განუზომადი ვერტიკალური კოორდინატა (ნახ. 1.1); δ რელიეფის სიმაღლეა; $h=H-\delta$; $H(t,x,y)$ ტოპოგრაფიის სიმაღლეა; (x,y,z) დეკარტეს მართკუთხა კოორდინატთა სისტემა; (x,y,ζ) რელიეფის მიმყოლი კოორდინატთა სისტემა; u , v , w ქარის სიჩქარის მდგენელებია x , y და z ღერძების გასწვრივ; \tilde{w} ვერტიკალური სიჩქარეა ζ ღერძის გასწვრივ; $\vartheta' = T'/\bar{T}$ და $\varphi = P'/\bar{P}(z)$ ტემპერატურის და წნევის ანალოგებია; $\bar{T} = 300K$; T' , P' ტემპე-

რატურის და წნევის გადახრები მათი სტანდარტული ვერტიკალური განაწილებებიდან $T(z) = \bar{T} - \gamma z$ და $\bar{P}(z)$, შესაბამისად;



ნახ. 1.1. მოდელირების არის სქემა

γ ტემპერატურის სტანდარტული ვერტიკალური გრადიენტი; θ და θ ტემპერატურის ანალოგის არსებული და ფონური მნიშვნელობა; q და Q წყლის ორთქლის მასური ნაწილი და ფონური მასური ნაწილებია; m და M ღრუბლის წყლის მასური ნაწილი და ფონური მასური ნაწილებია; C_0 ატმოსფეროს დამაბინძურებელი ნივთიერების კონცენტრაცია; $\rho(z)$ მშრალი ჰაერის სიმკვრივის სტანდარტული ვერტიკალური განაწილება; g თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; R უნივერსალური გაზური მუდმივა მშრალი ჰაერისათვის; C_p მშრალი ჰაერის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი წნევის პირობებში; S თერმული მდგრადობის პარამეტრია; L კონდენსაციის ფარული სითბო; ϕ_{con} კონდენსაციის სიჩქარე; μ და V ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობის კოეფიციენტი; $\partial N / \partial t$ - ნალექების მოვლის ინტენსივობა; μ და V განსაზღვრულნი არიან შემდეგი ფორმულებით [42, 43]:

$$\mu = \Delta x \Delta y \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2},$$

$$v = (0.05\Delta z)^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$

სადაც Δx და Δy - რიცხვითი ბადის ჰორიზონტალური ბიჯებია, Δz - რიცხვითი ბადის ვერტიკალური ბიჯია.

კონდენსაციის სიჩქარის და სტატიკური მდგრადობის კოეფიციენტები განისაზღვრებიან ცნობილი ფორმულებით [49, 50]:

$$S = (\gamma_a - \gamma) / \bar{T}, \quad \text{როცა } q < q_{\text{sat}} \quad \text{და}$$

$$S = (\gamma_{\text{ma}} - \gamma) / \bar{T}, \quad \text{როცა } q \geq q_{\text{sat}} .$$

$$\phi_c = 0, \quad \text{როცა } q < q_{\text{sat}} \quad \text{და}$$

$$\phi_c = \rho C_p (\gamma_a - \gamma_{\text{ma}}) / L, \quad \text{როცა } q \geq q_{\text{sat}} ,$$

სადაც, γ_{ma} ტემპერატურის ნოტიო ადიაბატური გრადიენტია; q_{sat} ნაჯერი ორთქლის მასური წილია, რომელიც გამოისახება ფორმულით [44] :

$$q_{\text{sat}} = 0.622(\exp(17.5/(T - 273.2)/(T - 31.8)))/P .$$

ნალექების ინტენსივობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$\partial N / \partial t = (m - m_{\text{max}}) / \delta t, \quad \text{როცა } m \geq m_{\text{max}} \quad \text{და}$$

$$\partial N / \partial t = 0, \quad \text{როცა } m < m_{\text{max}} .$$

სადაც m_{max} წყლის მაქსიმალური მასური წილია ღრუბელში; δt - ნალექის მოსვლის დროითი ინტერვალია.

ამრიგად, (1) წარმოადგენს განტოლებათა სრულ სისტემას, რომელიც აღწერს α და β მეზომასშტაბის [45, 46], ხოლო [47-49] მიხედვით საშუალო მასშტაბის ატმოსფერულ ჰიდროთერმოდინამიკურ პროცესებს და მინარევის გავრცელებას ატმოსფეროში. მიღებული სისტემა უფრო რთულია ვიდრე ის იყო (t, x, y, z) სისტემაში. ეს ნაკლი კომპენსირებულია იმით, რომ მისი ვერტიკალური საზღვრები წარმოადგენენ $\zeta = 0$ და $\zeta = 1$ სიბრტყეებს, რაც გამორიცხავს საკოორდინატო ღერძების მიერ რელიეფის გადაკვეთას და იძლევა საშუალებას რიცხვითი ინტეგრირების დროს რელიეფი, ვერტიკალური სასაზღვრო პირობები დედამიწის ზედაპირზე და ტროპოპაუზაზე გავითვალისწინოთ დიდი სიზუსტით.

საწყისი და სასაზღვრო პირობები

სისტემისათვის (1) ჩამოვყალიბოთ საწყისი და სასაზღვრო პირობები. დავუშვათ, რომ დროის საწყის მომენტში ცნობილია ტემპერატურა, წყლის ორთქლის შემცველობა, წვიმის წყლის მოცულობითი შემცველობა, დამბინძურებელი ნივთიერების კონცენტრაცია და ჰაერის ფენის სისქე. ქარის სიჩქარის მდგენელები განისაზღვრება გეოსტროფული ქარის სიჩქარის ფორმულით. მაშინ საწყისი და სასაზღვრო პირობები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

საწყისი პირობები:

საწყის მომენტში ცნობილია მეტეოროლოგიურ სიდიდეთა მნიშვნელობები, ხოლო ქარის სიჩქარის ჰორიზონტალური მდგენელები განისაზღვრებიან გეოსტროფული ქარის ფორმულით:

$$\psi' = \psi_0(x, y, \zeta), \quad h = h_0(x, y), \quad Co = Co_0(x, y, \zeta)$$

$$u(0, x, y, \zeta) = (-RT \frac{\partial \varphi}{\partial y} + g(1 + 0.65q)\vartheta \frac{\partial z}{\partial y}) / 1, \quad \text{როცა } t = 0, \quad (2)$$

$$v(0, x, y, \zeta) = (RT \frac{\partial \varphi}{\partial x} - g(1 + 0.65q)\vartheta \frac{\partial z}{\partial x}) / 1,$$

სადაც $\psi' = \psi'(q', m')$ მეტეოროლოგიური სიდიდეების გადახრაა ფონური მნიშვნელობიდან.

გვერდითი სასაზღვრო პირობები:

ავირჩიოთ ისე, რომ საძიებელი ფუნქციები საზღვარზე ტოლი იყოს ფონური მნიშვნელობის, ან იძლეოდნენ წარმოქმნილი ტალღური შემფოთების განსაზღვრის არედან გასვლის შესაძლებლობას:

$$\frac{\partial \psi'}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial Co}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad \text{როცა } x = 0, X, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \psi'}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial Co}{\partial y} = \frac{\partial h}{\partial y} = 0, \quad \text{როცა } y = 0, Y.$$

ვერტიკალური სასაზღვრო პირობები:

ბუნებრივი პირობებია:

$$w = \frac{dz}{dt}, \quad \text{როცა } \zeta = 0, 1; \quad \varphi = \varphi'(t, x, y, 1) \quad \text{როცა } \zeta = 1. \quad (4)$$

(4) წარმოადგენს ჰაერის ნაწილაკების მიერ განუჭოლვადი ზედაპირის გარსდენის კინემატიკურ პირობას. ადვილი საჩვენებელია, რომ (4) ζ სისტემაში მიიღებს მარტივ სახეს [40, 41]:

$$\tilde{w} = 0 \quad \text{როცა } \zeta = 0, 1. \quad (5)$$

$$p' \approx \frac{g}{RT_0^2} \delta H \Delta T \quad \text{როცა } \zeta = 1.$$

მაშინ, წნევის ანალოგი ტროპოპაუზაზე ჩაიწერება სახით:

$$p = \bar{\phi}(t, x, y, \zeta) + \frac{g}{RT} \Delta \theta (h(1, x, y) - h(0, x, y)) \quad \text{როცა } \zeta = 1, \quad (6)$$

სადაც $\bar{\phi}$ წნევის ანალოგის ფონური მნიშვნელობაა, $\Delta \theta$ - ტროპოპაუზაზე ტემპერატურის ანალოგის გრადიენტი. სასაზღვრო პირობა (6) წარმოადგენს წნევის ანალოგის მნიშვნელობას ტროპოპაუზაზე სტრატოსფეროსა და ტროპოსფეროს დინამიკური ურთიერთქმედების გათვალისწინებით. სხვა სასაზღვრო პირობები ტროპოპაუზაზე არის:

$$\frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{\partial v}{\partial \zeta} = \frac{\partial \theta'}{\partial \zeta} = \frac{\partial q'}{\partial \zeta} = \frac{\partial m'}{\partial \zeta} = \tilde{w} = Co' = 0 \quad \text{როცა } \zeta = 1. \quad (7)$$

ქვედა სასაზღვრო პირობებისათვის უნდა გავითვალისწინოთ ატმოსფეროსა და ქვეფენილ ზედაპირს შორის ურთიერთქმედება, სითბოს და სინოტივის ნაკადებს შორის ბალანსის არსებობა. შესაბამისად, ქვეფენილ ზედაპირზე სასაზღვრო პირობები შემდეგია:

$$v \frac{\partial u}{\partial \zeta} = A |v_0| u / \Delta \zeta_0, \quad v \frac{\partial v}{\partial \zeta} = A |v_0| v / \Delta \zeta_0, \\ v \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = A |v_0| (\theta - (T_\delta - \bar{T} - \gamma \delta) / \bar{T}) / \Delta \zeta_0, \quad \text{როცა } \zeta = 0, \quad (8)$$

$$v \frac{\partial q}{\partial \zeta} = A |v_0| (q - q_0) / \Delta \zeta_0, \quad v \frac{\partial m}{\partial \zeta} = A |v_0| m / \Delta \zeta_0$$

$$v \frac{\partial Co}{\partial \zeta} = 0,$$

სადაც T_δ - ქვეფენილი ზედაპირის ტემპერატურაა; $|v_0| = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$; u_0 და v_0 ქარის სიჩქარის ჰორიზონტალური მდგენელებია $\zeta = 0$

დონეზე. A და $\Delta\zeta_0$ მუდმივი კოეფიციენტებია; q_δ - წყლის ორთქლის მასური წილია ქვეფენილ ზედაპირზე.

ამ პირობების დასაკმაყოფილებლად გამოვიყენოთ ნიადაგში და წყალში ტემპერატურისა და სინოტივის ცვლილების განტოლებები [50-53]:

ნიადაგში:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} D(C) \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial E(C)}{\partial z}, \quad \text{როცა } \delta_1 > z > Z_{\text{soil}},$$

$$\frac{\partial T_{\text{soil}}}{\partial t} = K_{\text{soil}} \frac{\partial^2 T_{\text{soil}}}{\partial z^2} \quad (9)$$

სადაც C - ნიადაგის მოცულობითი წყლიანობაა; T_{soil} ნიადაგისა ტემპერატურაა; D , E - ნიადაგში წყლის დიფუზიისა და ფილტრაციის კოეფიციენტებია; K_{soil} - ნიადაგის ტემპერატურის გამტარობის კოეფიციენტებია; ნიადაგში დიფუზიის და ფილტრაციის კოეფიციენტები განისაზღვრებიან ცნობილი ფორმულებით [53]:

$$D(C) = D_{\text{max}} \left(\frac{C - C_{\text{con}}}{C_{\text{por}} - C_{\text{con}}} \right)^{3,5}, \quad E(C) = E_{\text{max}} \left(\frac{C - C_{\text{con}}}{C_{\text{por}} - C_{\text{con}}} \right)^{3,5},$$

სადაც D_{max} , E_{max} დიფუზიისა და ფილტრაციის კოეფიციენტების ცნობილი მაქსიმალური მნიშვნელობებია; C_{con} , C_{por} - ნიადაგში ბმული წყლის მოცულობითი შემცველობა და ნიადაგის ფორიანობაა.

(9) განტოლებათა სისტემისათვის საწყისი და ვერტიკალური სასაზღვრო პირობები $z = \delta(x, y)$ ზედაპირზე და $z = Z_{\text{soil}}$ დონეზე შემდეგია:

$$C = C(0, x, y, z), \quad T_{\text{soil}} = T_{\text{soil}}(0, x, y, z), \quad T_{\text{sea}} = T_{\text{stf}}(0, x, y, z), \quad \text{როცა } t = 0$$

$$\rho_{\text{soil}} c_{\text{soil}} K_{\text{soil}} \frac{\partial T_{\text{soil}}}{\partial z} - \rho c_p A |v_0| (T - (T_\delta - \bar{T} - \gamma \delta_{k,l})) / h \Delta\zeta -$$

$$\rho c_p A |v_{0, k,l}| (q - q) / h \Delta\zeta = I_g$$

$$C = C_{\text{por}} \quad \text{როცა} \quad \int_0^1 \partial N / \partial t d\zeta > 0 \quad \text{და} \quad z = \delta(x, y) \quad (10)$$

$$v \frac{\partial C}{\partial \zeta} = A |v_0| (q - q_0) / \Delta\zeta_0, \quad \text{როცა} \quad \int_0^1 \partial N / \partial t d\zeta \leq 0$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial Z} = \frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \text{ როცა } Z = Z_g,$$

სადაც $I_g = I_{\text{sum}} - J$; I_{sum} არის ქვეფენილ ზედაპირზე ჯამური რადიაციის ნაკადი და გამოითვლება ფორმულით $I_{\text{sum}} = r(1 - A_\lambda)I$. r - ატმოსფეროში ღრუბლიანობით გამოწვეული ჯამური რადიაციის ნაკადის შემცირების კოეფიციენტი; I - მოკლეტალღური რადიაციის ნაკადია; J დედამიწის ეფექტური გამოსხივების ნაკადია; ფუნქცია $r = 1 - 0,08H_c - 0,05(L_c - H_c)$ [50],

სადაც H_c და L_c არის მაღალი და დაბალი ღრუბლიანობის ბალი. I - ნაკადის გამოსათვლელად გამოიყენება ალბრეტის ფორმულა, რომელიც დახრილი ზედაპირისათვის ჩაიწერება შემდეგი სახით [39]:

$$I = a_0 \cos \alpha - b_0 \sqrt{\cos \alpha},$$

$$\cos \alpha = \sinh_s \cos \alpha_g + \cos \Psi_a (\sin \chi \cos \Omega - \sin \Psi \cos \Psi_a \cos \psi) \times$$

$$\sin \alpha_g + \sin \Psi_a \cos \Psi \sin \Omega \sin \alpha_g,$$

$$\sinh_s = \sin \chi \sin \psi + \cos \chi \cos \psi \cos \Omega,$$

სადაც, h_s არის მზის ზენიტური კუთხე, ψ - მზის მიხრილობა, χ - გეოგრაფიული განედი, $\Omega = (1-12)\pi/12$ - მზის საათობრივი კუთხე, $\psi_a = \arctg(\frac{\partial \delta}{\partial x} / \frac{\partial \delta}{\partial y}) + k\pi$ არის რელიეფის ნორმალის ჰორიზონტალურ

ზედაპირზე პროექციის აზიმუტი, რომელიც აითვლება მერიდიანის ზედაპირიდან (ის ითვლება დადებითად სამხრეთის მიმართულებიდან საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით ათვლისას). $\alpha_g = \arctg((\frac{\partial \delta}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \delta}{\partial y})^2)^{1/2}$ ზედაპირზე მზის სხივის დაცემის კუთხეა,

a_0 და b_0 ცნობილი მუდმივი სიდიდეებია.

J გამოითვლება ბრენტის ცნობილი ფორმულით [39], რომელშიც გათვალისწინებულია ეფექტური გამოსხივების დამოკიდებულება რელიეფის სიმაღლისაგან კავკასიის რეგიონისათვის

$$J = (1 + \beta(\delta)) \sigma_{\text{stbol}} f T_g (A_c - B_c q^{0.5}),$$

სადაც A_c და B_c არის ემპირიული მუდმივები, σ_{stbol} სტეფან-ბოლცმანის მუდმივა, f_g პარამეტრით განისაზღვრება თუ რამდენადაა ნიადაგის ზედაპირი რუხი, პარამეტრი $\beta(\delta)$ ასახავს ეფექტური რადიაციის ცვლილებას რელიეფის სიმაღლის მიხედვით. ის გამოითვლება ნაშრომში [39] მოცემული ცხრილების გამოყენებით მიღებული კვადრატული ინტერპოლაციური ფორმულის საშუალებით.

ამრიგად, ამოცანა მდგომარეობს (1) და (9) სისტემის ინტეგრირებაში (2), (3), (5-8), (10) საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით.

1.3. ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მეტეოროლოგიურის ველებისა და კონცენტრაციების განსაზღვრის მეთოდი

რეგიონული და ლოკალური მეზომასშტაბის ეკოლოგიური ატმოსფერული პროცესების მოდელირებისას განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა მიწისპირა 50 – 100 მ სისქის ფენაში აეროზოლის კონცენტრაციების განსაზღვრას. ამ მიზნით ინტეგრირდება აეროზოლის გადატანა - დიფუზიის განტოლება ჩაწერილი (x, y, z) კოორდინატთა სისტემაში:

$$\frac{dCo}{dt} - w_s \frac{\partial Co}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial Co}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial Co}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial Co}{\partial z} + So(t, x, y, z) \quad (11)$$

განტოლებაში შემავალი u , v და w განისაზღვრება ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის პარამეტრიზაციული მოდელის საშუალებით [39, 55], რომელშიც ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის სტრუქტურის აღწერისათვის გამოიყენება მონინ-ობუხოვის მსგავსების თეორია და ბუნსინგერის ემპირიული ფორმულები. მოდელი ჩაიწერება შემდეგი სახით [55]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{\chi z} \varphi_u(\zeta), \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_*}{z} \varphi_p(\zeta), \quad (p = \vartheta, q), \quad \zeta = \frac{z}{L}, \quad L = \frac{u_*^2}{\lambda \chi^2 \vartheta_*^2} \quad (12)$$

$$|\bar{u}| = \frac{u_*}{\chi} f_u(\zeta, \zeta_u), \quad p - p_0 = p_* f_p(\zeta, \zeta_0), \quad \zeta_u = \frac{z_u}{L}, \quad \zeta_0 = \frac{z_0}{L}, \quad \text{if } z \leq z_{sur}$$

სადაც Z_u - ხორკლიანობა; Z_p - ცნობილი პარამეტრია, რომელიც ახასიათებს ქვეფენილი ზედაპირის თერმულ თვისებას; Z_{sur} და Z_0 ცნობილი მუდმივებია; u_* - ხახუნის სიჩქარე; ϑ_* ტემპერატურის ანალოგია; λ და χ - ტივტივების პარამეტრი და ფონ-კარმანის მუდმივა; მსგავსების თეორიის უნივერსალური ფუნქციებია

$\varphi_u(\zeta)$, $\varphi_g(\zeta)$, $f_u(\zeta, \zeta_u)$, $f_g(\zeta, \zeta_0)$, ქარის სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი განისაზღვრება უწყვეტობის განტოლებიდან.

(11) და (12) განტოლებების საწყისი და სასაზღვრო პირობები შემდეგია:

$$\begin{aligned} C_0 &= C_0(0, x, y, z), \quad u = u(0, x, y, z), \\ v &= v(0, x, y, z), \quad p = p(0, x, y, z), \quad \text{როცა } t = 0, \\ \frac{\partial C_0}{\partial x} &= 0, \text{ როცა } x = 0, X; \quad \frac{\partial C_0}{\partial y} = 0, \text{ როცა } y = 0, Y, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} C_0 &= C_0(t, x, y, \delta_0), \quad p = p(t, x, y, \delta_0), \\ u &= u(t, x, y, \delta_0), \quad v = v(t, x, y, \delta_0), \quad \text{როცა } z = \delta_0 = \delta + 100 \text{ მ}. \end{aligned}$$

განტოლებები (11) საწყისი და სასაზღვრო პირობებით (13) რიცხობრივად ინტეგრირდება კრანკლ-ნიკოლსონის სქემით და კოორდინატების მიხედვით გახლეჩის მეთოდის გამოყენებით [54]. განტოლებათა სისტემა (12) ინტეგრირდება [39, 55]-ში მოცემული მეთოდიკით.

1.4. რიცხვითი ინტეგრირების ალგორითმი

ამოცანის რიცხვითი ინტეგრირების ოპტიმალური სქემის შესარჩევად საჭიროა გავითვალისწინოთ როგორც ზოგადი, ასევე კონკრეტული მეტეოროლოგიური პროცესის დამახასიათებელი ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმები. კერძოდ, სქემა უნდა იძლეოდეს ტალღების გავრცელებისა და ურთიერთქმედების აღწერის საშუალებას მნიშვნელოვანი ხელოვნური სიბლანტის გარეშე, აღწერდეს დიდი გრადიენტების მქონე ველების დროში ცვლილებას, არამდგრადი მოკლე ფიქტიური ტალღების ინდუცირების გარეშე, შეეძლოს ინტეგრირება საკმაოდ დიდი დროის განმავლობაში, იყოს გამოთვლების დროის მხრივ ეკონომიური და სხვა. ერთ-ერთ ასეთ სქემას წარმოადგენს ფ. შუმანის და ჯ. ჰოვერმეილის მიერ დამუშავებული რიცხვითი სქემა [55, 56]. ის არის დისპერსიული და არადისპაციური, აკმაყოფილებს ზევით მოყვანილ ზოგიერთ თვისებებს და ამასთან, არის მეტად მოსახერხებელი რიცხვითი გამოკვლევების ჩატარებისთვის. აღნიშნული სქემის გამოყენებით შესრულებულმა გამოთვლებმა აჩვენეს, რომ ის ინახავს სისტემის სრულ ენერგიას დაახლოებით 5% სიზუსტით [56].

ჩამოვყალიბოთ ამოცანის ინტეგრირების რიცხვითი სქემა. ამოცანის განსაზღვრის არე დავფაროთ დროითი და სივრცითი ბადით (n, k, l, m):

$$t_n = n\Delta t, \quad x_k = k\Delta x, \quad y_l = l\Delta y \quad \text{და} \quad \zeta_m = m\Delta \zeta; \quad n = 0, 1, \dots, N-1, N; \\ k = 0, 1, \dots, K-1, K; \quad l = 0, 1, \dots, L-1, L; \quad m = 0, 1, \dots, M-1, M.$$

სადაც n დროითი ბადის, ხოლო k, l, m - სივრცითი ბადის წერტილების ნომრებია x, y და ζ ლერძების გასწვრივ. ამასთან N, K, L, M დროითი და სივრცითი ბადის წერტილების მაქსიმალური მნიშვნელობებია, ხოლო $\Delta x, \Delta y, \Delta \zeta, \Delta t$ სივრცითი და დროითი ბადის ბიჯებია. მოვახდინოთ (1) სისტემის განტოლებების (მე-5 და მე-9 განტოლებების გარდა) აპროქსიმაცია შუმანის სქემის [55, 56] გამოყენებით შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \bar{u}_t^t + \overline{\bar{u}^{xy} \bar{u}_x^y}^{xy} + \overline{\bar{v}^{xy} \bar{u}_y^x}^{xy} + \overline{\bar{w}^{xy} \bar{u}_{\zeta_y}^{\zeta xy}}^{xy} &= \\ = -\bar{P} \overline{\bar{\phi}_x^y}^{xy} / \bar{\rho} + g(1 + 0.6\bar{q}^{xyy}) \overline{\bar{\theta}^{xy} \bar{z}_x^y}^{xy} + l\bar{v}^{xyxy} + (\tilde{\Delta u})_{k,l,m} \\ \bar{v}_t^t + \overline{\bar{u}^{xy} \bar{v}_x^y}^{xy} + \overline{\bar{v}^{xy} \bar{v}_y^x}^{xy} + \overline{\bar{w}^{xy} \bar{v}_{\zeta_y}^{\zeta xy}}^{xy} &= \\ = -\bar{P} \overline{\bar{\phi}_y^x}^{xy} / \bar{\rho} + g(1 + 0.6\bar{q}^{xyy}) \overline{\bar{\theta}^{xy} \bar{z}_y^x}^{xy} - l\bar{u}^{xyxy} + (\tilde{\Delta v})_{k,l,m} \\ \bar{\phi}_{\zeta}^{\zeta} = \frac{g}{RT} (1 + 0.6\bar{q}^{xyy}) \bar{\theta}^{\zeta\zeta} \quad z_{k,l,m}^n = \zeta_m h_{k,l}^n + \delta_{k,l} & \quad (14) \\ \bar{\theta}_t^t + \overline{\bar{u}^{xy} \bar{\theta}_x^y}^{xy} + \overline{\bar{v}^{xy} \bar{\theta}_y^x}^{xy} + \overline{\bar{w}^{xy} \bar{\theta}_{\zeta_y}^{\zeta xy}}^{xy} &= \\ = S\bar{w}^{xyxy} + (\tilde{\Delta \theta})_{k,l,m} + \frac{L}{\bar{\rho} c_p} \phi_{\text{conk},l,m} - \bar{\theta}_t^t \\ \bar{q}_t^t + \overline{\bar{u}^{xy} \bar{q}_x^y}^{xy} + \overline{\bar{v}^{xy} \bar{q}_y^x}^{xy} + \overline{\bar{w}^{xy} \bar{q}_{\zeta_y}^{\zeta xy}}^{xy} &= \\ = (\tilde{\Delta q})_{k,l,m} - \phi_{\text{conk},l,m} - \theta \bar{Q}_t^t \\ \bar{m}_t^t + \overline{\bar{u}^{xy} \bar{m}_x^y}^{xy} + \overline{\bar{v}^{xy} \bar{m}_y^x}^{xy} + \overline{\bar{w}^{xy} \bar{m}_{\zeta_y}^{\zeta xy}}^{xy} &= \end{aligned}$$

$$= (\tilde{\Delta}m)_{k,l,m} + \phi_{\text{con } k,l,m} - \overline{M}_t^t - \overline{N}_t^t$$

$$w_{k,l,m}^n = \zeta_m \overline{h}_t^{xyxy} + \overline{u}^{xy} z_x^y + \overline{u}^{xy} z_y^x + \overline{w}^{xy} z^{xy},$$

სადაც

$$\mathfrak{P}_{k,l,m} = \mathfrak{P}'_{k,l,m} + \theta_{k,l,m}; q_{k,l,m} = q'_{k,l,m} + Q_{k,l,m};$$

$$m_{k,l,m} = m'_{k,l,m} + M_{k,l,m}.$$

სადაც გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\overline{\Psi}_t^t = \begin{cases} (\Psi_{k,l,m}^{n+1} - \Psi_{k,l,m}^{n-1})/2\Delta t & \text{როცა } n > 0, \\ (\Psi_{k,l,m}^1 - \Psi_{k,l,m}^0)/2\Delta t & \text{როცა } n = 0 \end{cases},$$

$$\Psi_x = (\Psi_{k+0.5,l,m}^n - \Psi_{k-0.5,l,m}^n)/2\Delta x, \quad \overline{\Psi}^x = (\Psi_{k+0.5,l,m}^n + \Psi_{k-0.5,l,m}^n)/2,$$

$$\Psi_y = (\Psi_{k,l+0.5,m}^n - \Psi_{k,l-0.5,m}^n)/2\Delta y, \quad \overline{\Psi}^y = (\Psi_{k,l+0.5,m}^n + \Psi_{k,l-0.5,m}^n)/2, \quad (15)$$

$$\Psi_\zeta = (\Psi_{k,l,m+0.5}^n - \Psi_{k,l,m-0.5}^n)/2\Delta \zeta, \quad \overline{\Psi}^\zeta = (\Psi_{k,l,m+0.5}^n + \Psi_{k,l,m-0.5}^n)/2\Delta \zeta,$$

$$(\tilde{\Delta}\psi)_{k,l,m} = [(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \mu \frac{\partial}{\partial \zeta})\psi]_{k,l,m} =$$

$$= \{[\mu_{k+1/2,l,m} \overline{\psi}^{yy}_{k+1,l,m} + (\mu_{k+1/2,l,m} + \mu_{k-1/2,l,m}) \overline{\psi}^{yy}_{k,l,m} +$$

$$+ \mu_{k-1/2,l,m} \overline{\psi}^{yy}_{k-1,l,m}] + [\mu_{k,l+1/2,m} \overline{\psi}^{xx}_{k,l+1,m} +$$

$$(\mu_{k,l+1/2,m} + \mu_{k,l-1/2,m}) \overline{\psi}^{xx}_{k,l,m} + \mu_{k,l-1/2,m} \overline{\psi}^{xx}_{k-1,l,m}] +$$

$$+ [v_{k,1,m+1/2} \overline{\psi}^{xyy}_{k,l,m+1} + (v_{k,1,m+1/2} + v_{k,1,m-1/2}) \overline{\psi}^{xyy}_{k,l,m} +$$

$$+ v_{k,1,m+1/2} \overline{\psi}^{xyy}_{k,l,m+1}] / (\overline{h}^{xyy})^2 (\Delta \zeta)^2$$

სადაც Ψ არის ნებისმიერი საძიებელი ფუნქცია.

უწყვეტობის განტოლების ინტეგრირებისათვის მოვახდინოთ მათი გარდაქმნა. ჩავწეროთ უწყვეტობის განტოლებაში (1) w სრული ფორმით

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{w}h}{\partial \zeta} - \sigma h (\tilde{w}h + \frac{\partial z}{\partial t} + u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y}) = 0.$$

მოვახდინოთ ცალკეული წევრების გარდაქმნები:

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \sigma \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \zeta} (e^{-\sigma \zeta} \zeta \frac{\partial h}{\partial t}) = e^{\sigma \zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} (e^{-\sigma \zeta} \zeta \frac{\partial h}{\partial t});$$

$$\frac{\partial \tilde{w}h}{\partial \zeta} - \sigma h \tilde{w}h = e^{\sigma \zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} (e^{-\sigma \zeta} \tilde{w}h);$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები: $U = ue^{-\sigma \zeta}$; $V = ve^{-\sigma \zeta}$; $\bar{U} = \int_0^1 U d\zeta$;

$\bar{V} = \int_0^1 V d\zeta$. მაშინ მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ [41]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -e^{\sigma h} F(\bar{U}, \bar{V}),$$

$$\tilde{w} = \frac{1}{h} [-\zeta e^{\sigma h} F(\bar{U}, \bar{V}) - e^{\sigma \zeta} F(\tilde{U}, \tilde{V})]$$

სადაც ოპერატორი

$$F(a, b) = a \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial a}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial b}{\partial y} - a \sigma h \frac{\partial \delta}{\partial x} - b \sigma h \frac{\partial \delta}{\partial y}.$$

წარმოვადგინოთ (5), (6) და (7)-ის სასრულ სხვაობითი ანალოგები შემდეგი სახით:

$$h_{k,l}^{n+1} = h_{k,l}^{n-1} - m \Delta \zeta e^{\sigma h_{k,l}} F_{k,l}(\bar{U}, \bar{V}),$$

$$\tilde{w}_{k,l,m}^n = \frac{1}{h_{k,l}^n} [m \Delta \zeta e^{\sigma h_{k,l}} F_{k,l}(\bar{U}, \bar{V}) - e^{\sigma h_{k,l}} F_{k,l}(\tilde{U}, \tilde{V})], \quad (16)$$

$$F_{k,l,m}(a, b) = \overline{\overline{a^{xy} h_x^y}}^{xy} + \overline{\overline{h^{xy} a^y}}^{xy} - \sigma \overline{\overline{h^{xy} a^{xy} \delta_x^y}}^{xy} + \\ + \overline{\overline{b^{xy} h_y^x}}^{xy} + \overline{\overline{h^{xy} b^x}}^{xy} - \sigma \overline{\overline{h^{xy} b^{xy} \delta_y^x}}^{xy}.$$

ატმოსფეროში დამბინძურებელი ინგრედიენტის გავრცელების განტოლების ინტეგრირებისათვის ვისარგებლოთ კრანკ-ნიკოლსონის სქემით და გამოვიყენოთ სივრცული კოორდინატების მიმართ გახლეჩის მეთოდი [54]. მაშინ ინტეგრირების ალგორითმი, ოპერატიული ფორმით შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\frac{Co_{k,l,m}^{n+1/8} - Co_{k,l,m}^n}{\tau/2} + \Lambda_x \frac{Co_{k,l,m}^{n+1/8} + Co_{k,l,m}^n}{2} = 0,$$

$$\begin{aligned}
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+2/8} - Co_{k,l,m}^{n+1/8}}{\tau/2} + \Lambda_y \frac{Co_{k,l,m}^{n+2/8} + Co_{k,l,m}^{n+1/8}}{2} = 0, \\
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+3/8} - Co_{k,l,m}^{n+2/8}}{\tau/2} + \Lambda_z \frac{Co_{k,l,m}^{n+3/8} + Co_{k,l,m}^{n+2/8}}{2} = 0, \\
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+5/8} - Co_{k,l,m}^{n+3/8}}{\tau/2} = So_{k,l,m}^{n+1/2}, \\
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+6/8} - Co_{k,l,m}^{n+5/8}}{\tau/2} + \Lambda_z \frac{Co_{k,l,m}^{n+6/8} + Co_{k,l,m}^{n+5/8}}{2} = 0, \\
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+7/8} - Co_{k,l,m}^{n+6/8}}{\tau/2} + \Lambda_y \frac{Co_{k,l,m}^{n+7/8} + Co_{k,l,m}^{n+6/8}}{2} = 0, \\
& \frac{Co_{k,l,m}^{n+1} - Co_{k,l,m}^{n+7/8}}{\tau/2} + \Lambda_x \frac{Co_{k,l,m}^{n+1} + Co_{k,l,m}^{n+7/8}}{2} = 0
\end{aligned} \tag{17}$$

სადაც Λ_x, Λ_y და Λ_z - შესაბამისი დიფერენციალური ოპერატორების სასრულ სხვაობითი ანალოგებია, რომლებიც უზრუნველყოფენ სქემის მონოტონურობას და განისაზღვრებიან შემდეგი ფორმულებით:

$$\begin{aligned}
\Lambda_x &= \frac{1}{2\Delta X} (U^- Co_{k+1,l,m} - U^0 Co_{k,l,m} - U^+ Co_{k-1,l,m}) - \\
& - \frac{1}{\Delta X^2} (\mu_{k+1/2} Co_{k+1,l,m} - (\mu_{k+1/2} + \mu_{k-1/2}) Co_{k,l,m} \\
& + \mu_{k-1/2} Co_{k-1,l,m}) \\
\Lambda_z &= \frac{1}{2\Delta Z} (W^- Co_{k,l,m+1} - W^0 Co_{k,l,m} - W^+ Co_{k,l,m-1}) - \\
& - \frac{1}{\Delta Z^2} (v_{m+1/2} Co_{k,l,m+1} - (v_{m+1/2} + v_{m-1/2}) Co_{k,l,m} \\
& + v_{m-1/2} Co_{k,l,m-1})
\end{aligned} \tag{18}$$

სადაც

$$\begin{aligned}
U^- &= 0.5(u + |u|), \quad U^0 = |u|, \quad U^+ = 0.5(u - |u|), \\
V^- &= 0.5(v + |v|), \quad V^0 = |v|, \quad V^+ = 0.5(v - |v|),
\end{aligned}$$

$$W^- = 0.5(\tilde{w} + w_g / h + |\tilde{w} + w_g / h|), \quad (19)$$

$$W^0 = |\tilde{w} + w_g / h|, \quad W^+ = 0.5(\tilde{w} + w_g / h - |\tilde{w} + w_g / h|) .$$

(9) განტოლებათა სისტემის აპროქსიმაცია ხდება კრანკ-ნი-კოლსონის სქემით მუდმივი ბიჯის მქონე ერთგანზომილებიან დროით და სივრცით ბადეზე:

$$t_n = n\Delta t, \quad z_k = k\Delta z \quad (n=0,1,2,\dots,N-1, N; k=0,1,2,\dots,-k_s+1, k_s)$$

შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \frac{C_k^{n+1} - C_k^n}{\Delta t} &= \frac{1}{2\Delta z^2} [(D_{k+1/2}^n C_{k+1}^{n+1} - (D_{k+1/2}^n + \\ &+ D_{k-1/2}^n) C_k^{n+1} + D_{k-1/2}^n C_{k-1}^{n+1}) + (D_{k+1/2}^n C_{k+1}^n - (D_{k+1/2}^n + D_{k-1/2}^n) C_k^n + \\ &+ D_{k-1/2}^n C_{k-1}^n)] - \frac{E_{k+1}^n - 2E_k^n + E_{k-1}^n}{2\Delta z} \\ \frac{T_{\text{soilk}}^{n+1} - C_k^n}{\Delta t} &= \frac{1}{2\Delta z^2} [K_{\text{soilk}}^n (T_{\text{soilk}+1}^{n+1} - 2T_{\text{soilk}}^{n+1} + T_{\text{soilk}-1}^{n+1}) + \\ &K_{\text{soilk}}^n (T_{\text{soilk}+1}^n - 2T_{\text{soilk}}^n + T_{\text{soilk}-1}^n)] \end{aligned} \quad (20)$$

საწყისი პირობების აპროქსიმაცია შემდეგია:

საწყისი პირობები:

$$\begin{aligned} \Psi_{k,l,m}^{\prime 0} &= \Psi_{k,l,m}^{\prime 0} h_{0,k,l}^0 = h_{0,k,l}^0, \quad C_{k,l,m}^0 = \vartheta C_{0,k,l,m}^0 \\ u_{k,l,m}^0 &= (-RT\bar{\varphi}_y^{\overline{xy}} + g(1+0.61q_{k,l,m})^{\overline{xy}} \bar{z}_y^{\overline{xy}}) / l, \quad \text{როცა } n=0, \\ v_{k,l,m}^0 &= (RT\bar{\varphi}_x^{\overline{xy}} - g(1+0.61q_{k,l,m})^{\overline{xy}} \bar{z}_x^{\overline{xy}}) / l . \end{aligned} \quad (21)$$

ჰორიზონტალური სასაზღვრო პირობების აპროქსიმაციაა:

$$\begin{aligned} \Psi_{0,l,m}^{\prime n} &= \Psi_{1,l,m}^{\prime n}, \quad \Psi_{K-1,l,m}^{\prime n} = \Psi_{K,l,m}^{\prime n}, \quad \Psi_{k,0,m}^{\prime n} = \Psi_{k,l,m}^{\prime n}, \\ \Psi_{k,L-1,m}^{\prime n} &= \Psi_{k,L,m}^{\prime n}, \\ u_{0,l,m}^n &= u_{1,l,m}^n, \quad u_{K-1,l,m}^n = u_{K,l,m}^n, \quad u_{k,0,m}^n = u_{k,l,m}^n, \\ C_{k,0,m}^n &= C_{k,l,m}^n, \quad u_{k,L-1,m}^n = u_{k,L,m}^n, \\ h_{0,l}^n &= h_{1,l}^n, \quad h_{K-1,l}^n = h_{K,l}^n, \quad h_{k,0}^n = h_{k,l}^n, \quad h_{k,L-1}^n = h_{k,L}^n, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{0,1,m}^n &= \mathbf{u}_{1,1,m}^n, \mathbf{u}_{K-1,1,m}^n = \mathbf{u}_{K,1,m}^n, \mathbf{u}_{k,0,m}^n = \mathbf{u}_{k,1,m}^n, \mathbf{u}_{k,L-1,m}^n = \mathbf{u}_{k,L,m}^n, \\ \mathbf{v}_{0,1,m}^n &= \mathbf{v}_{1,1,m}^n, \mathbf{v}_{K-1,1,m}^n = \mathbf{v}_{K,1,m}^n, \mathbf{v}_{k,0,m}^n = \mathbf{v}_{k,1,m}^n, \mathbf{v}_{k,L-1,m}^n = \mathbf{v}_{k,L,m}^n. \\ \mathbf{Co}_{0,1,m}^n &= \mathbf{Co}_{1,1,m}^n, \mathbf{Co}_{K-1,1,m}^n = \mathbf{Co}_{K,1,m}^n, \mathbf{Co}_{k,L-1,m}^n = \mathbf{Co}_{k,L,m}^n. \end{aligned}$$

ვერტიკალური სასაზღვრო პირობები:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{w}}_{k,1,0} &= \tilde{\mathbf{w}}_{k,1,M} = 0, \quad \mathbf{Co}_{k,1,M-1}^n = \mathbf{Co}_{k,1,M}^n \\ \mathbf{v}_{k,1,1}^n \mathbf{u}_{k,1,1}^n &= \mathbf{A} |v_{0k,1,0}| \mathbf{u}_{k,1,1}^n \Delta \zeta_0, \quad \mathbf{v}_{k,1,1}^n \mathbf{v}_{k,1,1}^n = \mathbf{A} |v_{0k,1,0}| \mathbf{v}_{k,1,1}^n \Delta \zeta_0, \text{ როცა } m=0 \\ \mathbf{v}_{k,1,1}^n (\mathbf{q}_{k,1,1}^n - \mathbf{q}_{nk,1,0}^n) &= \mathbf{A} |v_{0k,1,0}| (\mathbf{T}_{k,1,1}^n - \mathbf{T}_{\delta k,1,0}^n - \bar{\mathbf{T}} - \gamma \delta_{k,1}) / \bar{\mathbf{T}} \Delta \zeta_0, \\ \mathbf{v}_{k,1,1}^n (\mathbf{q}_{k,1,1}^n - \mathbf{q}_{k,1,0}^n) &= \mathbf{A} |v_{0k,1,0}| (\mathbf{q}_{k,1,1,0}^n - \mathbf{q}_{\delta k,1,0}^n) \Delta \zeta_0, \\ \mathbf{v}_{k,1,1}^n \mathbf{u}_{k,1,1}^n &= \mathbf{A} |v_{0k,1,0}| \mathbf{m}_{k,1,1}^n \Delta \zeta_0, \quad \tilde{\mathbf{w}}_{k,1,M} = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Psi_{k,1,M-1}' = \Psi_{k,1,M}' , \quad \Phi_{k,1,M}^n = \phi_{k,1,M}^n + \frac{g \Delta T}{RT} (\mathbf{h}_{k,1}^n - \mathbf{h}_{k,1}^0)$$

$$\mathbf{u}_{k,1,M-1}^n = \mathbf{u}_{k,1,M}^n, \mathbf{v}_{k,1,M-1}^n = \mathbf{v}_{k,1,M}^n, \text{ როცა } m = M, \mathbf{Co}_{k,1,M-1}^n = \mathbf{Co}_{k,1,M}^n .$$

საწყისი პირობები ნადაგის მახასიათებელი ჰიდროლოგიური და თერმიული პარამეტრებისათვის შემდეგია:

$$\mathbf{C}_{k,1,0} = \mathbf{C}_{k,1,0}^0, \quad \mathbf{T}_{\text{soil } k,1,0} = \mathbf{T}_{\text{soil } k,1,0}^0 .$$

ვერტიკალური სასაზღვრო პირობები ჩაიწერება ასეთი სახით:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{soil}} \mathbf{c}_{\text{soil}} \mathbf{K}_{\text{soil}} (\mathbf{T}_{\text{soil},0}^n - \mathbf{T}_{\text{soil},1}^n) / \Delta z - \rho c_p \mathbf{A} |v_{0,k,1,1}| (\mathbf{T}_{k,1,1}^n - (\mathbf{T}_{k,1,0}^n - \\ \bar{\mathbf{T}} - \gamma \delta_{k,1})) / h \Delta \zeta - \rho c_p \mathbf{A} |v_{0,k,1,1}| (\mathbf{q}_{k,1,1}^n - \mathbf{q}_{k,1,0}^n) / h \Delta \zeta = \mathbf{I}_g \\ \mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_{\text{por},0}, \quad \text{როცა } \int_0^1 \partial \mathbf{N} / \partial t d \zeta > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\frac{D_0 (\mathbf{C}_0^n - \mathbf{C}_{-1}^n)}{\Delta z} = \frac{\rho_w}{\rho_q} \mathbf{A} |v_{0,0}| (\mathbf{q}_{k,1,1}^n - \mathbf{q}_{k,1,0}^n) / h \Delta \zeta_0 \quad \text{როცა } \int_0^1 \partial \mathbf{N} / \partial t d \zeta \leq 0$$

$$\mathbf{C}_{-K_S+1} = \mathbf{C}_{-K_S}, \quad \mathbf{T}_{\text{soil } -K_S+1} = \mathbf{T}_{\text{soil } -K_S}, \quad \mathbf{T}_{\text{sea } -K_S+1} = \mathbf{T}_{\text{sea } -K_S}, \quad \text{როცა } k = -K_S$$

მოდელში გამოიყენებული ფიზიკური პარამეტრების მნიშვნელობებია:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = 287 \text{ მ}^2 \text{ წმ}^{-2} / \text{ოკ}; \quad \mathbf{R}_m = 461.51 \text{ მ}^2 \text{ წმ}^{-2} / \text{ოკ}; \quad \mathbf{g} = 10 \text{ მწმ}^{-2}; \quad \mathbf{l} = 10^{-4} \text{ წმ}^{-1}; \quad \mathbf{\sigma} = 10^{-4} \text{ მ}^{-3}; \\ \mathbf{T}_0 = 270^{\circ} \text{ K}; \quad \Delta \mathbf{T} = 20^{\circ} \text{ C}; \quad \chi = 42^{\circ}; \quad \Delta \theta = 40^{\circ} \text{ C}; \quad \mathbf{E}_{\text{max}} = 1.5 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

$D_{\max} = 15 \times 10^{-8} \text{ მ}^2 / \text{წმ}$; $\Delta \zeta_0 = 10^{-2}$; $M_{m_{\max}} = 2 \times 10^{-4}$; $K_{\text{sea}} = 15 \times 10^{-6}$
 $\text{მ}^2 / \text{წმ}$; $K_{\text{soil}} = 3 \times 10^{-7} \text{ მ}^2 / \text{წმ}$; $\rho_{\text{sea}} = 1,1 \text{ გ/სმ}^3$; $a_0 = 1,396 \times 10^3 \text{ ვტ/მ}^2$;
 $b_0 = 10,2094 \times 10^3 \text{ ვტ/მ}^2$; $A_\lambda = 0,2$; $A_{\theta, q} = 1,1$; $A_u = 1,6$; $A_e = 0,39$;
 $B_e = 0,058$; $f_g = 0,9$; $C_{\text{por}} = 0,3$; $C_{\text{con}} = 0,01$; $Z_{\text{soil}} = Z_{\text{sea}} = 1 \text{ მ}$;
 $\text{rad} = 0,0023 \text{ მ}^{-1}$; $\Delta z = 0,05 \text{ სმ}$; $\zeta_1 = 3/16$; $\delta_0 = 100 \text{ მ}$; $c_p = 1,005 \times 10^3$
 ჯ/კგგრად ; $c_{\rho_{\text{soil}}} = 0,4 \text{ კალ/სმ}^3 \text{ გრად}$; $c_{\text{sea}} = 4,09 \text{ ჯ/გ.გრად}$;
 $L = 2,5 \times 10^6 \text{ ჯ/კგ}$; $w_0 = 2 \times 10^{-4} \text{ მ/წმ}$ PM2.5-ისთვის და $w_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ მ/წმ}$
 PM10-ისთვის.
 მზის დახრილობა $\psi = 22^\circ$ რაც შეესაბამება ივნისის თვეს. რაც შეეხება
 $K, L, M, \Delta x, \Delta y, \Delta \zeta, \Delta t$ მათი მნიშვნელობები იცვლება მოდელი-
 რებული კონკრეტული ამოცანის შესაბამისად.
 ამრიგად, ამოცანა დაიყვანება (14), (16), (17), (18), (20) ალგებრულ
 განტოლებთა სისტემის ამოხსნაში (15), (21)-(24) პირობების გამო-
 ყენებით.

თავი 2. ატმოსფეროში PM2.5 და PM10 ბანაჟილების ბანსაზღვრა ოპერატიული დაკვირვების და მასპერიმენტული გაზომვების საშუალებით

ატმოსფერული ჰაერის ხარისხს დიდად განსაზღვრავს მასში მტვრის და კერძოდ, PM-ნაწილაკების შემცველობა. PM-ნაწილაკები განსაკუთრებით საშიშია ადამიანის ჯანმრთელობისთვის, ვინაიდან მარტივად ხვდებიან შინაგან ორგანოებში და იწვევენ სხვადასხვა დაავადებას. გავითვალისწინებთ რა, ქ. თბილისისა და ქალაქის მიმდებარე ტერიტორიის გზატკეცილების გადატვირთვას ავტოტრანსპორტით და ურბანიზაციით განპირობებულ ინტენსიურ მშენებლობას, ეჭვს აღარ იწვევს მის ატმოსფეროში მიკრონაწილაკების შემცველობის კონტროლისა და შეფასების აუცილებლობა. ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე, გაანალიზებულია ქ. თბილისის ატმოსფერულ ჰაერში PM-ნაწილაკების კონცენტრაციები ოპერატიული დაკვირვებისა და ექსპერიმენტული გაზომვების მონაცემებზე დაყრდნობით. შეფასებულია მათი ყოველთვიური კონცენტრაციების მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები. განხილულია PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი და ყოველდღიური ცვლილების ტრენდი ქალაქის ჩვეული ცხოვრების რიტმისა და ფორსმაჟორულ სიტუაციებში.

2.1. ოპერატიული დაკვირვების მონაცემთა ანალიზი

თბილისში PM-ნაწილაკებით დაბინძურების მონიტორინგი დაიწყო 2017 წლიდან. დაკვირვება ხორციელდებოდა გარემოს ეროვნული სააგენტოს ერთ პუნქტზე, 2018-2020 წლებში ფუნქციონირებდა 5 სადამკვირვებლო პუნქტი, დღეისათვის კი - 3. ნახ. 2.1-ზე წარმოდგენილია 5 სადამკვირვებლო პუნქტის განლაგება.

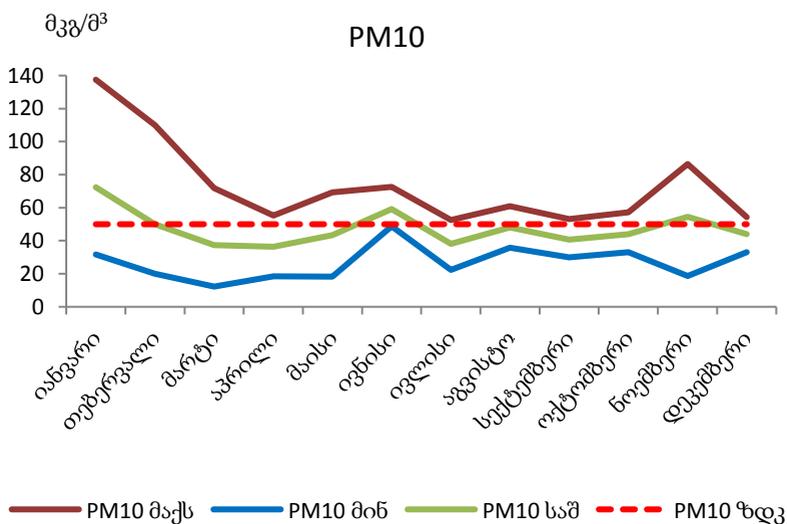
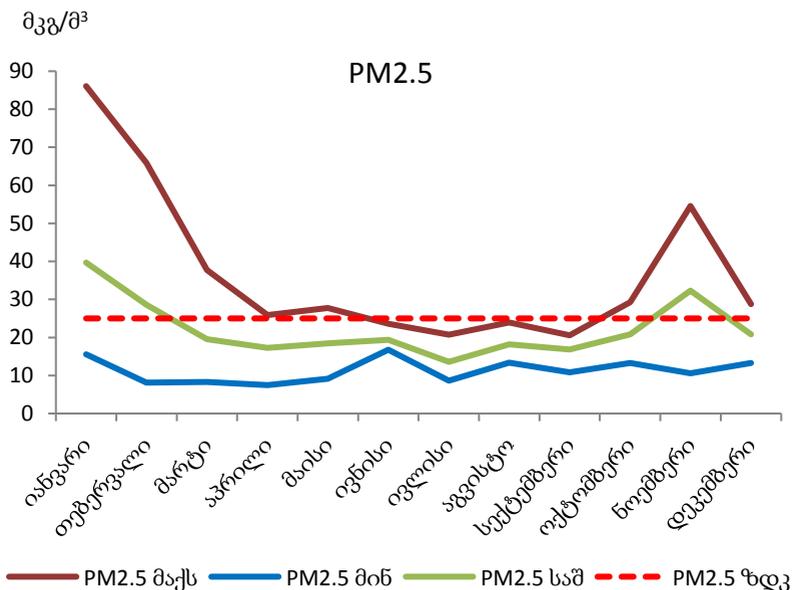
გაანალიზებულია გარემოს ეროვნული სააგენტოს 2019-2021 წლების მონაცემები [11]. ნახ. 2.2-ზე ნაჩვენებია 2019 წლის განმავლობაში PM-ნაწილაკების ყოველთვიური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო კონცენტრაციების ცვლილების გრაფიკები. შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება ვთქვათ, რომ თბილისის ატმოსფერულ ჰაერში PM2.5-ნაწილაკების კონცენტრაციები, როგორც წესი, ნაკლებია PM10-ის კონცენტრაციებზე, მაგრამ ცვლილების მრუდის ხასიათი ერთნაირია. მათი მაქსიმალური მნიშვნელობები თითქმის ყოველთვის აღემატება შესაბამის ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციებს (ზდკ), მინიმალური კი ყოველთვის ნაკლებია ზდკ-ზე, საშუა-

ლო მნიშვნელობები კი მხოლოდ ზამთრის პერიოდში აღემატება შესაბამის ზღვ-ს. გამონაკლისია PM10-ის საშუალო კონცენტრაცია ივნისის თვეში, რომელიც მეტია ზღვ-ზე, რაც შეიძლება განპირობებული იყოს მეტეოროლოგიური სიტუაციით.



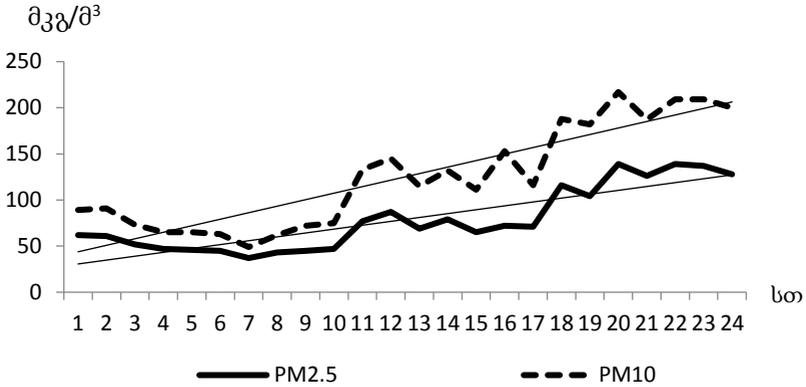
ნახ. 2.1. ატმოსფერული ჰაერის დამაბინძურებელ ინგრედიენტთა კონტროლის სადამკვირვებლო პუნქტების განლაგება

მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო კონცენტრაციები განვიხილოთ PM-ნაწილაკების კონცენტრაციების საათობრივი ცვლილება დღის განმავლობაში. მონაცემთა სრული ბაზა მოიცავს 2019-2021 წლების ყოველი თვის 5, 15 და 25 რიცხვში აგებულ საათობრივი მსვლელობის გრაფიკებს და მათ ტრენდებს. ტრენდმა გვიჩვენა, რომ დღის განმავლობაში PM-ნაწილაკების კონცენტრაცია ხასიათდება მატების ტენდენციით და თავის მაქსიმუმს აღწევს 19-21 საათებში. არსებობს გამონაკლისებიც, რაც განპირობებულია, სავარაუდოდ, ადგილობრივი ლოკალური პირობებით. მაგალითისთვის წარმოდგენილი გვაქვს 2019 წლის 15 იანვრისა და 15 ივლისის მონაცემები აკ.

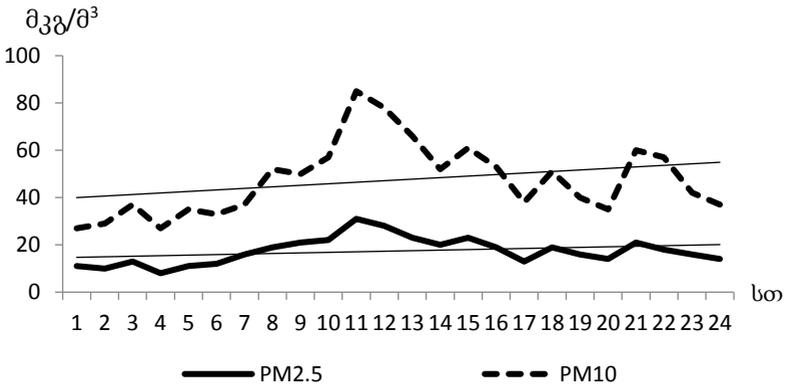


ნახ. 2.2. PM-ნაწილაკების 2019 წლის ყოველთვიური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო კონცენტრაციები

წერეთლის გამოიწვევა, ვინაიდან ამ პუნქტში უფრო აღინიშნება მაღალი კონცენტრაციები (ნახ. 2.3 და ნახ. 2.4).



ნახ. 2.3. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, 15 იანვარი



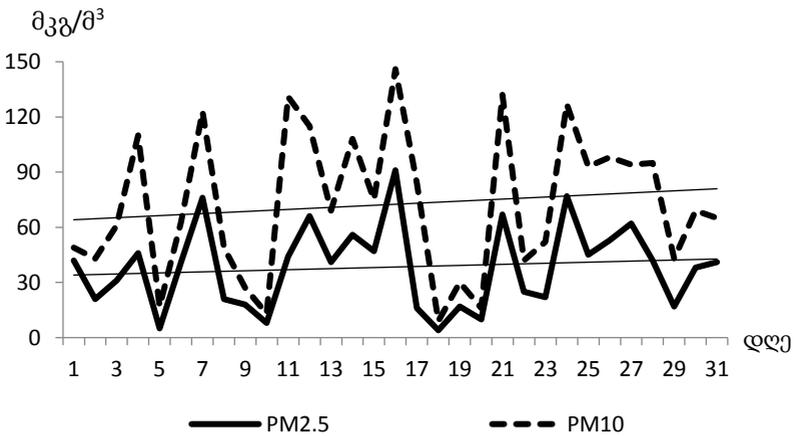
ნახ. 2.4. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, 15 ივლისი

ნახ. 2.3-დან ჩანს, რომ 15 იანვარს მაქსიმალური კონცენტრაციები PM2.5-ისა და PM10-სთვის ფიქსირდება 20 საათზე, შესაბამისად, 139 და 217 მკგ/მ³, რაც მეტია მათ ზღვ-ზე. ორივე ტრენდი დადებითია. 15 ივლისის კი კონცენტრაციათა მაქსიმუმები აღინიშნება დღის 11 საათზე, შესაბამისად 31 და 85 მკგ/მ³, რაც მეტია მათ ზღვ-ზე. ზოგადად, კონცენტრაციათა მაქსიმალური მნიშვნელობები დაიძირება დღის და საღამოს საათებში ყველა პუნქტზე, თუმცა დღიური

მსვლელობა განსხვავებულია, რასაც უდავოდ განაპირობებს ადგილობრივი ლოკალური მოვლენები.

2019 წლის PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობის ანალიზმა ზამთრის (იანვარი) და ზაფხულის (ივლისი) პერიოდში დღის 9, 13 და 18 საათებზე გვიჩვენა, რომ არ არის გამოხატული რაიმე სახის კანონზომიერება. იგივე სურათი განმეორდა 2020 და 2021 წლებში. მაგალითისთვის განვიხილოთ 2019 წლის იანვრისა და ივლისის თვეების მონაცემები აკ.წერეთლის გამზირზე (ნახ.2.5-2.10).

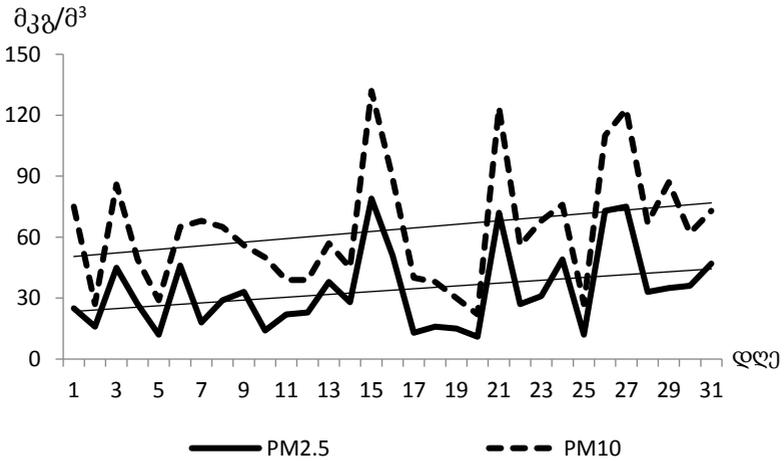
კონცენტრაციათა ყოველდღიური ცვლილების მრუდი ხასიათდება რხევის დიდი ამპლიტუდით და სისხირით, ხოლო ტრენდი ხან დადებითია, ხან უარყოფითი, რადგან PM-ნაწილაკების კონცენტრაციას ჰაერში დიდად განსაზღვრავს ადგილობრივი, ლოკალური პირობები.



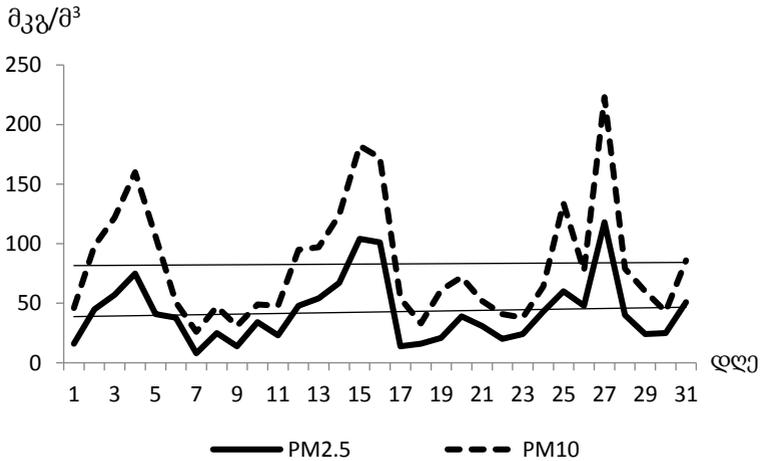
ნახ. 2.5. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, იანვარი, 9 სთ

ნახ. 2.11-ზე წარმოდგენილია PM2.5 და PM10-ის 2020 წლის ყოველთვიური აბსოლუტური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო მონაცემები. როგორც ნახაზებიდან ჩანს, ნაწილაკების კონცენტრაციები ზდკ-ს მნიშვნელობებს აჭარბებს ზამთრის პერიოდში, ხოლო გაზაფხული-ზაფხულის პერიოდში მათი კონცენტრაციები ნორმის

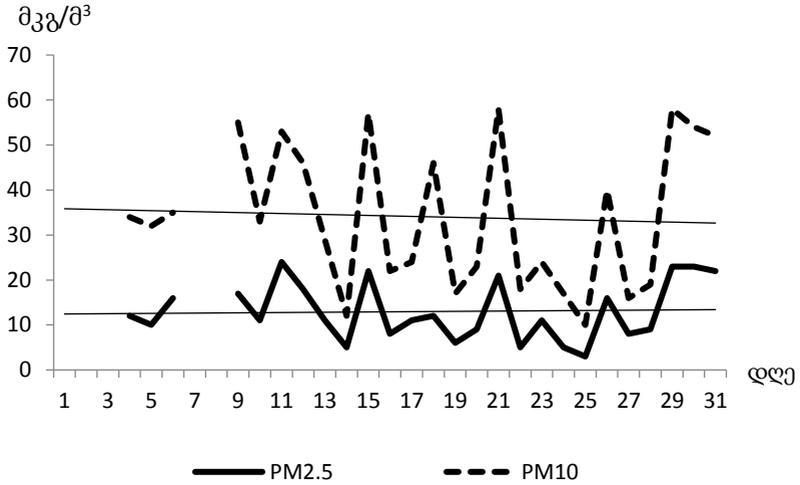
ფარგლებშია. კვლავ განმეორდა მიკრონაწილაკების კონცენტრაციათა მსვლელობის ხასიათი.



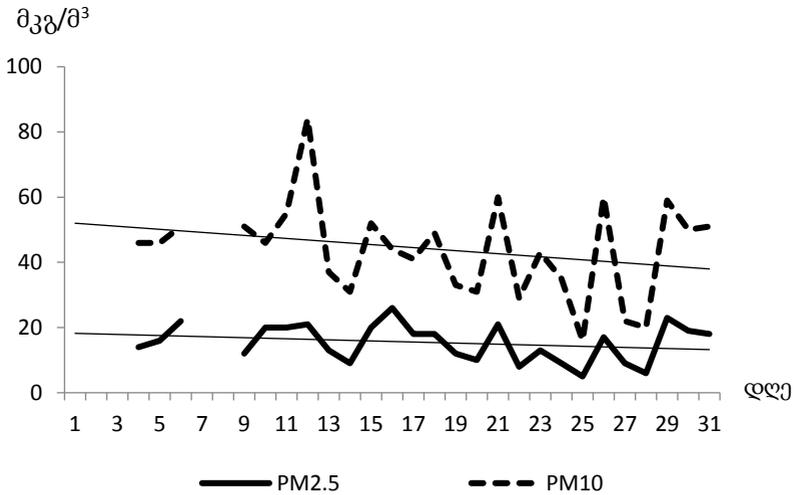
ნახ. 2.6. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, იანვარი, 13 სთ



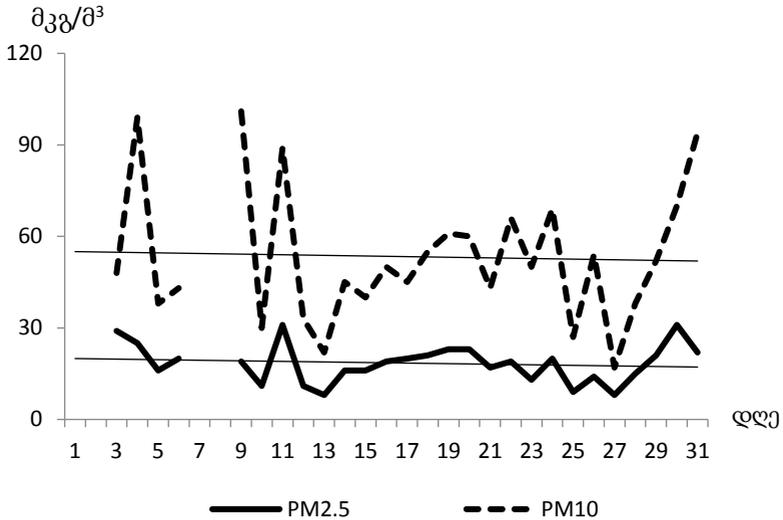
ნახ. 2.7. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, იანვარი, 18 სთ



ნახ. 2. 8. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, ივლისი, 9 სთ



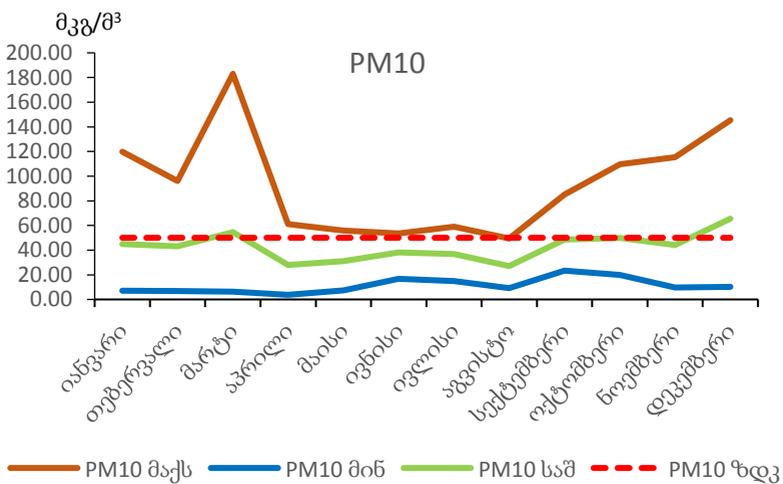
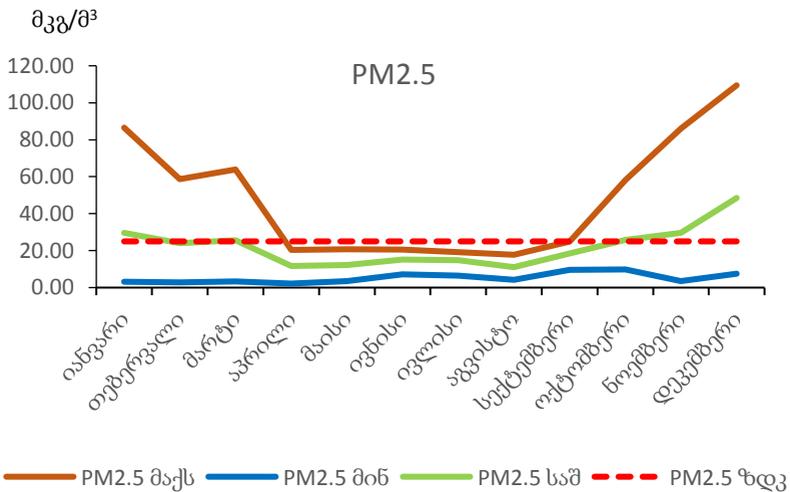
ნახ. 2.9. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, ივლისი, 13 სთ



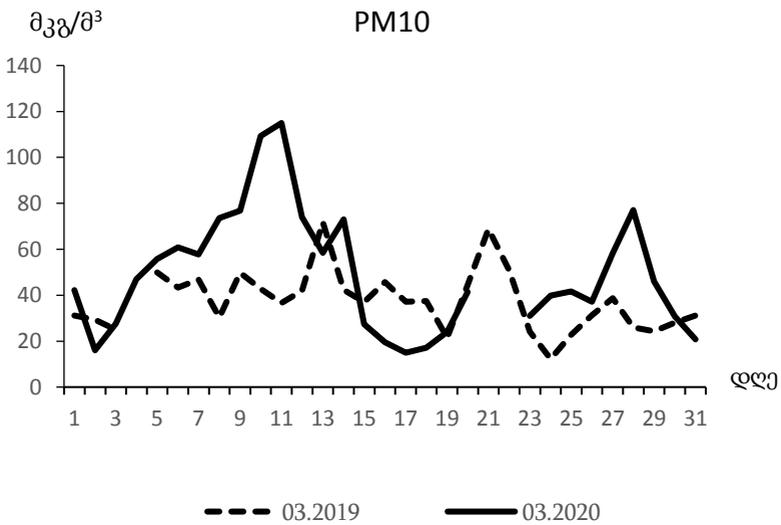
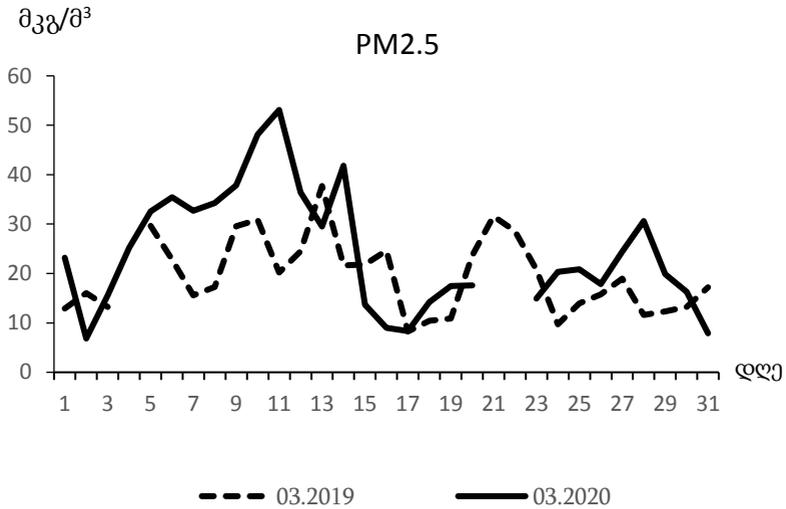
ნახ. 2.10. PM-ნაწილაკების კონცენტრაციათა ყოველდღიური მსვლელობა და ტრენდი აკ.წერეთლის გამზირზე, 2019 წლის, ივლისი, 18 სთ

გარკვეულ ინტერესს იწვევს 2019 და 2020 წლის მონაცემების შედარება, როცა საქართველოში დაფიქსირდა კორონა ვირუსის ინფექცია (27 თებერვალს). მანამდე ქვეყანა ცხოვრობდა ჩვეული ტემპით, რასაც იანვრისა და თებერვლის თვეების მონაცემთა ანალიზიც ადასტურებს.

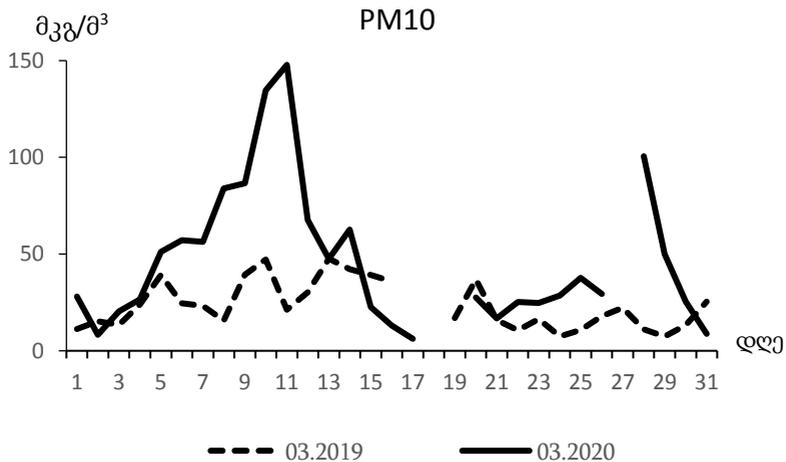
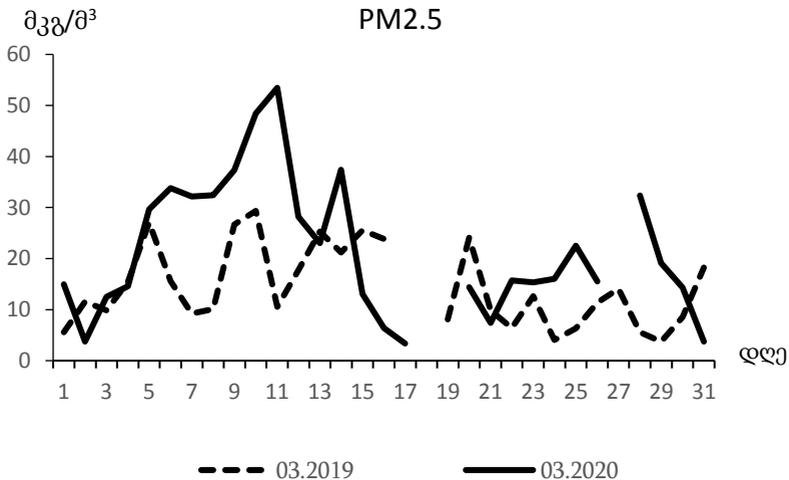
განსხვავებული სურათია მიღებული მარტისა და აპრილის თვეებში. ნახ. 2.12 და ნახ. 2.13-დან ჩანს, რომ 2020 წლის მარტის თვეში, 2019 წლის იმავე პერიოდთან შედარებით, მაღალი იყო PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაცია და ხშირად აღემატებოდა შესაბამის ზღვას, მარტის ბოლოს გამოიკვეთა კონცენტრაციების შემცირების ტენდენცია, რაც შეიძლება აიხსნას ამ პერიოდში კორონა ვირუსის გავრცელების გამო შეზღუდვების შემოღებით (დაიხურა ბევრი საჯარო დაწესებულება და შესაბამისად შემცირდა ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობა). ასეთი სურათი დაფიქსირდა ქ. თბილისის 5-ვე სადამკვირვებლო პუნქტზე.



ნახ. 2.11. PM2.5 და PM10-ის 2020 წლის ყოველთვიური აბსოლუტური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო კონცენტრაციები

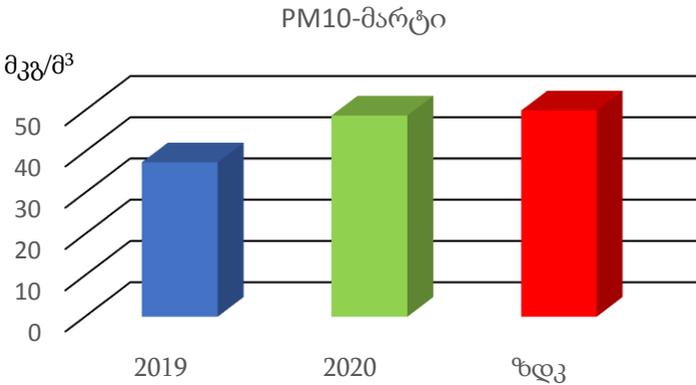
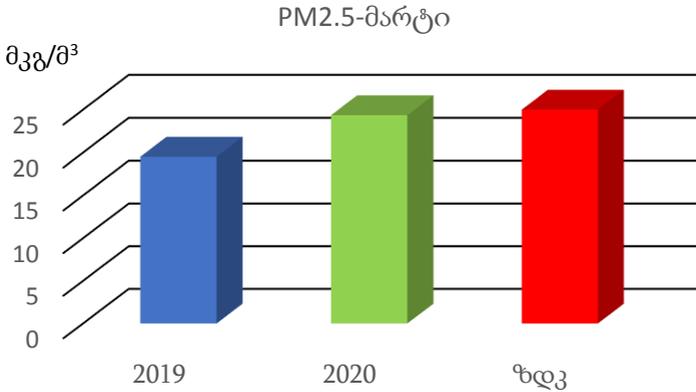


ნახ. 2.12. PM2.5 და PM10 კონცენტრაციების ცვლილების მრუდი 2019 და 2020 წლის მარტში (წერეთლის გამზირი)



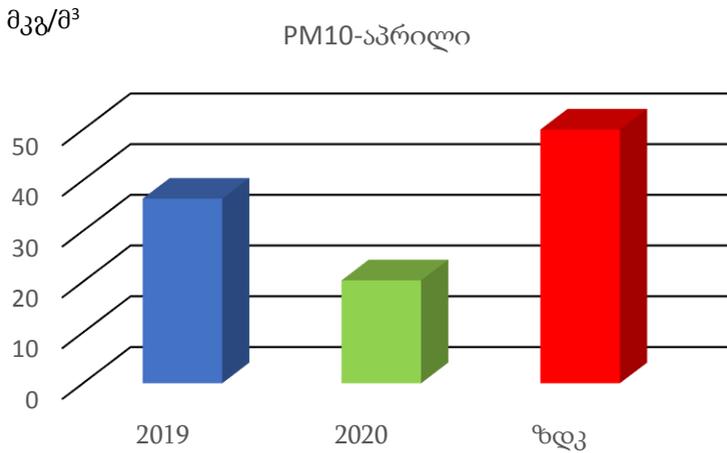
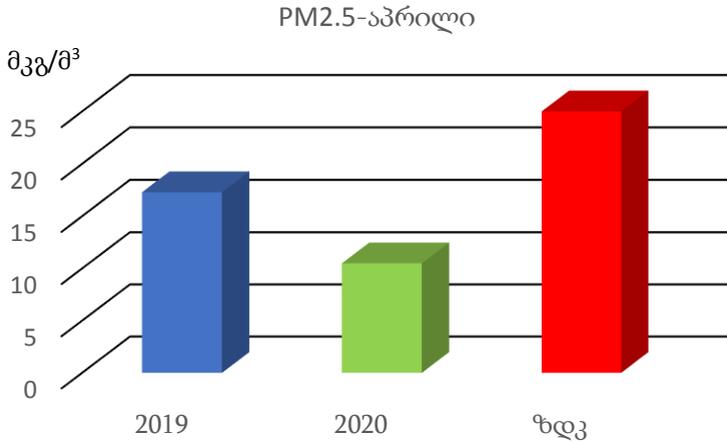
ნახ. 2.13. PM2.5 და PM10 კონცენტრაციების ცვლილების მრუდი 2019 და 2020 წლის მარტში (ვაშლიჯვარი)

შედარებულია, აგრეთვე, 2019 და 2020 წლების საშუალო თვიური მონაცემები ზემოთ ნახსენები არგუმენტის გასამყარებლად. ნახ. 2.14.-ზე ნაჩვენებია PM ნაწილაკების საშუალო მნიშვნელობები 2019 და 2020 წლების მარტის თვეში. 2020 წლის მნიშვნელობები გაცილებით აღემატება წინა წლის მონაცემებს (ასეთი ტენდენცია ჩანდა წინა თვეებშიც).



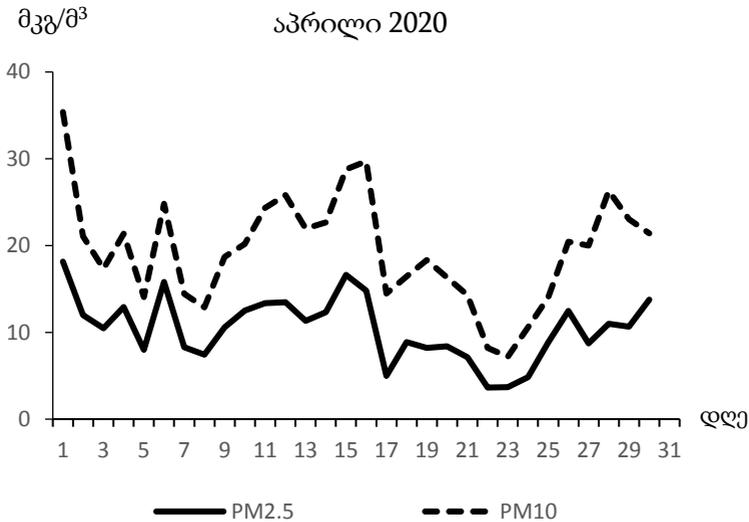
ნახ. 2.14. PM2.5 და PM10 საშუალო თვიური კონცენტრაციები 2019 და 2020 წლის მარტში

ხოლო შემდეგი ნახაზიდან, რომელზეც აპრილის თვის შედარებაა ნაჩვენები (ნახ.2.15), სხვა სურათს ვხედავთ. ამ შემთხვევაში 2020 წელს დაფიქსირებული კონცენტრაციები დაახლოებით 2-ჯერ ნაკლებია 2019 წელთან შედარებით და 2.5-ჯერ ნაკლებია შესაბამის ზღვ-ზე. ეს ფაქტიც აიხსნება იმით, რომ 2020 წლის აპრილის თვეში საქართველოს მასშტაბით გამოცხადდა საგანგებო მდგომარეობა და აიკრძალა ავტოტრანსპორტით მოძრაობა. განვიხილოთ თვის ჭრილ-ში ეს პერიოდი.



ნახ. 2.15. PM2.5 და PM10 საშუალო თვიური კონცენტრაციები 2019 და 2020 წლის აპრილში

ნახ. 2.16-ზე ნაჩვენებია PM ნაწილაკების ყოველდღიური მნიშვნელობები 2020 წლის აპრილის თვეში. 17 აპრილს გამოცხადდა სრული ლოქდაუნი, ე.ი აიკრძალა ყოველგვარი ავტოტრანსპორტით გადაადგილება, რაც აისახება დიაგრამაზე ყველაზე დაბალი მნიშვნელობებით (PM2.5-4.99 მკგ/მ³, PM10-14.48 მკგ/მ³).



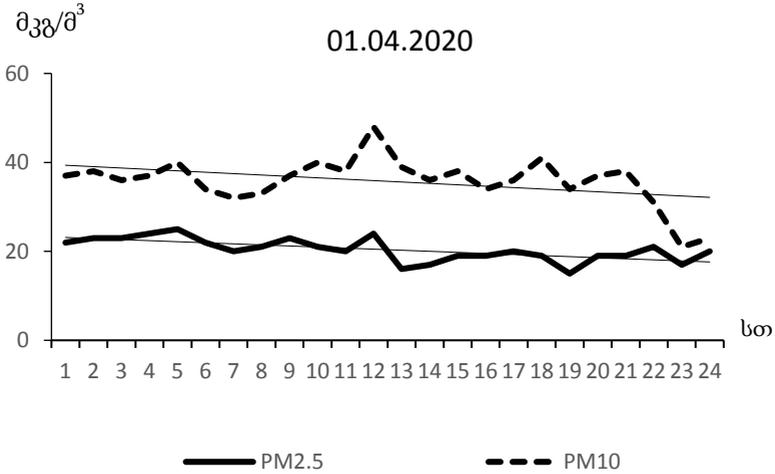
ნახ. 2.16. PM2.5 და PM10 ყოველდღიური კონცენტრაციები 2020 წლის აპრილში

ამავე თვის 27 და 28 რიცხვში, მხოლოდ 2 დღით გაიხსნა საქალაქთაშორისო საზღვრები ხალხის გადასადგილებლად და ეს ფაქტიც ნათლად აისახა კონცენტრაციის მატებაზე (ნახ. 2.16).

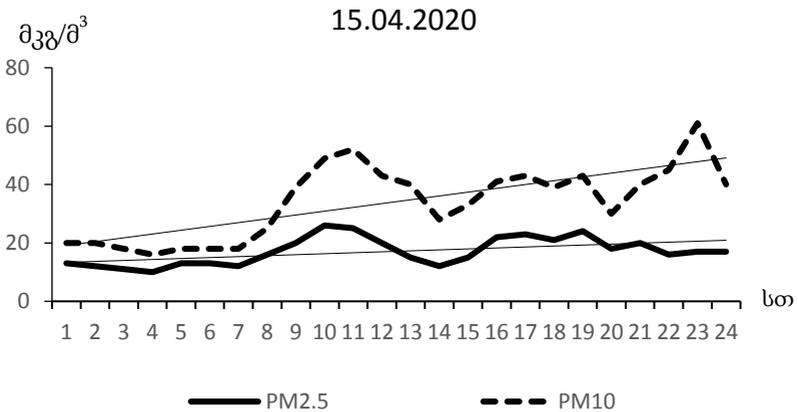
განხილულია ქ.თბილისში წერეთლის გამზირზე 2020 წლის აპრილში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი ცვლილების გრაფიკები. ატმოსფეროში კონცენტრაციის ცვლილებამ (ნახ. 2.17 და ნახ. 2.18) გვიჩვენა, რომ აპრილის თვის 1-15 რიცხვამდე PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები დილის საათებში მინიმალურია, მერყეობს 10-20 მკგ/მ³-ის ფარგლებში, ხოლო დღის განმავლობაში ხასიათდება ზრდის ტენდენციით, მაქსიმალური კონცენტრაციები დაფიქსირებულია 11-12 და 22-24 საათების ინტერვალში. ამ პერიოდში ატმოსფეროში PM10-ის კონცენტრაცია აჭარბებს შესაბამისი ზღვას მნიშვნელობას (50 მკგ/მ³).

აპრილის მეორე ნახევარში ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები მნიშვნელოვნად შემცირდა, რაც განაპირობა 2020 წლის 17 აპრილიდან გამოცხადებულმა საგანგებო სიტუაციამ (ნახ. 2.19). კერძოდ, დილის საათებში მათი მნიშვნელობა არის

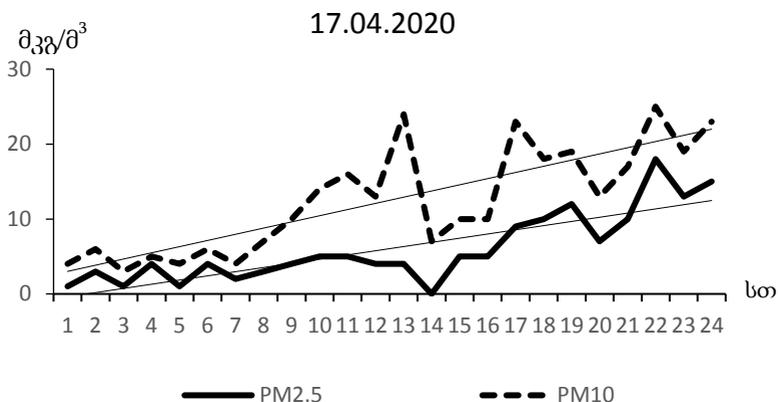
მინიმალური და მერყეობს 1-4 მკგ/მ³-ის ფარგლებში, დღის განმავლობაში შენარჩუნებულია მატების ტენდენცია, ხოლო ღამის პიკი არ აღემატება 25 მკგ/მ³.



ნახ. 2.17. ავ. წერეთლის გამზირზე 2020 წლის 1 აპრილს PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი

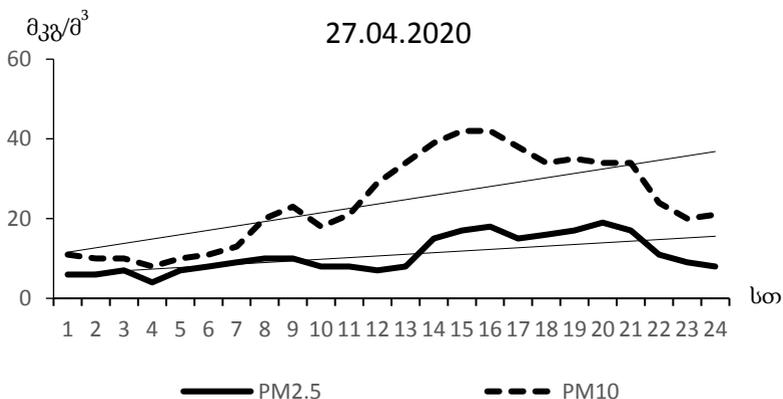


ნახ. 2.18. ავ. წერეთლის გამზირზე 2020 წლის 15 აპრილს PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი



ნახ. 2.19. ავ. წერეთლის გამზირზე 2020 წლის 17 აპრილს PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი

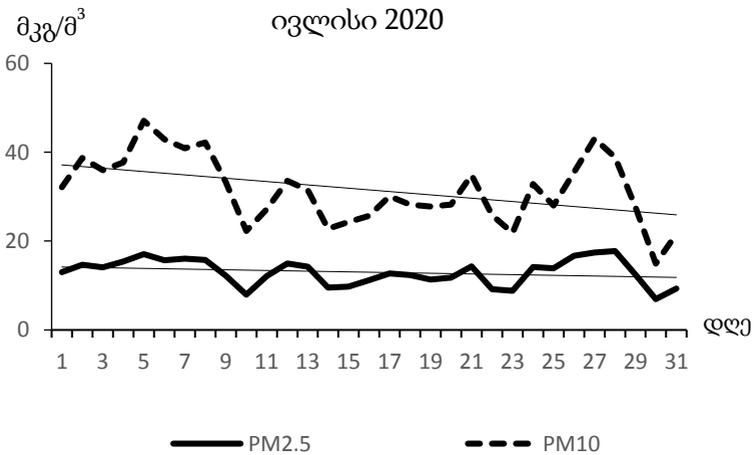
ასეთი სურათი გრძელდება აპრილის თვის 27-28 რიცხვებამდე. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ამ რიცხვებში შეზღუდვები მოიხსნა 2 დღით, როცა თბილისში დაბრუნდა ქალაქიდან გასული მოსახლეობის დიდი უმრავლესობა, გაიზარდა ტრანსპორტის ნაკადი, რაც თვალნათლივ აისახა ატმოსფეროში PM2.5 და PM10-ის შემცველობაზე (ნახ.2.20), მათმა კონცენტრაციამ შესაბამის ზღვ-საც კი მიაღწია.



ნახ. 2.20. ავ. წერეთლის გამზირზე 2020 წლის 27 აპრილს PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი მსვლელობა და ტრენდი

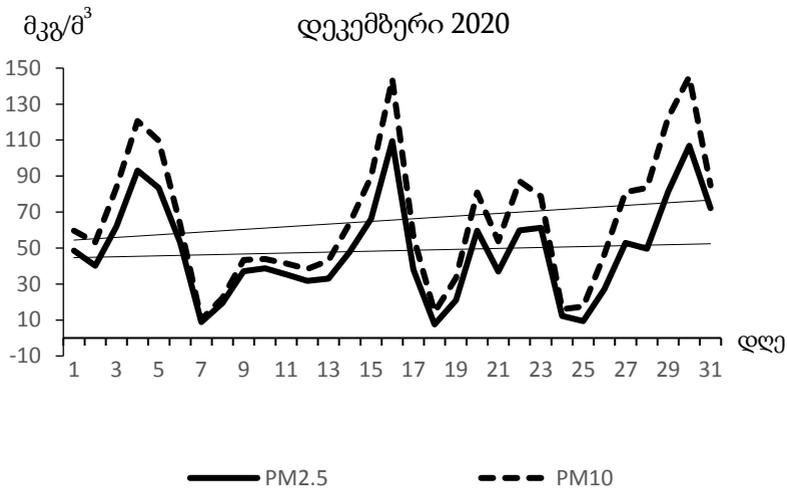
ტრენდებმა გვიჩვენა, რომ დღის განმავლობაში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაცია ნებისმიერ სიტუაციაში ხასიათდება მატების ტენდენციით და თავის მაქსიმუმს აღწევს 19-21 საათებში (თუმცა არსებობს გამონაკლისებიც, რაც, სავარაუდოდ, განპირობებულია ადგილობრივი ლოკალური პირობებით).

2020 წლის აპრილიდან სექტემბრის თვის ჩათვლით ატმოსფეროში PM ნაწილაკების კონცენტრაციების მსვლელობა პრაქტიკულად არ იცვლებოდა, ამიტომ მაგალითის სახით ნახ. 2.21-ზე ნაჩვენებია ივლისის თვის გრაფიკი. მაქსიმალური კონცენტრაციებიც კი არ აჭარბებს შესაბამის ზღვ-ს.



ნახ. 2.21. PM2.5 და PM10 ყოველდღიური კონცენტრაციები და ტრენდი 2020 წლის ივლისში

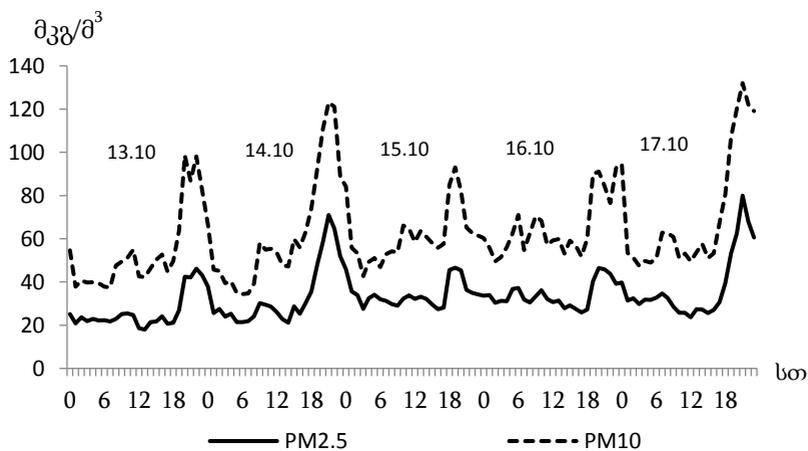
სექტემბრის თვიდან აღინიშნება კონცენტრაციების მატება, შესაბამისად, ტრენდიც დადებითია და კონცენტრაცია მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს დეკემბრის თვეში (ნახ. 2.22). კონცენტრაციების საკმაოდ დიდი რხევის ამპლიტუდით და მაქსიმალური მნიშვნელობების სიუხვით გამოირჩევა დეკემბრის თვე და უნდა აღინიშნოს, რომ სავარაუდოდ მაღალი კონცენტრაციები დაფიქსირებულია ნისლიან დღეებში, ვინაიდან დეკემბერი გამოირჩეოდა ასეთი დღეების სიუხვით.



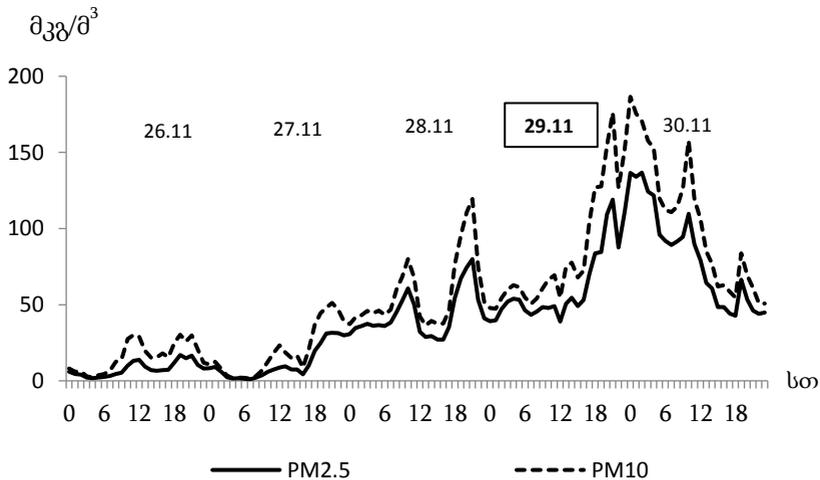
ნახ. 2.22. PM2.5 და PM10 ყოველდღიური კონცენტრაციები და ტრენდი 2020 წლის დეკემბერში

PM ნაწილაკების საათობრივი მსვლელობების ანალიზმა 5 დღიან ინტერვალში დაგვანახა, რომ, როგორც წესი, ყველაზე მაღალი კონცენტრაციები ფიქსირდება დღის მეორე ნახევარში, 20 საათის შემდეგ. მაგალითისათვის ნახ. 2.23-ზე წარმოგიდგენთ 2020 წლის ოქტომბრის თვის მონაცემებს.

ნახ. 2.24-ზე წარმოდგენილია ნოემბრის თვის ბოლო 5 დღის საათობრივი მსვლელობის გრაფიკი. როგორც ნახაზიდან ჩანს 26-დან 28 რიცხვის ჩათვლით ძალიან დაბალი კონცენტრაციები ფიქსირდება, ვინაიდან 24 ნოემბრიდან (პანდემიის მეორე ტალღის დროს) შეიზღუდა ავტოტრანსპორტით მოძრაობა, დაიკეტა მაღაზიები და ბევრი საჯარო სამსახური გადავიდა დისტანციურ რეჟიმზე. თუმცა 29 ნოემბერს, ე.წ. „შვჰ პარასკევს“, თბილისის მასშტაბით გაიზარდა ტრანსპორტის მოძრაობა, რამაც შესაბამისად გამოიწვია მიკრონაწილაკების კონცენტრაციების მკვეთრი მატება ამ 2 დღის განმავლობაში. მაქსიმალურმა კონცენტრაციამ მიაღწია PM2.5-სთვის - 136.59 მკგ/მ³ და PM10-ისთვის - 186.54 მკგ/მ³, რაც 4-ჯერ და 5-ჯერ აღემატება მათ შესაბამის ზღვრებს.

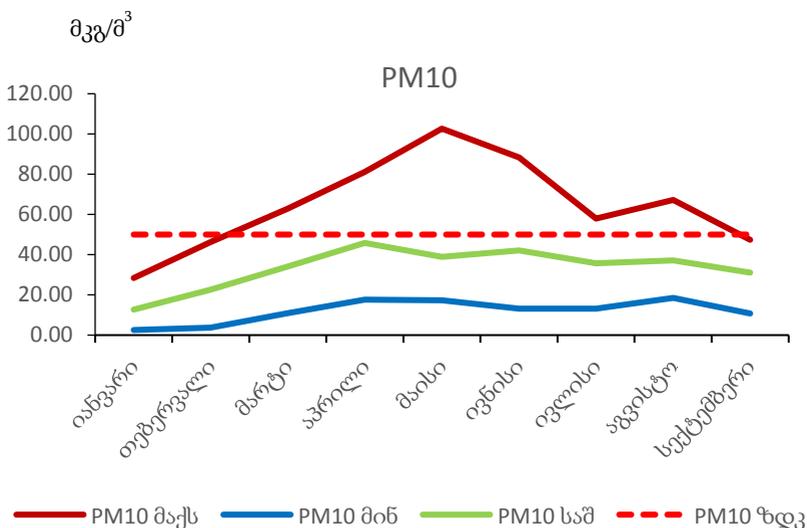
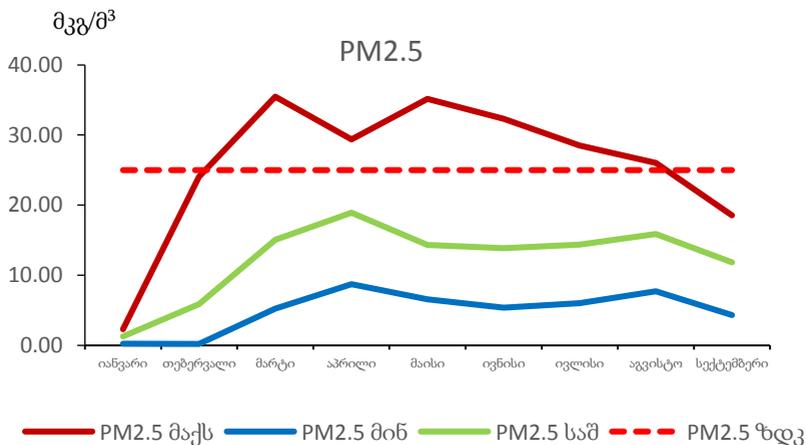


ნახ. 2.23. PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები საათობრივი მსვლელობა 2020 წლის 13-17 ოქტომბერი



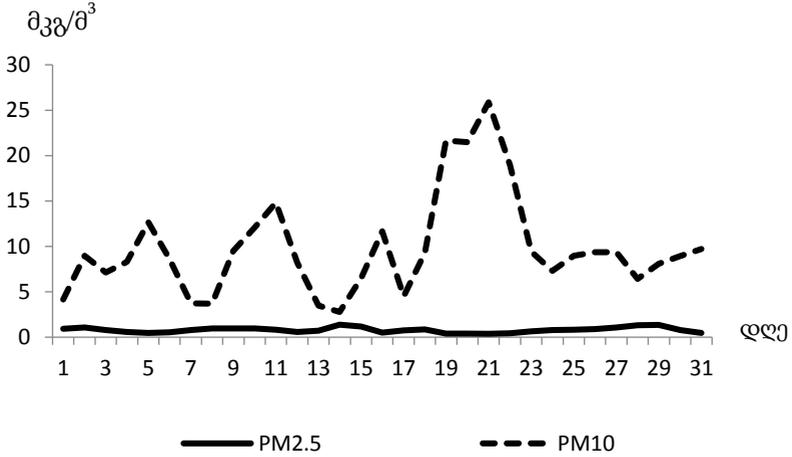
ნახ. 2.24. PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები საათობრივი მსვლელობა 2020 წლის 26-30 ნოემბერი

განსხვავებული სურათი გამოვლინდა 2021 წელს, როცა მიკრო-ნაწილაკების კონცენტრაციებმა ზღვ-ს მნიშვნელობებს გადააჭარბა მხოლოდ ზაფხულის პერიოდში. ნახ. 2.25-ზე ნაჩვენებია PM2.5 და PM10 -ის 2021 წლის სექტემბრის ჩათვლით ყოველთვიური აბსოლუტური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო მონაცემები.

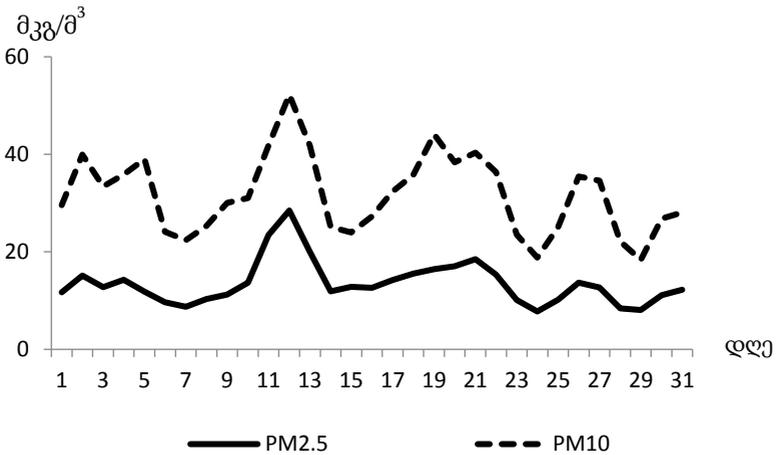


ნახ. 2.25. PM2.5 და PM10-ის 2021 წლის იანვარი-სექტემბრის თვეების აბსოლუტური მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო კონცენტრაციები

ნახ. 2.26-2.27-ზე მოცემულია 2021 წლის იანვრისა და ივლისის თვეებში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების ყოველდღიური მონაცემები.



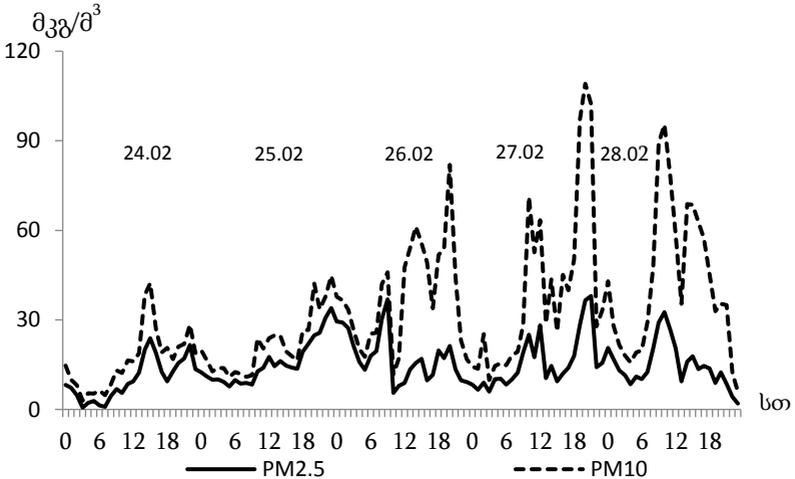
ნახ. 2.26. PM2.5 და PM10 ყოველდღიური კონცენტრაციები 2021 წლის იანვარში



ნახ. 2.27. PM2.5 და PM10 ყოველდღიური კონცენტრაციები 2021 წლის ივლისში

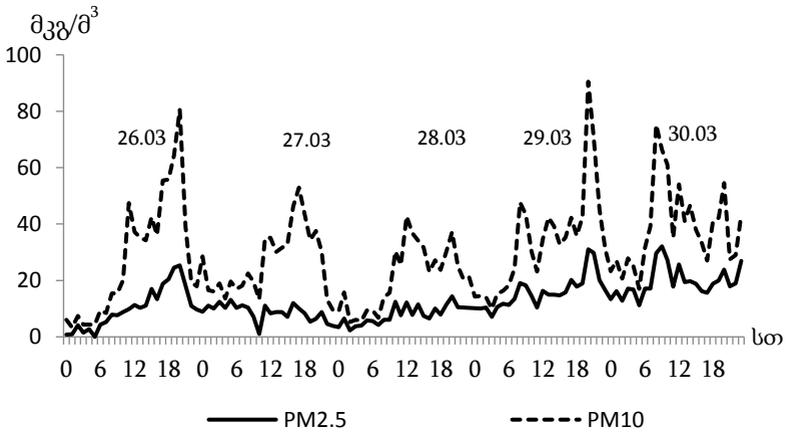
როგორც ნახაზებიდან ჩანს, იანვრის თვეში დაფიქსირდა PM ნაწილაკების დაბალი კონცენტრაციები, კერძოდ, ატმოსფეროში PM2.5-ის შემცველობა არ აღემატება 1 მკგ/მ³, ხოლო PM10-ის - 2-ჯერ ნაკლებია შესაბამის ზდკ-ზე. ზაფხულის პერიოდში ატმოსფეროში მიკრონაწილაკების კონცენტრაციები გაიზარდა და ზოგჯერ ზდკ-საც კი გადააჭარბა, ივლისის თვეში PM2.5-ის შემცველობა გაუტოლდა 28,48 მკგ/მ³ და PM10-ის 52,22 მკგ/მ³.

2021 წლის თებერვლიდან იწყება ატმოსფეროში PM ნაწილაკების კონცენტრაციების ზრდა. საათობრივმა მსვლელობამ აჩვენა, რომ დღის განმავლობაში ფიქსირდება ორი პიკი, 12-14 და 20-22 საათებში (ნახ.2.28-2.30).

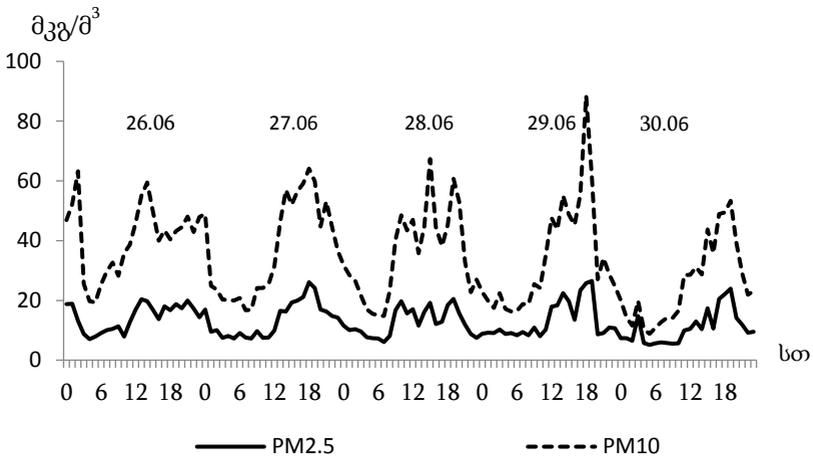


ნახ. 2.28. PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები საათობრივი მსვლელობა 2021 წლის 24-28 თებერვალი

ოპერატიული დაკვირვების მონაცემთა ანალიზმა დაგვანახა, რომ თბილისის ატმოსფეროში PM2.5-ნაწილაკების კონცენტრაციები, როგორც წესი, ნაკლებია PM10-ის კონცენტრაციებზე, მაგრამ მათი ცვლილების მრუდის ხასიათი ერთნაირია. ჩვეული ცხოვრების რიტმის დროს, მათი მაქსიმალური მნიშვნელობები თითქმის ყოველთვის აღემატება შესაბამის ზდკ-ს, მინიმალური კი ყოველთვის ნაკლებია ზდკ-ზე, ხოლო საშუალო მნიშვნელობები მხოლოდ ზამთრის პერიოდში აღემატება შესაბამის ზდკ-ს.



ნახ. 2.29. PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები საათობრივი მსვლელობა 2021 წლის 26-30 მარტი



ნახ. 2.30. PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციები საათობრივი მსვლელობა 2021 წლის 26-30 ივნისი

PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საათობრივი ცვლილების ტრენდმა გვიჩვენა, რომ დღის განმავლობაში PM-ნაწილაკების

კონცენტრაცია ძირითადად ხასიათდება მატების ტენდენციით და თავის მაქსიმუმს აღწევს 20 საათის შემდეგ. ჩატარებულმა ანალიზმა გვიჩვენა პანდემიის გავლენა მტვრის ნაწილაკების კონცენტრაციის შემცირებაზე ქალაქის ატმოსფეროში და ნათლად დაგვანახა, რომ თბილისის ატმოსფეროს PM-ნაწილაკებით დაბინძურებაში ძირითადი წვლილი შეაქვს ავტოტრანსპორტს.

2.2. ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგები

ქ. თბილისში და მისი შემოგარენის ატმოსფეროში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების განსაზღვრის მიზნით 2020-2021 წლებში მობილური აპარატებით Aeroqual Series 500 და TROTEC PC220 (ნახ. 2.31) ჩატარდა ექსპერიმენტული გაზომვები.



Aeroqual Series 500



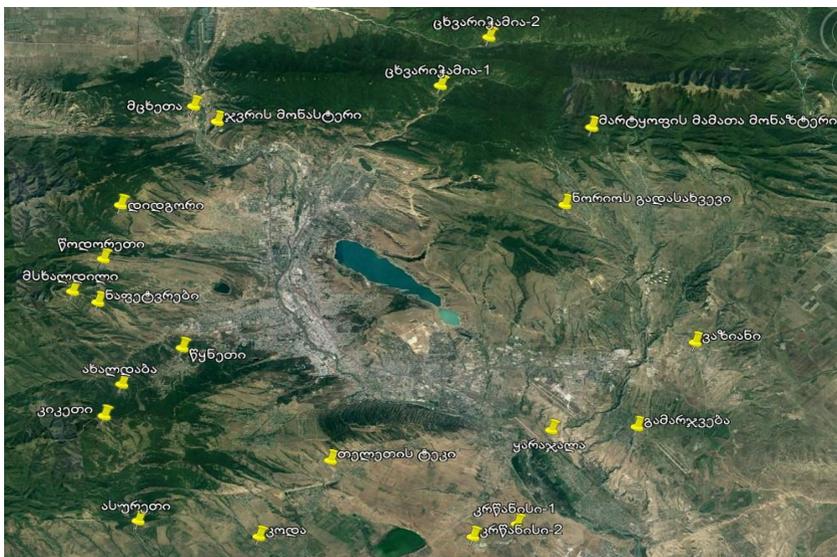
TROTEC PC220

ნახ. 2.31. ატმოსფეროში PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების განმსაზღვრელი მობილური აპარატები

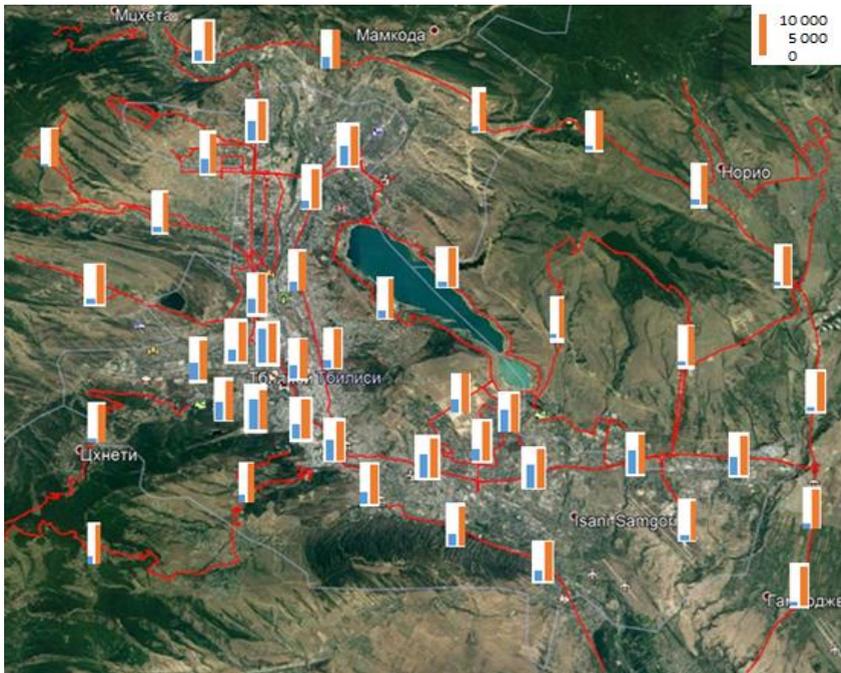
გაზომვების არეალი მოიცავდა თბილისის ძირითად ავტომაგისტრალებს და მთავარ ქუჩებს, ასევე შემოგარენის ბევრ სოფელს და დაბას. დაკვირვების ტრასიზის ჯამური სიგრძე დაახლოებით 650 კმ-ია (ნახ. 2.32 - ნახ. 2.34), ხოლო გაზომვების პუნქტების რაოდენობა - 400-მდე. კონცენტრაციები განისაზღვრებოდა 10-წუთიანი გასაშუალებით.



ნახ. 2.32. საველე გაზომვების ტრასების სქემა. დაკვირვების დრო 11–21 სთ.



ნახ. 2.33. ქ. თბილისის შემოგარენში ჩატარებული საველე გაზომვების პუნქტები



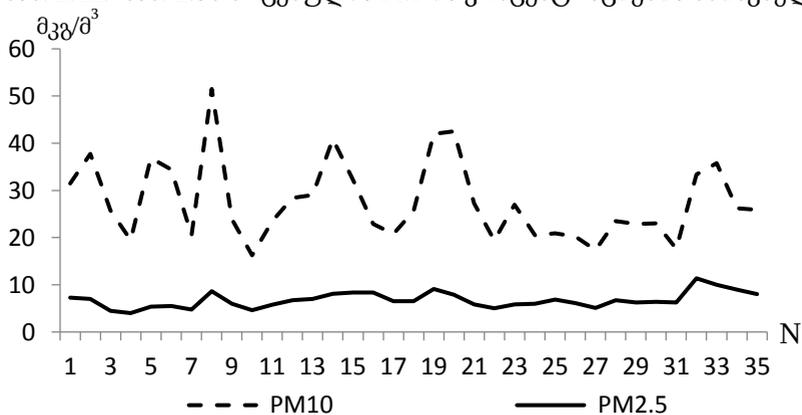
ნახ. 2.34. ქ. თბილისში ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის სვეტური დიაგრამა

ქ. თბილისის ატმოსფეროს მიკრონაწილაკებით დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ავტოტრანსპორტი. ნახ. 2.34 -ზე ნაჩვენებია ქალაქის ძირითად ავტომაგისტრალებზე ავტომობილების მოძრაობის ინტენსივობა გაზომილი ე.წ. „პიკის საათებში“. ნახ. 2.34-დან ჩანს, რომ მოძრაობის ინტენსივობა იცვლება 1200 ავტ./სთ-დან (ქ. თბილისის შემოვლითი გზა) 8500 ავტ./სთ-ის (გმირთა მოედანი, კოსტავას ქ.) ფარგლებში. ექსპერიმენტული გაზომვებით მიღებული კონცენტრაციების გასაშუალოებული მონაცემები ილუსტრირებულია ნახ. 2.35-ზე. მიღებული იქნა, რომ მოძრაობის მაქსიმალური ინტენსივობის დროს ატმოსფეროს PM-ით დაბინძურების დონე იცვლება ფართო დიაპაზონში. გამოიკვეთა მაქსიმალური (აღმაშენებლის ხეივანი, გმირთა მოედანი, გლდანის ხიდები, აეროპორტის ტრასა) და მინიმალური (თბილისის ზღვა და მისი მიმდებარე ტერიტორია, წყნეთი, სოფ. დილომი, ლისის ტბის მიმდებარე ტერიტორია) დაბინძურების უბნები.



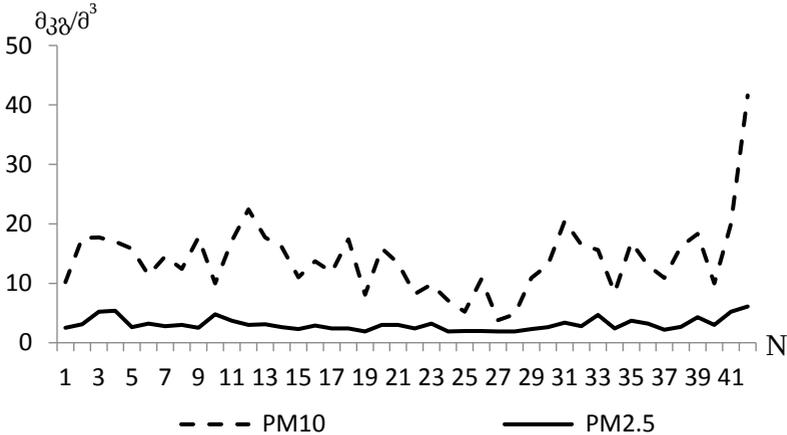
ნახ. 2.35. ქ. თბილისის და მიმდებარე ტერიტორიაზე სავსე გაზომვებით მიღებული PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების სვეტური დიაგრამა (ლურჯი - PM10, წითელი - PM2.5)

კონკრეტული გაზომვების შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 2.36-ნახ. 2.42. ნახ. 2.36 მოცემულია PM-ის კონცენტრაციების მნიშვნელო-



ნახ. 2.36. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობებიტრასაზე: აღმაშენებლის ხეივანი, მარჯვენა სანაპირო, ორთაჭალა, რუსთავის გზატკეცილი. 10.06.2020.

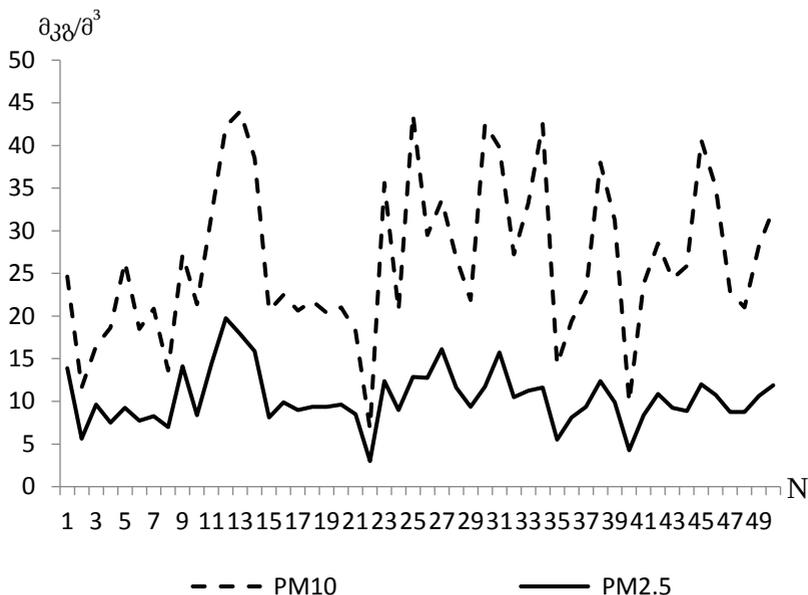
ბები ტრასზე, რომელიც მოიცავს შემდეგ მონაკვეთებს: დავით აღმაშენებლის ხეივნიდან რუსთავის გზატკეცილიამდე. გაზომვები ჩატარებულია ტრასის გასწვრივ მდებარე N = 35 წერტილში .



ნახ. 2.37. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: ზაჰესი, სოფ. გლდანი, მამკოგის გადასახვევი, ნორიოს გადასახვევი, სოფ. გამარჯვება, ყარაჯალარი. 14.07.2020.

მონაცემთა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ PM2.5-ის კონცენტრაცია ყველა წერტილში ნაკლებია ზღვ-ზე (25 მკგ/მ³). რაც შეეხება PM10-ს მისი კონცენტრაციები შედარებით მაღალია და დიღმის მასივის დასაწყისში მიაღწია ზღვ-ს მნიშვნელობას (50მკგ/მ³). ნახ. 2.37 მოცემულია PM-ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე, რომელიც მოიცავს თბილისის შემოვლით გზას ზაჰესიდან ყარაჯალარამდე. ამ უბანზე PM2.5-ის კონცენტრაცია იცვლებოდა 2.5-6 მკგ/მ³ ინტერვალში, PM10-ისთვის ეს მნიშვნელობები მერყეობდა 10-25მკგ/მ³-ის ფარგლებში. გამონაკლისია სოფელი ყარაჯალარი, სადაც PM10-ის კონცენტრაცია ტოლია 50 მკგ/მ³-ს რაც გამოწვეულია გაჯის საწარმოების ფუნქციონირებით.

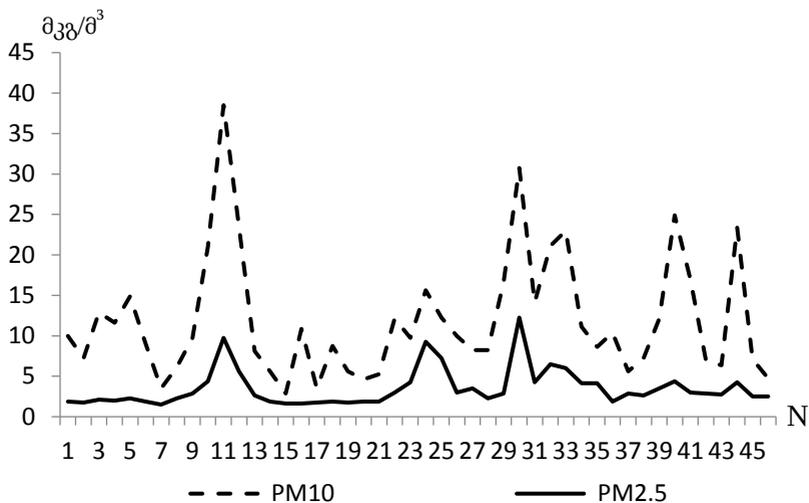
PM-ის კონცენტრაციების განსაკუთრებული ვარიაციით ხასიათდება თბილისის ზღვის მიმდებარე ტერიტორია, სადაც მათი კონცენტრაცია იცვლებოდა 4-20 მკგ/მ³-ის (PM2.5) და 12-45 მკგ/მ³-ის (PM10) ფარგლებში ნახ. 2.38.



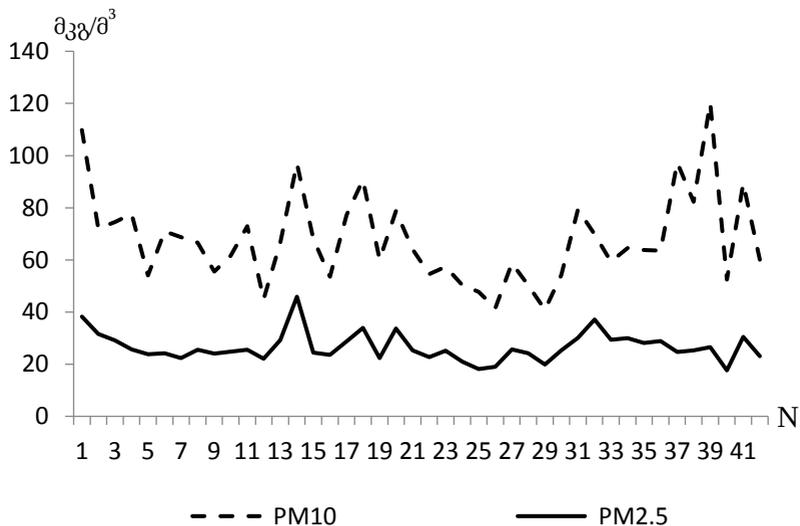
ნახ. 2.38. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: თბილისის ზღვის ირგვლივ, ვაზისუბანი მესამე მასივი, ვარკეთილი, 25.09.2020.

ყურადღებას გავამახვილებთ იმ ფაქტზე რომ ტრასის გასწვრივ ყველა წერტილში PM2.5 და PM10 -ის კონსენტრაციების ცვლილების ხასიათი თანხვედრილია, ასეთივე სურათი მეორდება შესწავლილი ტრასების გასწვრივ მაგალითად ნახ. 2.39. რომელზეც მოცემულია ტრასის მონაკვეთი სოფ. ნორიოდან სოფ. პატარა ლილომდე ამ მონაკვეთზე PM2.5-ის კონცენტრაცია იცვლებოდა 2.5-12 მკგ/მ³ და PM10-ის 5-40 მკგ/მ³ -ის ფარგლებში.

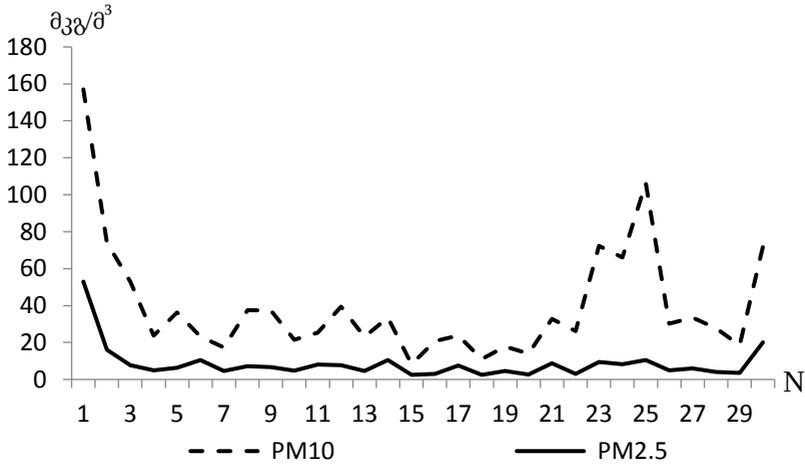
PM2.5-ის და PM10-ის განსაკუთრებით მაღალი მნიშვნელობები დაფიქსირდა შესწავლილი ტრასის მონაკვეთებზე: გლდანის ხიდები-აეროპორტის გზა (ნახ. 2.40) და გლდანის ხიდები-დიდი ილომი (ნახ. 2.41). ნახ. 2.40-დან ჩანს რომ 2020 წლის 16 ოქტომბერს ტრასის მთელი მონაკვეთის გასწვრივ PM2.5-ის და PM10-ის კონცენტრაცია განსაკუთრებულად მაღალია და იცვლება PM2.5-ის 20-50 მკგ/მ³ და PM10-ის 50-120 მკგ/მ³ -ის ფარგლებში. 2020 წლის 21 ოქტომბერს (ნახ. 2.41) ჩატარდა გაზომვები გლდანის ხიდები - დიდი დილომი.



ნახ. 2.39. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: სოფ. ნორიო, სოფ. მარტყოფი, სოფ. დიდი ლილო, სოფ. პატარა ლილო 20.10.2020.

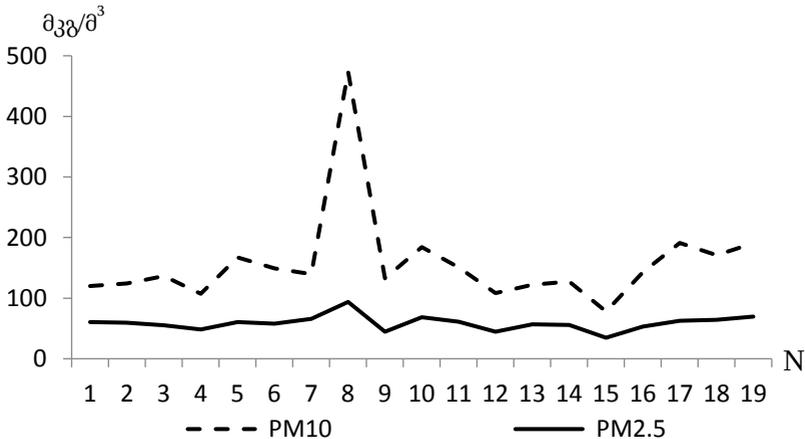


ნახ. 2.40. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: გლდანის ხიდეზი, გურამიშვილის გამზირი, დადიანის ქ., მარცხ. სანაპ. წურწუმის ქ, ორხევი, აეროპორტის გზა. 16.10.2020.



ნახ. 2.41. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: გლდანის ხიდები, ზელიაშვილის ქ., ვახუშტის ხიდი, გაგარინის ქ., გელოვანის გამზირი,სავადმყოფოები, დიდი დილომი 21.10.2020.

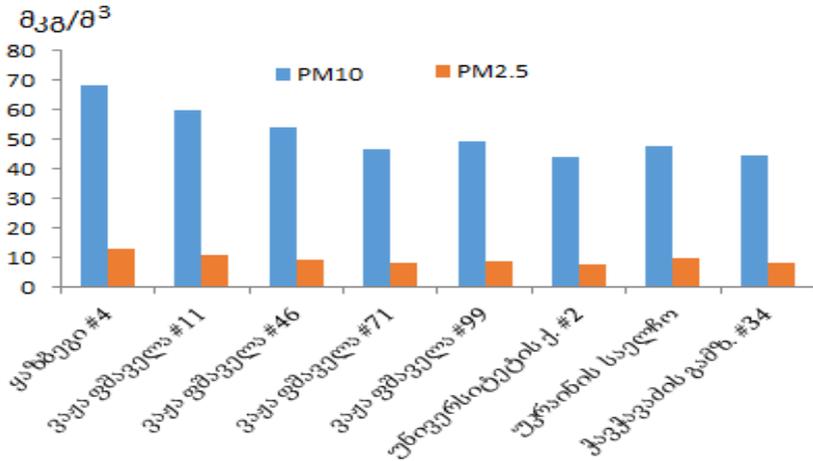
გამოიკვეთა განსაკუთრებულად დაბინძურებული ორი უბანი გლდანის ხიდები და დიდი დილომი. გლდანის ხიდებთან PM2.5-ის კონცენტრაცია იყო 58, PM10-ის -160 მკგ/მ³. დიდი დილომის ტერიტორიაზეც დაფიქსირდა მაღალი კონცენტრაცია დიაპაზონში 80-100 მკგ/მ³.



ნახ. 2.42. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ტრასაზე: კარსანი, მუხადგვ. სასაფ., სოფ. დილომი, თელოვანი, დიდგორი, ძვ. ვეძისი, ვაშლიჯვ. ქვ. ლისი. 22.12.2020.

2020 წლის დეკემბერში ქ. თბილისის ატმოსფეროში დაფიქსირდა PM2.5 და PM10-ის კონცენტრაციების საკმაოდ დიდი რხევა და მაღალი მნიშვნელობები. რაც სავარაუდოდ განპირობებული იყო ამ თვეში ნისლიან დღეთა სიუხვით (ნახ. 2.42). ამ პერიოდში ჩატარებულმა გაზომვებმა დააფიქსირა მიკრონაწილაკების განსაკუთრებით მაღალი კონცენტრაციები (ნახ. 2.42) კარსანი-ქვემო ლისის ტრასის გასწვრივ, სადაც მუხადგვერდის სასაფლაოს ტერიტორიაზე PM10-ის კონცენტრაციამ მიაღწია 500 მკგ/მ³.

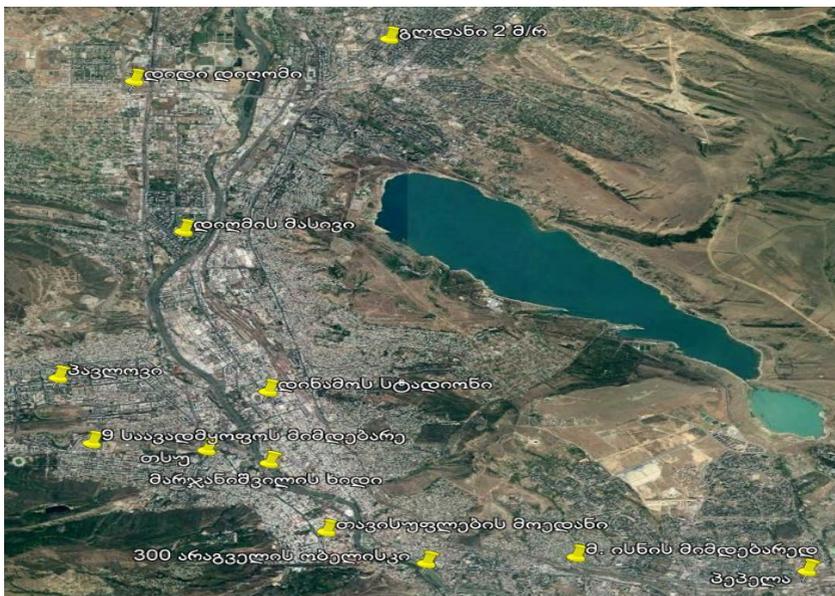
ნახ. 2.43-ზე წარმოდგენილია ქ. თბილისში ვაკე საბურთალოს რაიონში მიკროაეროზოლების გაზომვის შედეგები. ნახაზიდან ჩანს რომ PM10 -ით დაბიძურების დონე მაღალია (40-68 მკგ/მ³). PM2.5-ის კონცენტრაციები იცვლება 8-10 კგ/მ³ დიაპაზონში.



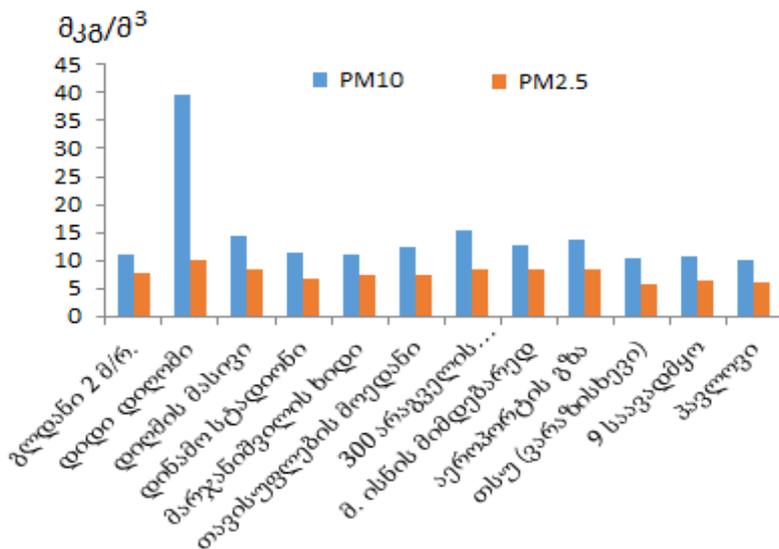
ნახ. 2.43. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ქ. თბილისის ვაკე საბურთალოს რაიონში. 22.06.2021.

2021 წლის 15 სექტემბერს ქ. თბილისში ჩატარდა ღამის გაზომვები. გაზომვის პუნქტები წარმოდგენილია ნახ. 2.44.

ღამის პერიოდში ჩატარებულმა გაზომვებმა აჩვენა, რომ ქ. თბილისის ტერიტორიაზე PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციები იცვლება 5-10 და 10-15 მკგ/მ³ ფარგლებში, შესაბამისად (ნახ.2.45). დიდ დილომში დაფიქსირებული PM10-ის მაღალი (40 მკგ/მ³) კონცენტრაცია გამოწვეულია გაზომვის მომენტში ტრასაზე მიმდინარე ავტომობილების მოძრაობით.



ნახ. 2.44. ქ. თბილისი. ღამით ჩატარებული გაზომვები. 15.09.2021.

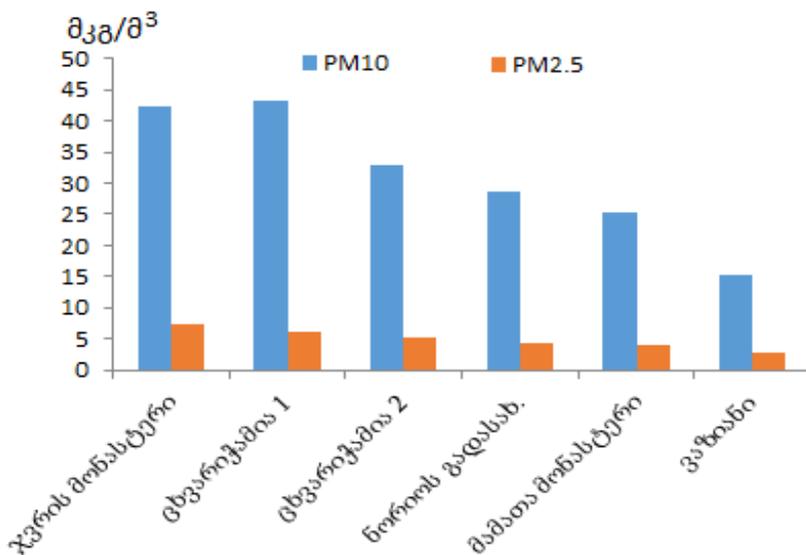


ნახ. 2.45. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები ქ. თბილისის. ღამით ჩატარებული გაზომვები. 15.09.2021.

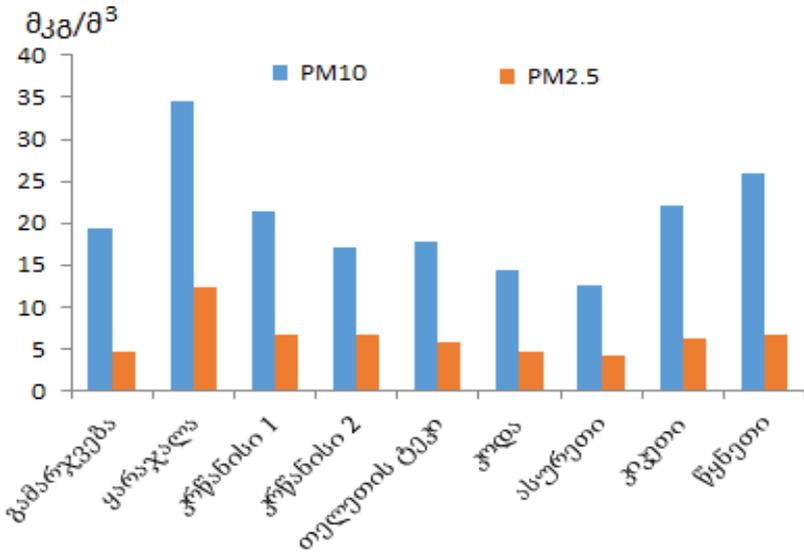
ქ. თბილისის ირგვლივ მიმდებარე ტერიტორიაზე ჩატარებული გაზომვების შედეგები წარმოდგენილია ნახ.2.46-ნახ. 2.48. მიღებულმა შედეგებმა გვიჩვენა რომ თბილისის შემოგარენის ატმოსფეროში მიკრონაწილაკების კონცენტრაციები ფართო დიაპაზონში იცვლება, კერძოდ PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციები იცვლება 4-10 მკგ/მ³ და 2-42 მკგ/მ³ ფარგლებში, შესაბამისად. PM10-ის შედარებით მაღლი (40-42მკგ/მ³) კონცენტრაციები ჯვრის მონასტრის, ცხვარიჭამიას ტერიტორიაზე შეესაბამება ბიოგენურ დაბინძურებას, ხოლო ყარაჯალარში გაჯის წარმოების ობიექტების გავლენას.

ექსპერიმენტული გაზომვების და გარემოს სააგენტოს მონაცემების ანალიზის შედეგებზე დაყრდნობით შეიძლება გამოვიტანოთ შემდეგი დასკვნები:

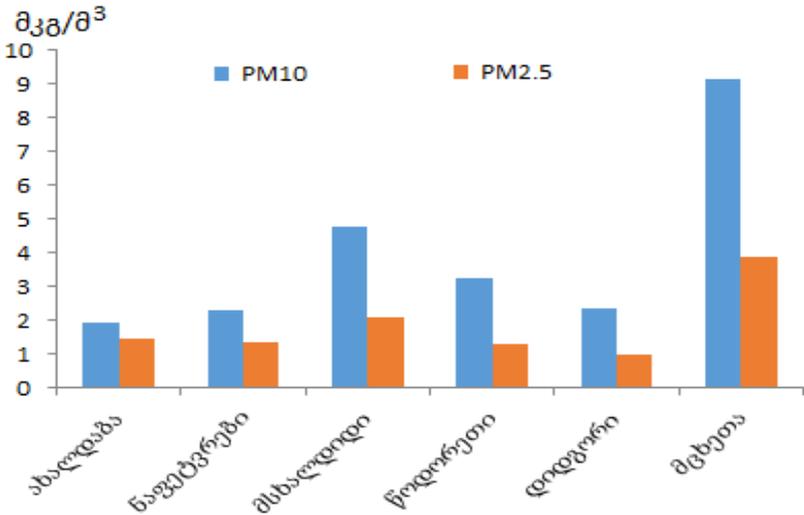
ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM2.5 ნაწილაკების კონცენტრაციები, როგორც წესი, ნაკლებია PM10-ის კონცენტრაციებზე, მაგრამ მათი ცვლილების მრუდის ხასიათი ერთნაირია.



ნახ. 2.46. ქ. თბილისი შემოგარენში. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები. 23.06.2021.



ნახ. 2.47. ქ. თბილისის შემოგარენში. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები. 9.07.2021.



ნახ. 2.48. ქ. თბილისის შემოგარენში. PM2.5 და PM10 -ის კონცენტრაციების მნიშვნელობები. 17.09.2021.

კონცენტრაციათა მაქსიმალური მნიშვნელობები თითქმის ყოველთვის აღემატება შესაბამის ზდკ ზამთრის პერიოდში, ხოლო ზაფხულის პერიოდში ხშირ შემთხვევაში ნაკლებია შესაბამის ზდკ-ზე.

PM ნაწილაკების კონცენტრაციების საათობრივი ცვლილებების ტრენდმა გვიჩვენა, რომ დღის განმავლობაში PM ნაწილაკების კონცენტრაცია ხასიათდება მატების ტენდენციით და თავის მაქსიმუმს აღწევს საღამოს 20 სთ-ს შემდეგ.

ჩატარებულმა ანალიზმა გვიჩვენა პანდემიის გავლენა მტვრის ნაწილაკების კონცენტრაციის შემცირებაზე ქალაქის ატმოსფეროში და ნათლად დაგვანახა, რომ თბილისის ატმოსფეროს PM ნაწილაკებით დაბინძურებაში ძირითადი წვლილი შეაქვს ავტოტრანსპორტს.

პირველად ჩატარებული ქ. თბილისისა და მის შემოგარენში საველე ექსპედიცია PM2.5 და PM10 ნაწილაკების კონცენტრაციების განსაზღვრის მიზნით.

პირველად განსაზღვრული საველე გაზომვის წერტილებში კონცენტრაციების მნიშვნელობები, მათი ცვლილება ტრასების მთელ სიგრძეზე და ტრასიდან დაშორებულ წერტილებში. გაზომვების წერტილებში შეფასებულია კონცენტრაციების მინიმალური, საშუალო და მაქსიმალური მნიშვნელობები.

PM2.5 და PM10 ნაწილაკების კონცენტრაციების ცვლილების მრუდი ერთნაირია (იშვიათი გამონაკლისების გარდა).

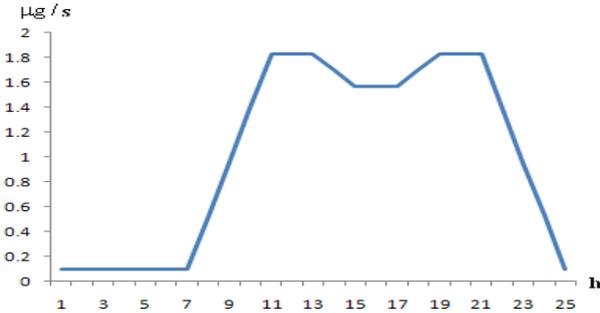
გამოვლინდა ქ. თბილისისა და მისი შემოგარენის მაქსიმალურად დაბინძურებული უბნები. დაკვირვებამ გვიჩვენა, რომ მტკვრის მარცხენა სანაპირო მეტადაა დაბინძურებული მარჯვენა სანაპიროსთან შედარებით.

მაქსიმალური კონცენტრაციების არსებობა უმეტესწილად დაკავშირებულია ავტოტრანსპორტის ინტენსივობასთან ან მეტეოროლოგიურ პირობებთან.

თავი 3. ქ. თბილისში PM2.5 და PM10 ლოკალური ბაზრცემლების რიცხვითი მოდელირება

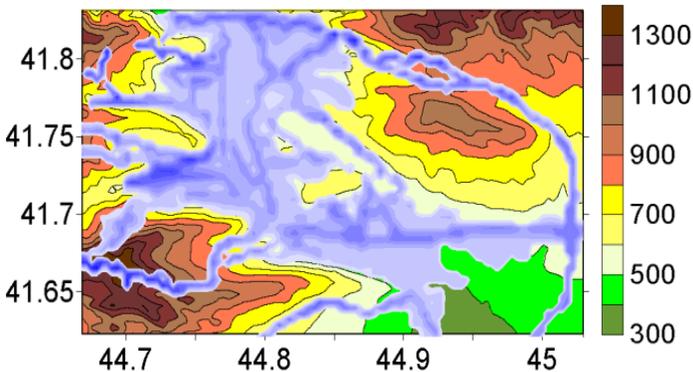
ქ. თბილისში არაა ატმოსფეროს მიკროაეროზოლებით დაბინძურების მსხვილი სამრეწველო საწარმოები, ამიტომ ატმოსფეროს მიკროაეროზოლებით დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ავტოტრანსპორტი. ავტომობილის დაძვრისას, მოძრაობისა და დამუხრუჭებისას საბურავების, გზის საფარის და სამუხრუჭე ხუნდების ცვეთისას წარმოშობილი უცირესი ნაწილაკები შეადგენენ ატმოსფეროში არსებული PM2.5 და PM10-ის ძირითად მასას. ავტოსადგურებში და ტრანსპორტის გაჩერების ადგილებში ჩატარებულმა გაზომვებმა აჩვენა, რომ ავტომობილის დაძვრისა და გაჩერების მომენტებში ატმოსფეროში PM-ის კონცენტრაციები 4-6-ჯერ აღემატება მოცემულ მომენტში არსებულ მახასიათებელ მნიშვნელობებს. ხოლო კონცენტრაციების დღეღამური ცვლილების ხასიათი, განსაზღვრული ატმოსფეროს დაბინძურების მონიტორინგის მონაცემების შესაბამისად [15, 26] აჩვენებს, რომ მას გააჩნია გარკვეული თანხვედრა მოძრაობის ინტენსივობის ცვლილებასთან. მაღალი კონცენტრაციები დაიკვირვება 9-დან 12 და 17-დან 21 სთ-მდე პერიოდებში, როდესაც ადგილი აქვს ავტოტრანსპორტის მოძრაობის პიკურ სიტუაციებს. დაბალი დაბინძურების დონე, როგორც წესი მყარდება ღამის საათებში. ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის, დაკვირვების მონაცემების და მოდელის დიფუზიური თვისებების გათვალისწინებით შერჩეულია ატმოსფეროში PM2.5-ის გაფრქვევის სიჩქარე. (ნახ. 3.1). ის შეესაბამება PM2.5 გაფრქვევის სიჩქარეს 1მ^3 მოცულობის არეში იმ ტრასებზე, სადაც მოძრაობის ინტენსივობა 3000 ავტ/სთ-ია. PM10-ის გაფრქვევის სიჩქარის დროში ცვლილება ანალოგიურია ნახ. 3.1-ის, ხოლო რაოდენობრივად აღემატება მას 3.5-ჯერ. სხვა ქუჩებზე გაფრქვევის სიჩქარეები თვისობრივად ანალოგიურია და იცვლება მოძრაობის ინტენსივობის პროპორციულად. ნახ. 3.1-დან ჩანს, რომ მოდელირებისას მიღებულია რეჟიმი, როდესაც მიკროაეროზოლების ატმოსფეროში გაფრქვევა ხასიათდება გაფრქვევის ერთნაირი სიჩქარის მქონე ორი მაქსიმუმით 10-დან 12 და 18-დან 20 სთ-მდე დროის ინტერვალში, რაც შეესაბამება თბილისისათვის დამახასიათებელ მოძრაობის „პიკურ“ სიტუაციებს. მინიმალურ გაფრქვევას ადგილი აქვს ღამის 0-დან დილის 6 სთ-მდე. 12-დან 18 სთ-მდე

დროის მონაკვეთში ხდება ატმოსფეროში აეროზოლების გაფრქვევის ინტენსივობის სუსტი ($\approx 10\%$) შემცირება.



ნახ.3.1. PM2.5 -ის 1m^3 მოცულობის არეში გაფრქვევის სიჩქარის (მკგ/წმ) დროში ცვლილება 3000 ავტ/სთ მაქსიმალური ინტენსივობის მოძრაობის ტრასაზე

ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენებია ქ. თბილისის ოროგრაფია და დაბინძურების წყაროების სივრცული განაწილება. დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ქალაქში არსებული გამზირებზე, შემომავალი ავტომანქანების ტრასებზე და ქალაქის გარსშემომვლელი ტრასაზე მოძრავი ტრანსპორტის გაფრქვევები. მოდელირებისას გათვალისწინებულია ასევე ქალაქის დასახლებული უბნების ქუჩებში გაფრქვეული აეროზოლების გავლენა ატმოსფეროს დაბინძურებაზე.



ნახ. 3.2. ქ. თბილისის ოროგრაფია (მ) და დაბინძურების წყაროების განაწილება სივრცეში (ლურჯი ფერის არეები)

3.1. ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM2.5-ის გაგრძელება ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს

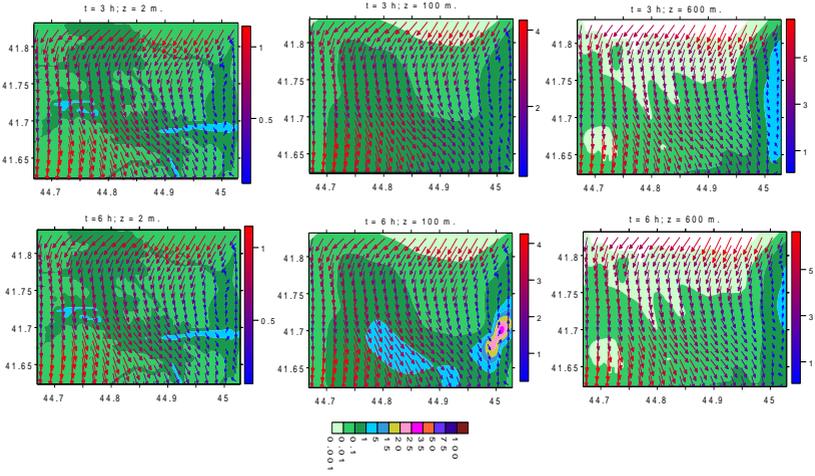
მოდელირებულია ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM2.5-ის დროში ცვლილება ზამთრის სეზონში ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს. ფონური ქარის სიჩქარე დროში მუდმივია, ხოლო ქალაქის რელიეფის გარსდენის პროცესი ბაროკლინურია. შესაბამისად, ქარის სიჩქარის სიდიდე მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე 1 მ/წმ-ია. სიმაღლის ზრდასთან ერთად ის წრფივად იზრდება და ტროპოპაუზის დონეზე (9 კმ) მისი მნიშვნელობა ხდება 20.8 მ/წმ-ის ტოლი. ატმოსფეროს PM2.5-ით დაბინძურების სიჩქარის დროში ცვლილება ნაჩვენებია ნახ.3.1.-ზე.

ნახ. 3. 3-ზე ნაჩვენებია რიცხვითი ინტეგრირებით მიღებული ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში - 2, 100 და სასაზღვრო ფენაში - 600 მ სიმაღლეზე დღის $t = 3$ და 6 სთ-ზე ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს. ნახ. 3.3-დან ჩანს, რომ რელიეფის გავლენა ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენებში იწვევს ჩრდილოეთიდან სამხრეთისაკენ მიმართული ქარის სიჩქარის ტალღისებურ შემფოთებას, რომლის ძირითადი ნაკადი მიუყვება მტკვრის ხეობას. ქარის სიჩქარის სიდიდე იცვლება 1-6 მ/წმ-ის ფარგლებში.

ქარის ველი ხელს უწყობს ქალაქში არსებული PM2.5 ნაწილაკების გატანას ქალაქის ტერიტორიიდან სამხრეთ-აღმოსავლეთის მიმართულებით და ამცირებს მიწისპირა ჰაერის დაბინძურებას. დღის პირველი 6 საათის განმავლობაში, მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის განაწილება სივრცეში თვისებრივად ერთნაირია: ქალაქის გარეუბნებში კონცენტრაცია 0.01-0.1 მკგ/მ³-ია, ურბანიზებულ ტერიტორიებზე და აღმოსავლეთ ნაწილში კონცენტრაციის მნიშვნელობები ძირითადად 0.1-1 მკგ/მ³ ფარგლებშია. კონცენტრაციის მნიშვნელობა 10-5 მკგ/მ³ - მიღებულია მხოლოდ ქალაქის ორ ნაწილში - დასავლეთით ვაკე საბურთალოს რაიონებში არსებული გამზირების მიმდებარედ და აღმოსავლეთ ნაწილში - კახეთის გზატკეცილის გასწვრივ.

მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის მნიშვნელობები დილის 3 და 6 საათებზე განსხვავდება ერთმანეთისაგან. თუ დილის 3 საათზე კონცენტრაცია ქალაქის თავზე ძირითადად 0.1-1მკგ/მ³-ია, 6 სათზე ქალაქის აღმოსავლეთ ნაწილის თავზე ფორმირებულია დაბინძურების ზონა, რომელშიც PM2.5-ის კონცენტრაცია

აღწევს 25 მკგ/მ³. ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში (600 მ) PM2.5 –ის კონცენტრაციები ქალაქის უმეტეს ნაწილში ნაკლები 0.1 მკგ/მ³-ზე, მხოლოდ ქალაქის აღმოსავლეთ ნაწილში კი იცვლება 0.1–1მკგ/მ³ ფარგლებში.

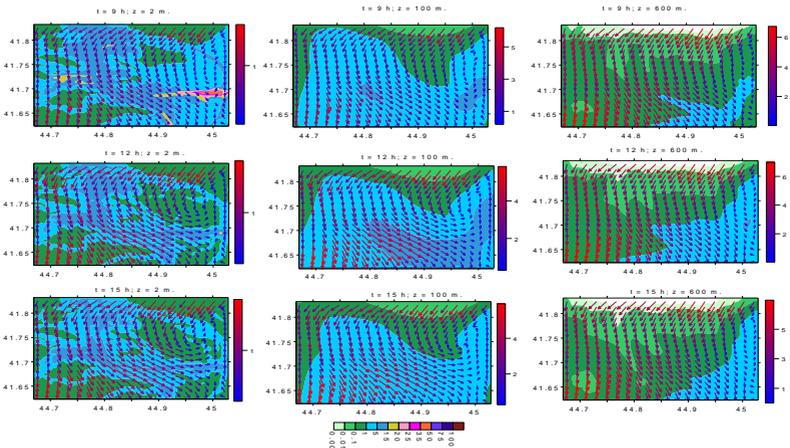


ნახ. 3.3. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 –ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 3 და 6 სთ

დღის 9-15 სთ ინტერვალში, ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის და მასთან დაკავშირებული PM2.5 გაფრქვევის სიჩქარის ზრდასთან ერთად, მიმდინარეობს მიკროაეროზოლის კონცენტრაციის მომატება მოდელირების თითქმის მთელ არეში (ნახ. 3.4). შესამჩნევი ზრდა არის მიღებული დილის 9 საათზე, როდესაც ატმოსფეროში გაფრქვეული აეროზოლების სიჩქარე ხდება მაქსიმალური. ამ დროს კახეთის გზატკეცილის აღმოსავლეთ ნაწილში მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე PM2.5-ის კონცენტრაცია ხდება მაქსიმალური და აღწევს 25–30 მკგ/მ³. თემქის, ვაკის, საბურთალოს, და ფონიჭალის ცალკეულ უბანში, შედარებით მცირე ტერიტორიებზე კონცენტრაცია 15–20 მკგ/მ³ ფარგლებშია. ამასთან, აღსანიშნავია დაბალი დაბინძურების ზონების (0.1–1მკგ/მ³) ფორმირება ქალაქის ცენტრალურ და პერიფერიულ ნაწილებში.

დღის 9–დან 15 სთ–მდე, მიუხედავად იმისა, რომ ატმოსფეროში იფრქვევა ერთიდაიგივე მაქსიმალური რაოდენობის ნაწილაკები, PM2.5-ის კონცენტრაცია ნელ–ნელა კლებულობს ქალაქის თითქმის

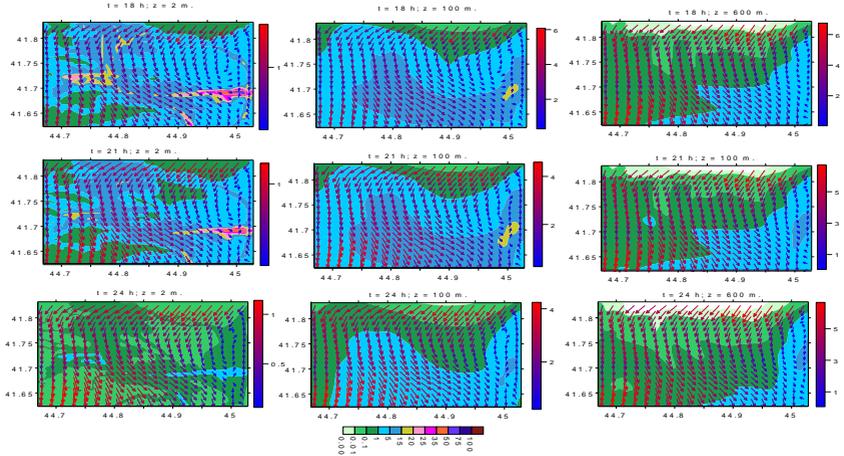
მთელ ტერიტორიაზე. დროის ამ ინტერვალში კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები 2 მ სიმაღლეზე 5–15 მკგ/მ³-ის ფარგლებშია. შედარებით მაღალი დაბინძურების დონეა მიღებული ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ზედა საზღვარზე (100 მ). ამ დონეზე სივრცის უმეტეს ნაწილში კონცენტრაცია იცვლება 1–5 მკგ/მ³-ის ფარგლებში, ხოლო. სამხრეთ-აღმოსვლეთ ნაწილში, საკმაოდ დიდი ფართობის მქონე არეში 12 სთ-ზე კონცენტრაცია 5–15 მკგ/მ³-ია. 100 მ სიმაღლეზე ჰაერის დამტვერიანება იზრდება 9-12 სთ-მდე და მცირდება 12–15 სთ-მდე ინტერვალში.



ნახ. 3.4. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 – ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 9, 12 და 15 სთ

გამოთვლებით მიღებულია, რომ ავტოტრანსპორტის მოძრაობის მეორე „პიკის საათის“ დადგომასთან ერთად ქალაქი ცალკეულ უბნებში ადგილი აქვს ატმოსფეროს PM2.5-ით დაბინძურების ზრდას მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე (ნახ. 3.5). 18 საათზე კონცენტრაცია განსაკუთრებით მაღალია კახეთის გზატკეცილის აღმოსავლეთ და ვაჟა-ფშაველას გამზირის ჩრდილოეთ ნაწილში. ამ ადგილებში კონცენტრაციის მნიშვნელობები 25–30 მკგ/მ³-ს აღწევს. ხოლო ქალაქის საკმაოდ დიდი ფართობის მქონე ტერიტორიაზე 5–15 მკგ/მ³-ია. 18-დან 21 სთ-მდე დროის ინტერვალში ვაკის, საბურთალოს, გლდანის რაიონებში მიწისპირა კონცენტრაცია 10 მკგ/მ³-ით მცირდება. კახეთის გზატკეცილის მიდამოებში კონცენტრაციის შემ-

ცირება შედარებით უმნიშვნელოა. ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ზედა საზღვარის მიდამოებში 18-24-სთ ინტერვალში აეროზოლის კონცენტრაცია ჯერ ოდნავ იზრდება, შემდეგ კი მცირდება, 24 საათის შემდეგ მუდმივი ფონური ქარის შემთხვევაში ატმოსფეროს დაბინძურების პროცესს აქვს კვაზიპერიოდული ხასიათი.

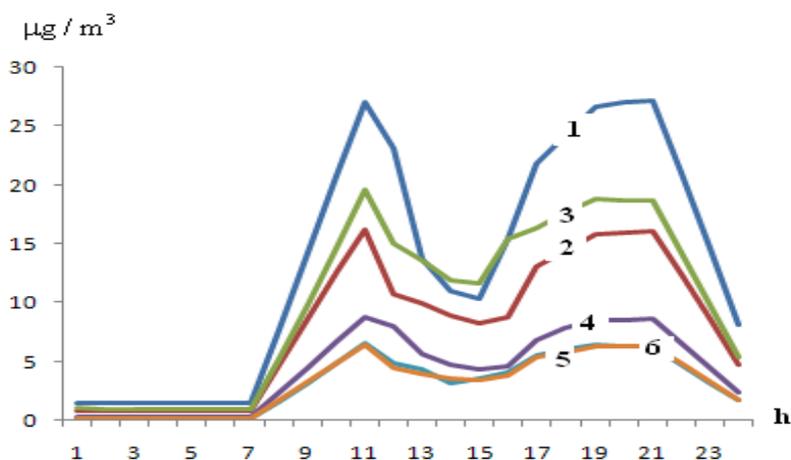


ნახ.3.5. ქარის სიქარის (მ/წმ) და PM2.5 – ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 18, 21 და 24 სთ

კონცენტრაციის დროში ცვლილება ქალაქის 4 მჭიდროდ ურბანიზებულ და 2 გარეუბანში მდებარე წერტილებში ნაჩვენებია ნახ.3.6-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ კონცენტრაციის დროში ცვლილებას გააჩნია 2 მაქსიმუმი. ერთი მიიღწევა 11 და მეორე 9 სთ-ის მიდამოებში. პირველი მაქსიმუმის შესაბამისი კონცენტრაციის ზრდის პროცესი მიმდინარეობს 4 სთ-ის განმავლობაში 7-დან 11-სთ-მდე, ხოლო მეორე მაქსიმუმის 6 სთ-ის განმავლობაში -15-დან 22 სთ-მდე.

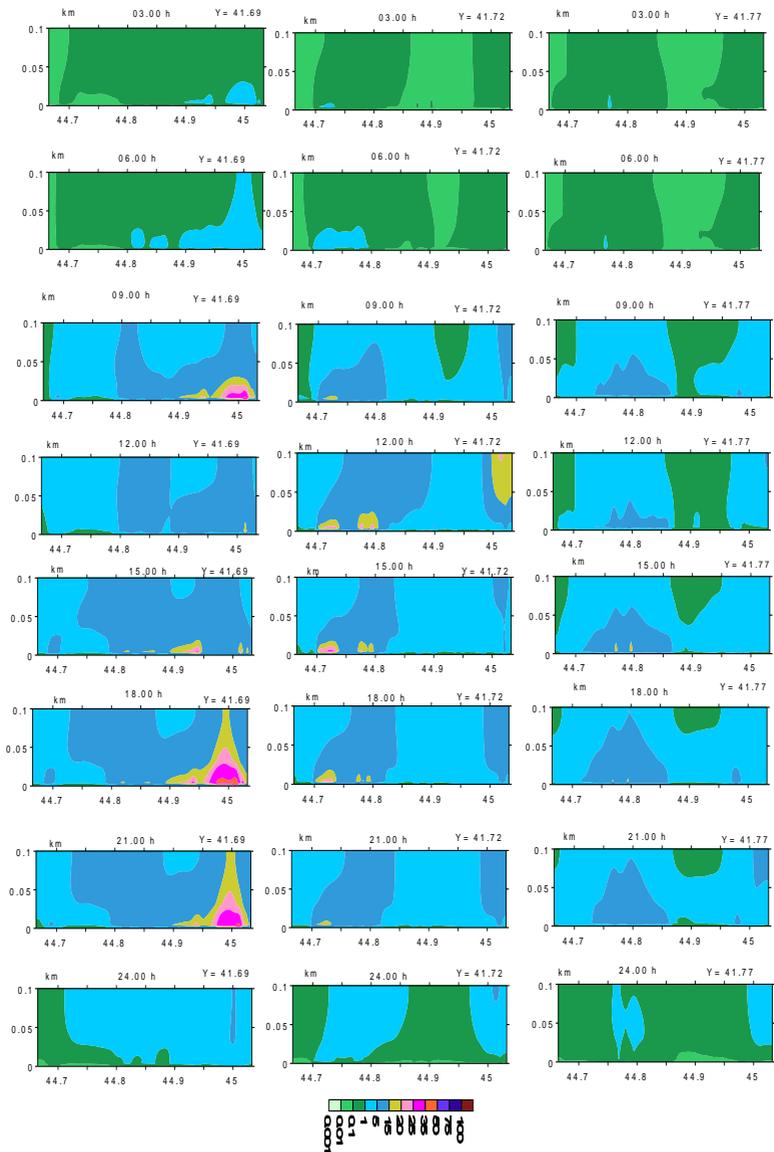
PM2.5-ის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტში ნაჩვენებია ნახ. 3.7-ზე. მასზე ასახულია კონცენტრაციების იზოზოლები ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში პარალელის გასწვრივ გატარებულ 3 ჭრილში. ნახ. 3.7-დან ჩანს, რომ დღის 3-დან 6 სთ-მდე პერიოდში PM2.5-ის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ქვედა ნაწილში ერთნაირია. განაწილების ერთგვაროვნება გამოწვეულია ლოკალური ფორმირებული ანტიციკლონის ველში ვერტიკალური ტურბულენტური და კონ-

ვექციური გადატანების თანხვედრით. 6 სთ-ის შემდეგ, ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად აეროზოლის ვერტიკალური განაწილების ერთგვაროვანი სტრუქტურა ირღვევა. წარმოიშვება აეროზოლის ვერტიკალური ტურბულენტური დიფუზიური ნაკადები, რომლებიც ხელს უწყობენ ტერიტორიის განიავებას და დაბინძურების გატანას ქალაქის ტერიტორიიდან. გამონაკლისს წარმოადგენს ორი არე ვაკის და ფონიჭალის მიდამოებში. ამ არეებში მაღალი დაბინძურების ზონა ატმოსფეროს ქვედა 50 მ ნაწილში 9 და 21 სთ-ზე ფორმირდება ოროგრაფიული წინაღობის ქარპირა მხარეს.



ნახ. 3.6. PM2.5-ის კონცენტრაციის დროში ცვლილება მოდელირების არის 6 წერტილში: 1-ფონიჭალა, 2- ვაჟაფშაველას გამზ, 3 – ახმეტელის თეატრი, 4 – თავისუფლების მოედანი, 5- წყნეთი, 6 – დილომი

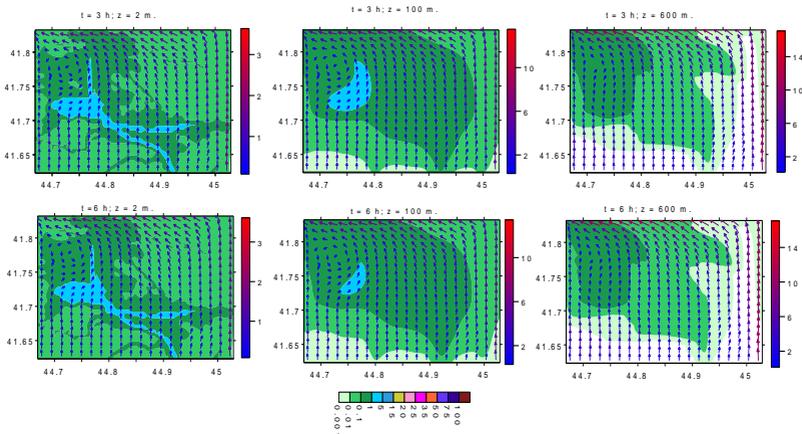
ამრიგად, ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს ქალაქის ოროგრაფია ხელს უწყობს ქალაქის განიავებას. შედეგად ქ. თბილისის ატმოსფეროს დაბინძურება PM2.5-ით მთლიანობაში არ არის მაღალი. გამონაკლისს წარმოადგენს ქალაქის ორი – ვაკისა და ფონიჭალის რაიონები, სადაც PM2.5-ის კონცენტრაცია 11 და 21 სთ-ის მახლობლობაში აღწევს და აჭარბებს კიდევ 25 მკგ/მ³.



ნახ. 3.7. PM2.5-ის კონცენტრაციის იზოზოლები ატმოსფეროს ქვედა 100 მ-იან ფენაში პარალელის გასწვრივ გამავალ სამ ვერტიკალურ კვეთაში

3.2. ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM2.5-ის გავრცელება ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს

ნახ. 3.8-ზე ნაჩვენებია რიცხვითი ინტეგრირებით მიღებული ქარის სიჩქარის და PM2.5 კონცენტრაციის ველები მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე ზამთრის სეზონში 3 და 6 სთ-ზე ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს.



ნახ.3.8. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 – ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირადა სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 3 და 6 სთ

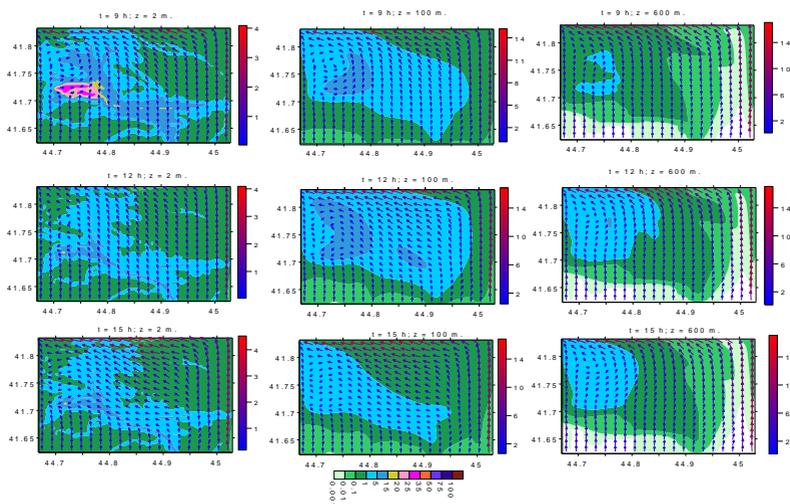
გამოთვლებმა აჩვენა, რომ დროში მუდმივი ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს, რელიეფის ზემოქმედების შედეგად, ქალაქის ტერიტორიის უმეტეს ნაწილში ფორმირდება კვაზისტაციონალური სამხრეთის ქარი, რომლის სიჩქარე ატმოსფეროს ქვედა 600 მ-იან ფენაში იცვლება 0–დან 15 მ/წმ–მდე. განსაკუთრებით დიდია ქარის ვერტიკალური ცვლილება (0–დან 12 მ/წმ–მდე) ატმოსფეროს მიწისპირა 100 მ სისქის ფენაში. რთული რელიეფის გავლენა ქარის სიჩქარეზე განსაკუთრებით ვლინდება ქალაქის ჩრდილოეთ და ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილებში, სადაც ფორმირებულია ლოკალური, დაახლოებით 8 კმ დიამეტრის მიწისპირა ციკლონური გრივალი.

0-სთ-ზე PM2.5-ის სივრცული განაწილება არაა ერთგვაროვანი. მისი კონცენტრაცია მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე, ქალაქის უმეტეს ნაწილში, 0.001–01 მკგ/მ³ ფარგლებშია. ქალაქის ცენტრში, ვაკის, საბურთალოს რაიონების ტერიტორიებზე, წერეთლის გამზი-

რის, კახეთის გზატკეცილის და ქალაქების თბილისისა და რუსთავის დამაკავშირებელი მაგისტრალის მიდამოებში PM2.5-ის კონცენტრაციები იცვლება 1-დან 5 მკგ/მ³-მდე. 3-დან 6 სთ-მდე დროის ინტერვალში კონცენტრაციის ცვლილება პრაქტიკულად უმნიშვნელოა. 100 მ-ის ზევით ადგილი აქვს კონცენტრაციის შემცირებას და მისი სიდიდე 600 მ სიმაღლეზე არ აღემატება 1 მკგ/მ³-ს.

დილის 6 საათის შემდეგ, ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ზრდასთან ერთად, მატულობს PM2.5-ის კონცენტრაცია ქალაქის მთელ ტერიტორიაზე. კონცენტრაციის მომატება ერთნაირი არ არის. ის განსაკუთრებით დიდია ქალაქის ცენტრში, ვაკის და საბურთალოს რაიონებში. ამ ტერიტორიაზე დილის 9 სთ-ზე ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში 2 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის სიდიდე იცვლება 25–35 მკგ/მ³-ის ფარგლებში. ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს ფორმირებული კონცენტრაციის ველისაგან განსხვავებით, არა აქვს ადგილი PM2.5-ის კონცენტრაციის ზრდას კახეთის გზატკეცილის მიდამოებში.

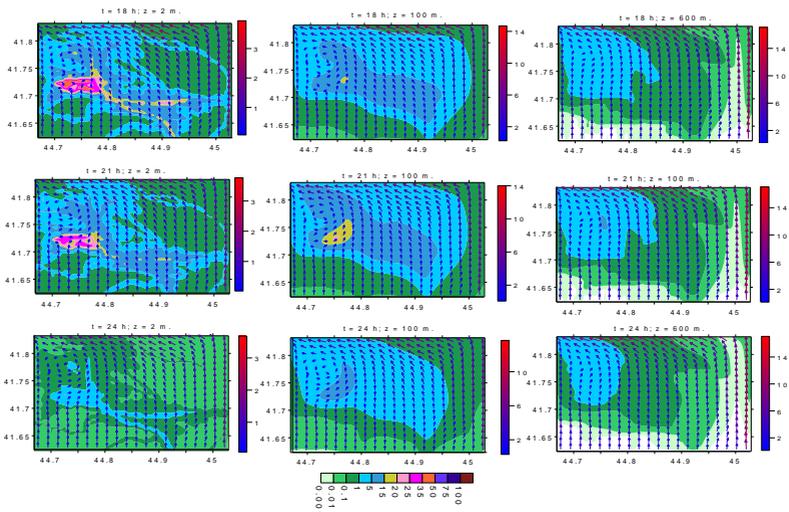
დილის 9 სთ-ის შემდგომ მცირდება კონცენტრაცია ძირითადი დაბინძურების უბნებში და მყარდება მიკროაეროზოლის კვაზისტაციონალური განაწილება. მიღებული განაწილებისათვის



ნახ. 3.9. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 – ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 9, 12 და 15 სთ

დამახასიათებელია სუტი დადებითი ვერტიკალური გრადიენტი მიწისპირა 100 მ სისქის ფენაში და სუსტი უარყოფითი გრადიენტი 100 მ სიმაღლის ზევით (ნახ. 3.9).

დღის 15-დან 21 სთ-მდე მონაკვეთში, ადგილი აქვს ავტოტრანსპორტის მოძრაობის მეორე პიკური საათის დადგომასთან დაკავშირებულ PM2.5-ის კონცენტრაციის ზრდას (ნახ. 3.10). კონცენტრაციის მკვეთრი ზრდა მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე 18 სთ-ზე მიღებულია ვაკის და საბურთალოს რაიონებში. ამ ტერიტორიებზე კონცენტრაცია იცვლება 25–35 მკგ/მ³-ის ფარგლებში. კონცენტრაციის ზრდა შედარებით ნაკლებია რუსთაველის და გორგასლის გამზირების, კახეთის და რუსთავის გზატკეცილის, ორთაჭალისა და ფონიჭალის ზოგიერთ მცირე ზომის უბნებზე. 18-დან 21 სთ-მდე ხდება PM2.5-ის კონცენტრაციის შემცირება შედარებით მაღალი დაბინძურების არეებში.

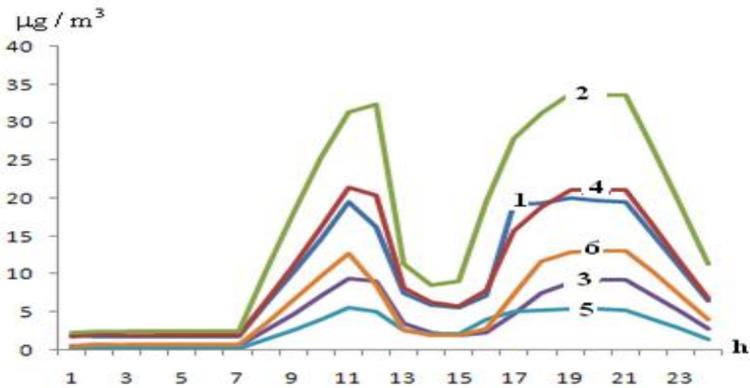


ნახ 3.10. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM2.5 – ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 18, 21 და 24 სთ

მიწისპირა კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად მიმდინარეობს აეროზოლის ნაწილაკების ვერტიკალური ტურბულენტური და კონვექციური დიფუზია, შესაბამისად იზრდება PM2.5-ის შემცველობა 100 და 600 მ სიმაღლეებზე. ამ დონეებზე 18 სთ-თვის კონ-

ცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები ტოლი ხდება 20 და 15 მკგ/მ³-ის. 18 სთ-ის შემდეგ იწყება კონცენტრაციის ნელი შემცირება 2 მ სიმაღლეზე და გრძელდება მისი ზრდა 100 მ სიმაღლეზე. ეს პროცესი მიმდინარეობს 24 სთ-მდე. 24 სთ-ზე მყარდება მიკროაეროზოლის ისეთი ვერტიკალური განაწილება, რომლის დროსაც PM2.5-ის კონცენტრაცია 100 მ სიმაღლეზე მეტია 2 და 600 მ სიმაღლეზე მიღებულ კონცენტრაციებზე. რაც შეეხება დაბინძურების დროში ცვლილებას, 24 სთ-ის შემდეგი პროცესი მეორდება კვაზიპერიოდულად.

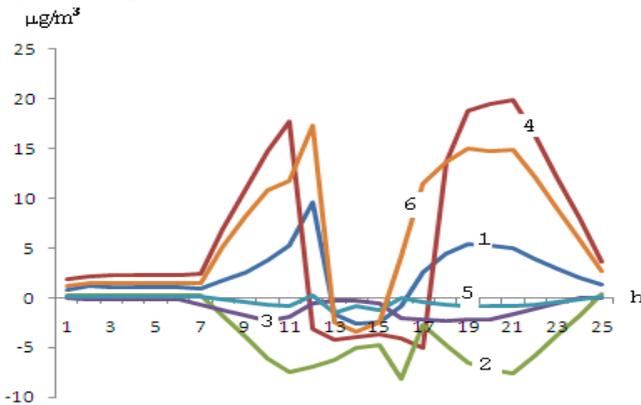
ნახ. 3.11-ზე მოცემულია მიწისპირა ფენაში 2 სიმაღლეზე PM2.5-ის კონცენტრაციის დროში ცვლილების გრაფიკები. ნახ. 3.11-დან ჩანს, რომ კონცენტრაციის დროში ცვლილება ფონური სუსტი სამხრეთის ქარის დროს თვისობრივად ანალოგიურია ჩრდილოეთის ქარის დროს მიღებული დროში ცვლილების (ნახ. 3.6). ფონური ჩრდილოეთის ქარის ანალოგიურად, ფონური სამხრეთის ქარის დროსაც რეალიზდება მაქსიმალური და მიმინალური დაბინძურების ორი პერიოდი შესაბამისი დროითი ინტერვალებით. მიუხედავად იმისა, რომ დაბინძურების სხვადასხვა წერტილში აეროზოლის გაფრქვევა ხდება ერთიდაიგივე კანონზომიერებით. განსხვავებულია



ნახ.3.11. PM2.5 – ის კონცენტრაციის დროში ცვლილება მოდელირების არის 6 წერტილში: 1–ფონიჭალა, 2 – ვაჟა-ფშაველას გამზირი, 3 – ახმეტელის თეატრი, 4 – თავისუფლების მოედანი, 5 – წყნეთი, 6 – დილომი

ფორმირებული კონცენტრაციების დროში ცვლილების ხასიათი: მაქსიმალური კონცენტრაციის დადგომის მომენტები, დროში ცვლილების გრადიენტები, ქალაქის ცენტრალურ და პერიფერიებში მდებარე წერტილებში კონცენტრაციების სიდიდეები და სხვა.

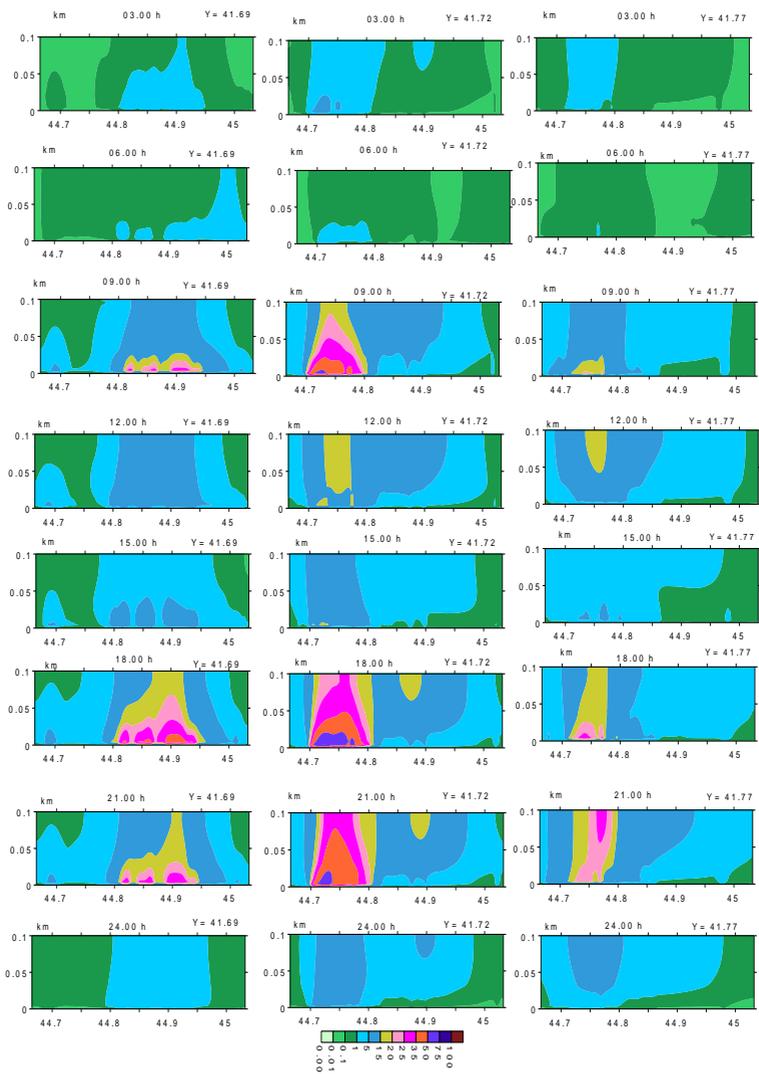
ნახ. 3.12-ზე ნაჩვენებია ფონური სამხრეთისა და ჩრდილოეთის ქარების დროს გამოთვლებით მიღებული კონცენტრაციების სხვაობების დღიური სვლა მოდელირების 6 წერტილში 2 მ სიმაღლეზე. ნახ. 3.12-დან ჩანს, რომ ფონიჭალაში, თავისუფლების მოედნისა და დიდმის მიდამოებში სამხრეთის ქარის დროს, პიკის საათებში კონცენტრაციის მნიშვნელობები 1-25 მკგ/მ³-ით აღემატება ჩრდილოეთის ქარის დროს მიღებულ კონცენტრაციებს. ვაჟა-ფშაველას გამზირზე და ახმეტელის თეატრის მიდამოებში პირიქით - ფონური ჩრდილოეთის ქარის დროს კონცენტრაცია დაახლოებით 3 -10 მკგ/მ³-ით მეტია ფონური სამხრეთის ქარის დროს მიღებულ კონცენტრაციებზე. ქალაქგარეთ არსებულ წერტილში - კონცენტრაციებს შორის სხვაობები მცირეა.



ნახ. 3.12. ფონური სამხრეთისა და ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს PM2.5 – ის კონცენტრაციის სხვაობის დროში ცვლილება მოდელირების არის 6 წერტილში: 1-ფონიჭალა, 2 – ვაჟა-ფშაველას გამზირი, 3 – ახმეტელის თეატრი, 4 – თავისუფლების მოედანი, 5 – წყნეთი, 6 – დიღომი

ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის პარალელის გასწვრივ გატარებულ სამ ვერტიკალურ კვეთაში PM2.5-ის კონცენტრაციის ვერტიკალური

განაწილება ნაჩვენებია ნახ. 3.13–ზე. ნახაზიდან ჩანს, რომ 3–დან 6 სთ–მდე პერიოდში, PM2.5–ის კონცენტრაცია ატმოსფეროს მიწისპირა



ნახ. 3.13. PM2.5 – ის კონცენტრაციის იზოზოლები ატმოსფეროს ქვედა 100 მ-იან ფენაში პარალელის გასწვრივ გამავალ სამ ვერტიკალური კვეთაში

ფენაში ≤ 5 მკგ/მ³ და ახასიათებს სუსტი შემცირების ტენდენცია. 6 სთ-ის შემდეგ, ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად მატულობს აეროზოლის კონცენტრაცია მიწისპირა ფენაში და 9 სთ-თვის ფორმირდება საშუალო და მაღალი დაბინძურების ზონები. მათ გააჩნიათ საკმაოდ დიდი ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ზომები და მოიცავენ პრაქტიკულად მთელ მიწისპირა ფენას. 9-დან 15 სთ-მდე პერიოდში მიუხედავად ატმოსფეროში აეროზოლის გაფექვევის მუდმივობისა, ხდება კონცენტრაციის საგრძნობი შემცირება და ჰაერის ხარისხის გაუმჯობესება.

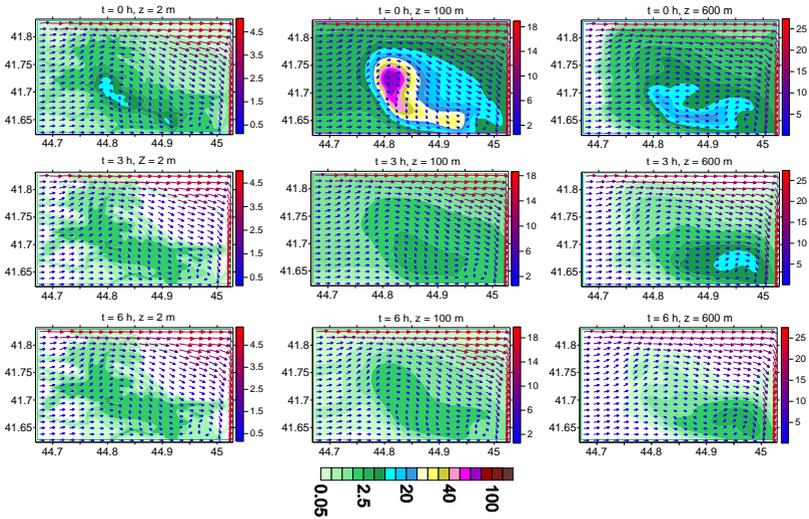
მიწისპირა კონცენტრაციის მკვეთერი ზრდა მიღებულია 16-21 სთ-მდე ინტერვალში. დროის ამ მონაკვეთში კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა მიწის ზედაპირის სიახლოვეს, მცირე ფართობის ტერიტორიაზე, აღწევს 50 მკგ/მ³. თუ გავაანალიზებთ PM_{2.5}-ის კონცენტრაციის ვერტიკალურ განაწილებას დროის სხვადასხვა მომენტში, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ფონური სუსტი ქარის შემთხვევაში ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში აეროზოლის გავრცელების უპირატეს მექანიზმს ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ტურბულენტური დიფუზია წარმოადგენს. ტურბულენტურ ნაკადებს გააქვს აეროზოლი მიწისპირა ფენიდან სასაზღვრო ფენაში, სადაც ადვექციური გადატანა იწვევს დაბინძურების დიდ ფართობზე გაფანტვასა და ჰაერის თვითგასუფთავებას.

3.3. ქ. თბილისის ატმოსფეროში PM₁₀-ის გავრცელება ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს

ნახ. 3.14-ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული PM₁₀-ის კონცენტრაციის და ქარის სიჩქარის სივრცული განაწილება მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეზე $t=0$, 3 და 6 სთ-ზე ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს ზამთრის სეზონში. ფონური ქარის სიჩქარე იცვლება 1 - დან (100 მ სიმაღლეზე) 20 მ/წმ-მდე (ტროპოპაუზის სიმაღლეზე).

ნახ.3.14-დან ჩანს, რომ დროის 0–6 სთ ინტერვალში ადგილი აქვს PM₁₀ კონცენტრაციის შემცირებას. მტვრის კონცენტრაცია, როცა $t=0$ სთ, შედარებით მაღალია $z=100$ მ სიმაღლეზე ქალაქის ცენტრალურ და სამხრეთ აღმოსავლეთ ნაწილებში. ამ არეში კონცენტრაციის სიდიდე აღწევს 80–90 მკგ/მ³. მაღალი დამტვერიანების არედან დაშორებისას კონცენტრაცია თანდათანობით მცირდება და მისი მნიშვნე-

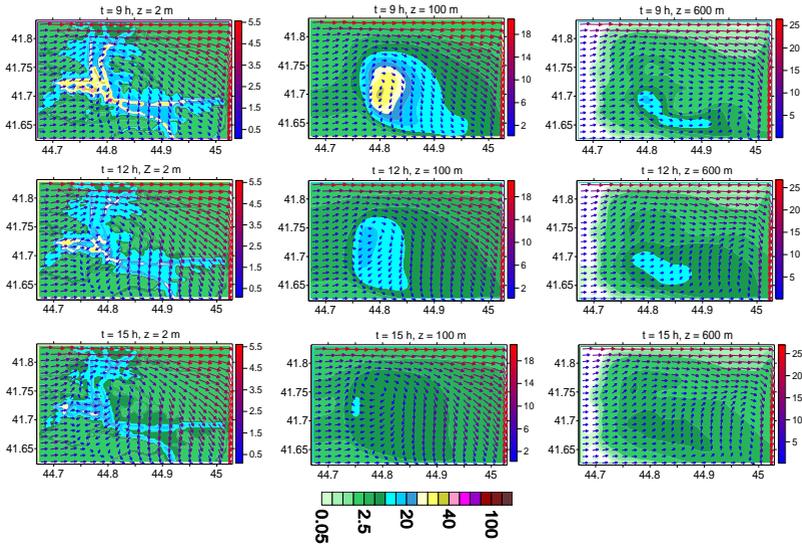
ნელობა ქალაქის პერიფერიულ ნაწილებში უტოლდება 0.05 მკგ/მ³-ს. ამავე დროს PM10-ის კონცენტრაცია მიწის ზედაპირიდან 600 მ სიმაღლეზე მეტია 2 მ სიმაღლეზე მიღებულ კონცენტრაციაზე. აღნიშნული ეფექტი მიუთითებს აეროზოლის თერმული კონვექციური გადატანის დიდ როლზე დროის 21-დან 24 სთ-მდე ინტერვალში. 0 - დან 6 სთ-მდე ინტერვალში ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში PM10-ის კონცენტრაცია მცირედ იცლება.



ნახ.3.14. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10- ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირადა სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 0, 3 და 6 სთ

t=6 სთ-ის შემდეგ, იზრდება ატმოსფეროში მოხვედრილი მიკრო-აეროზოლების რაოდენობა და ადგილი აქვს ქალაქის ატმოსფეროს სწრაფ დაბინძურებას. როცა t=9 სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე PM10-ის კონცენტრაცია იზრდება ავტომაგისტრალების გურამიშვილის, ვაჟა-ფშაველას, რუსთაველის, ილია ჭავჭავაძის, ქეთევან წამებულის გამზირების, რუსთავის, კახეთის და გარდაბნის გზატკეცილების მიდამოებში (ნახ. 3.15). ამ ტერიტორიებზე კონცენტრაციის მნიშვნელობები აღწევს 35 მკგ/მ³, ხოლო ცალკეულ უბნებში – გმირთა, თავისუფლებისა და გულუას მოედნების მიდამოებში – 50-60 მკგ/მ³. დღის 12-15 სთ ინტერვალში PM10-ის კონცენტრა-

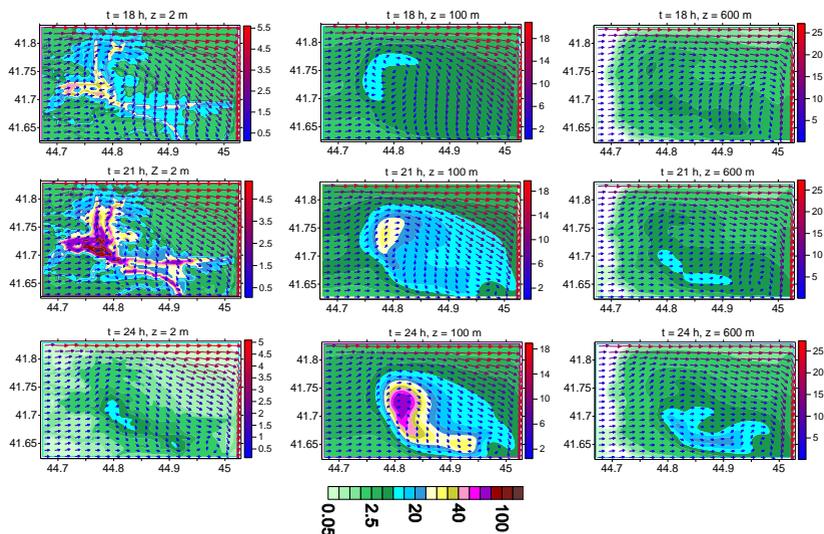
ცია მცირდება. შედარებით მაღალი დაბინძურების ზონებად მაინც რჩება: საბურთალოს, ვაკის, ორთაჭალის, გლდანის მასივისა და



ნახ. 3.15. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10–ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა $t = 9, 12$ და 15 სთ

ვახტანგ გორგასლისგამზირის ცალკეული უბნები. მიწისპირა კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად ადგილი აქვს PM10–ის ვერტიკალურ გადატანას და დაბინძურების დონის ზრდას 100 და 600 მ სიმაღლეებზე. ქალაქის ცენტრის თავზე, 100 მ სიმაღლეზე, PM10–ის კონცენტრაცია აღწევს 40 მკგ/მ³, ხოლო მის მიმდებარედ, საკმაოდ დიდ ფართობზე კონცენტრაციის მნიშვნელობა იცვლება 5–30 მკგ/მ³–ის ფარგლებში.

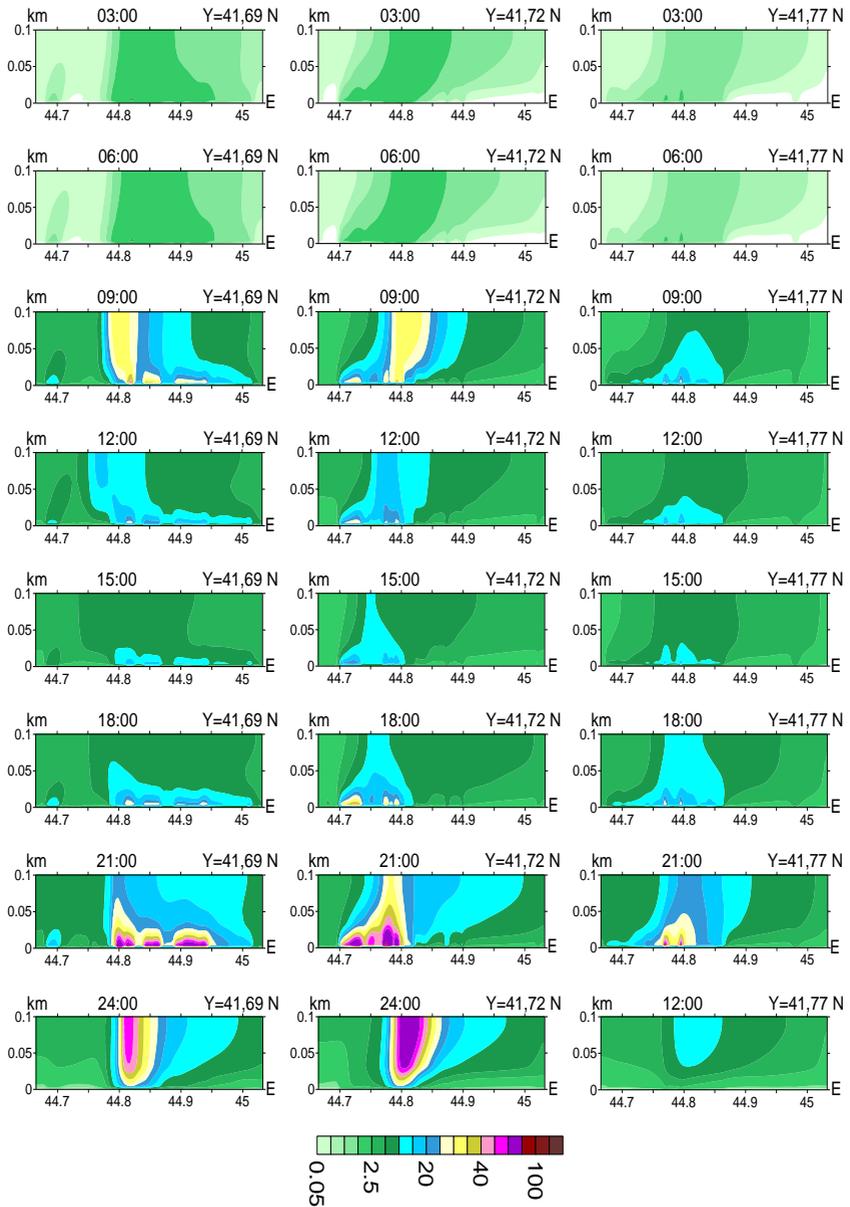
დღის 15 სთ–ის შემდეგ, $z = 2$ მ სიმაღლეზე იწყება დაბინძურების ზრდის მეორე ეტაპი, რომელიც გრძელდება 21 სთ–მდე (ნახ. 3.16). პროცესი მიმდინარეობს 6–9 სთ ინტერვალში კონცენტრაციის ზრდის ანალოგიურად, მაგრამ გარკვეული განსხვავებებით. კერძოდ, კონცენტრაციის ზრდა შენელებულია დავით გურამიშვილის გამზირის, კახეთისა და რუსთავის გზატკეცილების ცალკეულ უბნებზე. კონცენტრაციის ზრდა მიღებულია გლდანისა და თემქის რაიონების ცენტრებში.



ნახ. 3.16. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10–ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 18, 21 და 24 სთ

მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე PM10–ის კონცენტრაციის ინტენსიური ზრდა მიღებულია დღის 18-დან 21 სთ–მდე პერიოდში, ქალაქის თითქმის მთელ მჭიდროდ ურბანიზებულ ნაწილში, განსაკუთრებით კი ვაკისა და საბურთალოს მიდამოებში (ნახ. 3.16). ამ ტერიტორიაზე კონცენტრაციის მნიშვნელობა იცვლება 55–85 მკგ/მ³ –ის ფარგლებში. 21 სთ–ის შემდეგ კი კონცენტრაცია სწრაფად მცირდება და მაქსიმალური მნიშვნელობა 10 მკგ/მ³ მიღებულია მხოლოდ ორთაჭალის ტერიტორიაზე. მიწისპირა კონცენტრაციის შემცირება დაკავშირებულია მის ინტენსიურ ვერტიკალურ კონვექციურ გადატანასთან, რის შედეგადაც მიკროაეროზოლის კონცენტრაცია მცირდება მიწის ზედაპირის უშუალო სიახლოვეს და იზრდება ზედა ნაწილებში, განსაკუთრებით მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე და შედარებით ნაკლებად 600 მ სიმაღლეზე (ნახ. 3.16 და ნახ. 3.17).

დამაბინძურებელი ინგრედიენტის ვერტიკალური გადატანის პროცესი მიმდინარეობს დაახლოებით 3 სთ ჩამორჩენით. როცა t=24 სთ–ს 100 და 600 მ სიმაღლეებზე PM10–ის მაქსიმალური კონცენტრაცია შესაბამისად აღწევს 80–85 მკგ/მ³ და 20–30 მკგ/მ³.

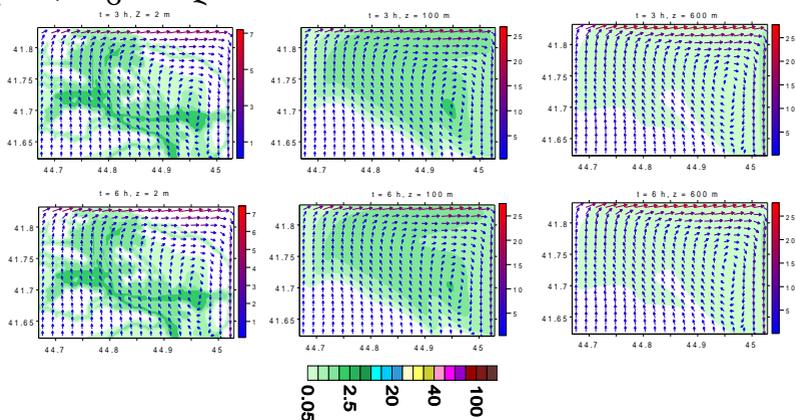


ნახ. 3.17. PM10- ის კონცენტრაციის ოზოზოლები ატმოსფეროს ქვედა 100 მ-იან ფენაში პარალელის გასწვრივ გამავალ სამ ვერტიკალური კვეთაში

ნახ. 3.17-ზე მოცემული PM10-ის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება აჩვენებს, რომ ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ქვედა ნაწილში PM10-ის გავრცელების უპირატეს მექანიზმს კონვექციური გადატანა წარმოადგენს, რომელსაც 18 საათის შემდეგ, მიწისპირა ფენის ზედა ნაწილში, ემატება ჰორიზონტალური ადვექციის პროცესი.

3.4 ატმოსფეროში PM10-ის გავრცელება ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს

ნახ. 3.18-ზე ნაჩვენებია რიცხვითი მოდელირებით მიღებული ქ.თბილისის ტერიტორიაზე ქარის სიჩქარის და PM10-ის კონცენტრაციის მნიშვნელობები ზაფხულში სუსტი სამხრეთის ქარის დროს, როცა $t = 3$ და 6 სთ.

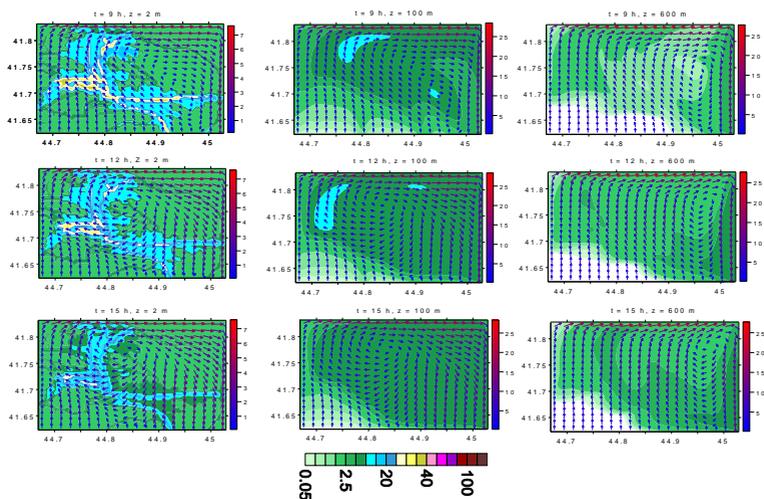


ნახ. 3.18. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10-ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა $t = 3$, და 6 სთ

ნახ. 3.18-დან ჩანს, რომ ქალაქისა და მის მიმდებარე ტერიტორიაზე ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში ფორმირებულია მიწისპირა ანტი-ციკლონური გრიგალი, რომლის ცენტრი მდებარეობს ქალაქის მიმდებარე აღმოსავლეთ ნაწილში. თვით ქალაქის ტერიტორიაზე ქარი სამხრეთ-აღმოსავლეთისა და სამხრეთისაა. ქალაქის ტერიტორიაზე კონცენტრაციის სიდიდე მცირეა და ურბანიზირებულ ტერიტორიაზე მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე არ აღემატება 5 მკგ/მ³-ს. ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მიღებულია აეროზოლის ვერტიკალური იზოთერმული განაწილება. მიწის ზედაპირიდან 100

მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის მნიშვნელობა ქალაქის თავზე, ტერიტორიის უმეტეს ნაწილში, 2,5-5 მკგ/მ³-ია. უფრო ზევით, 600 მ სიმაღლეზე კონცენტრაცია ოდნავ მცირდება და მისი მნიშვნელობა 2.5 მკგ/მ³-ია. აეროზოლის ანალოგიური სივრცული განაწილება არის შენარჩუნებული დილის 6 საათსთვისაც. აღნიშნული განაწილება ფორმირებულია ქარის ანტიციკლონური ველის გავლენით, რომელიც ერთის მხრივ ცდილობს ხელი შეუწყოს მიკროაეროზოლის ვერტიკალურ გავრცელებას, მეორე მხრივ - მოახდინოს მისი გატანა ქალაქის ტერიტორიიდან და გაავრცელოს ჩრდილო-აღმოსავლეთის მიმართულებით.

t=6 სთ-ის შემდეგ იწყება ქალაქის ატმოსფეროს დაბინძურების დონის მომატება და გრძელდება 9-10 სთ-მდე. t=9 სთ-ზე მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე კონცენტრაცია შედარებით მაღალია, როგორც ძირითად ავტომაგისტრალზე და ურბანიზებულ ტერიტორიებზე, ისე ქალაქის შემოგარენში (ნახ. 3.19).

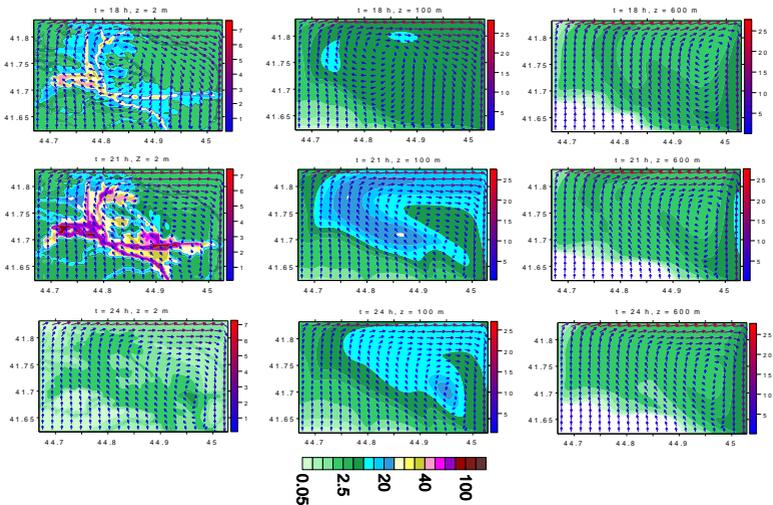


ნახ. 3.19. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10-ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 9, 12 და 15 სთ

მომატებული კონცენტრაცია 25-40 მკგ/მ³ მიღებულია ვაკის, საბურთალოს, გლდანის, თემქის რაიონებში და გურამიშვილს გამზირის, კახეთისა და სხვა გზატკეცილების მიდამოებში. დაბინძურების დონის ზრდას აქვს ასევე ადგილი მიწის ზედაპირიდან 100 მ

სიმაღლეზე და შედარებით მცირე ოდენობით 600 მ სიმაღლეზე. 100 და 600 მ სიმაღლეებზე კონცენტრაციების მნიშვნელობები 20-30 მკგ/მ³ და 10-15 მკგ/მ³-ის ფარგლებშია.

t = 9 -15 სთ-ის ინტერვალში მიღებულია კონცენტრაციის სუსტი შემცირება. ის დაკავშირებულია ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის კლებასა და ანტიციკლონური გრივალის ცენტრის დაახლოებასთან დაბინძურების წყაროებთან. ანალოგიურ სიტუაციას აქვს ადგილი მიწის ზედაპირიდან 100 და 600 მ სიმაღლეზე. გამოთვლებით მიღებულია, რომ PM10-ის მაქსიმალური მნიშვნელობები მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეზე შესაბამისად ტოლია 20-25, 10-15 და 5-10 მკგ/მ³ ს. მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის განაწილებებს შორის განსხვავება 9 და 12 სთ-ზე მეტად მცირეა. 16 სთ-ის შემდეგ იწყება მიწისპირა კონცენტრაციის ნელი ზრდა (ნახ. 3.20). ზრდა პირველ რიგში შესამჩნევია 2 მ სიმაღლეზე. 100 და 600 მ სიმაღლეებზე კონცენტრაციის ზრდას ფაქტიურად არა აქვს ადგილი.



ნახ. 3.20. ქარის სიჩქარის (მ/წმ) და PM10– ის კონცენტრაციის (მკგ/მ³) ველები ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენაში, როცა t = 18, 21 და 24 სთ

18 საათისთვის მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე ვაჟაფშაველას, ჭავჭავაძის, რუსთაველის გამზირების, თავისუფლების და

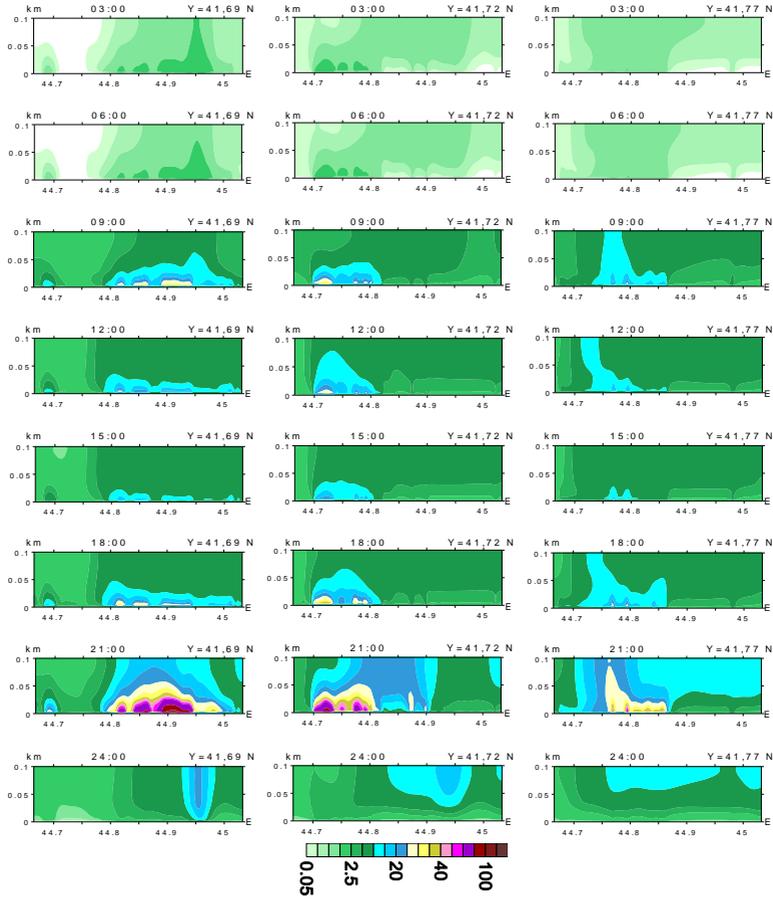
ერეკლეს მოედნების მიდამოებში PM10-ის კონცენტრაცია 35-40 მკგ/მ³-ია. სხვა ცენტრალური გამზირების სიახლოვეს კონცენტრაცია აღწევს 30 მკგ/მ³-ს.

ატმოსფეროს PM10-ით დაბინძურების დონის განსაკუთრებით სწრაფ მატებას აქვს ადგილი 18 სთ-ის შემდეგ. დაბინძურების ინტენსიური მომატება ხდება არა მარტო ქალაქის ცენტრალურ ნაწილში, არამედ პერიფერიებშიც: გლდანის და თემქის რაიონები, ორთაჭალა და ფონიჭალის მიდამოები, რუსთავისა და კახეთის გზატკეცილები და სხვ. როცა t=21 სთ კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები მაღალია დაბინძურების ტერიტორიის ცალკეულ მცირე ზომის უბნებში და იცვლება 80-100 მკგ/მ³-ის ფარგლებში, სხვა ძლიერ დაბინძურებულ ტერიტორიებზე - 50-70 მკგ/მ³-ია.

მიწისპირა კონცენტრაციის მომატებას თან სდევს მისი ზრდა ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ზედა და სასაზღვრო ფენის ქვედა ნაწილში. როცა t=21 სთ, მიწის ზედაპირიდან 100 და 600 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციების მნიშვნელობები შესაბამისად 20-25 მკგ/მ³ და 5-10 მკგ/მ³-ია. 100 მ სიმაღლეზე მომატებულ დაბინძურების არეს გააჩნია ნალისებრი ფორმა და იკავებს ქალაქის ცენტრალური და ჩრდილოეთი ნაწილის დიდ ტერიტორიას. 600 მ სიმაღლეზე მომატებული დაბინძურების არე იკავებს მოდელირების არის აღმოსავლეთ ნაწილს. აღსანიშნავია, რომ ფონური სამხრეთის ქარისაგან განსხვავებით (ნახ. 3.16, ნაწილი 3.1) ფონური ჩრდილოეთის ქარის დროს არ შეიმჩნევა საგრძნობი ფაზური ჩამორჩენა მიწისპირა და 100 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციების ცვლილებებს შორის.

t=21 სთ-ის შემდეგ იწყება მიწისპირა დაბინძურების დონის სწრაფი შემცირება, შედეგად მიწისპირა კონცენტრაციის სიდიდე ეცემა 5 მკგ/მ³-მდე. ანალოგიურ პროცესს აქვს ადგილი 100 და 600 მ სიმაღლეებზეც. ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ ქალაქის დაბინძურების პროცესი მუდმივი მეტეოროლოგიური პირობების შემთხვევაში კვაზიპერიოდულია. t=24 სთ-ის შემდეგ ქალაქის ტერიტორიაზე კონცენტრაციის ცვლილება იმეორებს ზევით აღწერილ პროცესს.

ნახ. 3.21-ზე ნაჩვენებია PM10-ის კონცენტრაციის განაწილება სამ ვერტიკალურ კვეთაში 3 საათიანი ინტერვალით. ნახზიდან ჩანს, რომ



5

ნახ. 3.21. PM10- ის კონცენტრაციის იზოზოლები ატმოსფეროს ქვედა 100 მ-იან ფენაში პარალელის გასწვრივ გამავალ სამ ვერტიკალური კვეთაში

ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მიკროაეროზოლის გავრცელების ძირითად მექანიზმს დღის 0-დან 18 საათამდე ინტერვალში წარმოადგენს ტურბულენტური გადატანის პროცესი. 18 სთ-ის შემდეგ აქტიურდება კონვექციური მექანიზმი, მაგრამ მისი ეფექტი არ არის დომინანტი.

ღასკვნა

თანამედროვე მსოფლიოში, როცა კულტურულ-რეკრეაციულ მონაცემებს ენიჭებათ სულ უფრო დიდი მნიშვნელობა და საოცრად სწრაფი ტემპით ვითარდება ტურიზმი, საქართველომ უნდა დაიმკვიდროს თავისი ღირსეული ადგილი მსოფლიოს ტურისტულ რუკაზე. ამას განაპირობებს მისი უნიკალური ბუნება, კლიმატური რესურსები, სამკურნალი თერმიული თუ მინერალური წყლები, და რაც მთავარია, მისი უძველესი კულტურა.

თავისი გეოპოლიტიკური მდებარეობის გამო იგი ევროპისა და ახლო აღმოსავლეთის დამაკავშირებელი სატრანსპორტო ცენტრია. მისი ტერიტორიის გავლით ყოველდღიურად გადაიტანება ათეულ ათასობით ტონა ტვირთი, გადაადგილდება ასეულ ათასობით ადამიანი. მის ქალაქებსა და ურბანიზაციის ცენტრებში მოძრაობს ათასობით ავტომობილი. ამას ემატება სამხრეთ კავკასიაში მოქმედი ინდუსტრიული საწარმოები, რომელთა ფუნქციონირების შედეგად ატმოსფეროში გაიფრქვევა დიდი რაოდენობით დამაბინძურებელი ნივთიერებები, რომელთა გავრცელება იწვევს ჰაერის ხარისხის გაუარესებას, ქმნის ეკოლოგიურ პრობლემებს და აფერხებს საქართველოში კულტურულ-რეკრეაციული და ტურისტული მიმართულებების განვითარებას. ცხადია, ყველაფერმა ამან წინ წამოწია ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებისაგან დაცვის ისეთი ღონისძიებების შემუშავება, რომლებიც არ შეაფერხებენ ქვეყნის ეკონომიკურ განვითარებას.

წარმოდგენილ ნაშრომში შესწავლილია ატმოსფეროს ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი დამაბინძურებლის - მიკრონაწილაკების (PM2.5 და PM10) გავრცელება საქართველოს ადმინისტრაციული და ინდუსტრიული ცენტრის, ქ. თბილისისა და მისი შემოგარენის ატმოსფეროში. პრობლემა შესწავლილია ექსპერიმენტალური გაზომვების მონაცემებსა და კომპიუტერულ მოდელირებაზე დაყრდნობით. ნაშრომში გამოყენებულია გარემოს ეროვნული სააგენტოს ჰაერის ხარისხის მონიტორინგის ოფიციალური მონაცემები და სტუ ჰიდრომეტეოროლოგიის და თსუ ივ.ჯავახიშვილის სახ. მ. ნოდias გეოფიზიკის ინსტიტუტებში ჩატარებული კვლევების შედეგები.

შესავალში განხილულია ატმოსფეროში PM2.5 და PM10 გავრცელებით გამოწვეული შესაძლო ნეგატიური შედეგები, მითითებულია მათი წარმოშობის წყაროები და შემადგენელი ინგრედიენ-

ტები. პრაქტიკულად წარმოდგენილი ნაშრომი არის პირველი მცდელობა მეცნიერულ დონეზე შეისწავლოს ქ. თბილისის ატმოსფერული ჰაერის PM2.5 და PM10 დაბინძურება რეგულარული დაკვირვების, სავლე გაზომვების მონაცემების ანალიზისა და კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით.

თავი 1 ეძღვნება ქ. თბილისის ატმოსფეროს მიკრონაწილაკებით დაბინძურების ანალიზს ნატურული დაკვირვების მონაცემებზე დაყრდნობით. აქ მოცემულია ატმოსფერული ჰაერის მიკროაეროზოლებით დაბინძურების კვლევის მოკლე მიმოხილვა, ასევე, რთული ლიეფის ტერიტორიაზე ატმოსფეროში დამაბინძურებელი მინარევების გავრცელების განტოლებათა სისტემა. ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში მეტეოროლოგიური ველებისა და კონცენტრაციების განსაზღვრის მეთოდი. რიცხვითი ინტეგრირების ალგორითმი.

თავი 2-ში მოცემულია ატმოსფეროში მიკრონაწილაკების გავრცელების ანალიზი, ოპერატიული დაკვირვების მონაცემებზე და ექსპერიმენტული გაზომვების შედეგებზე დაყრდნობით. გაკეთებულია დასკვნა, რომ ქ.თბილისის ატმოსფეროში PM2.5 ნაწილაკების კონცენტრაციები, როგორც წესი, ნაკლებია PM10-ის კონცენტრაციებზე, მაგრამ მათი ცვლილების მრუდის ხასიათი ერთნაირია. მათი მაქსიმალური მნიშვნელობები თითქმის ყოველთვის აღემატება შესაბამის ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციებს (ზდკ) ზამთრის პერიოდში, ხოლო ზაფხულის პერიოდში ხშირ შემთხვევაში ნაკლებია შესაბამის ზდკ-ზე.

მოცემულია, რომ PM ნაწილაკების კონცენტრაციების საათობრივი ცვლილების ტრენდი დღის განმავლობაში ხასიათდება მატების ტენდენციით და თავის მაქსიმუმს აღწევს საღამოს 20 საათის შემდეგ. გამოვლენილია პანდემიის გავლენა მტვრის ნაწილაკების კონცენტრაციის შემცირებაზე ქალაქის ატმოსფეროში და რომ თბილისის ატმოსფეროს PM ნაწილაკებით დაბინძურებაში ძირითადი წვლილი შეაქვს ავტოტრანსპორტს.

ქ. თბილისისა და მისი შემოგარენში პირველად ჩატარებული სავლე ექსპედიციის ფარგლებში გაზომილია PM2.5 და PM10 ნაწილაკების კონცენტრაციები ქალაქის ძირითადი 650 კმ სიგრძის მაგისტრალზე და მიმდებარედ არსებულ დაკვირვების 400 წერტილში. დადგენილია, რომ იშვიათი გამონაკლისის გარდა, მაგისტრალის გასწვრივ PM2.5 და PM10 ნაწილაკების კონცენტრაციების ცვლილება ერთნაირია. გამოვლენილია ქ. თბილისისა და მისი შე-

მოგარენის მაქსიმალურად დაბინძურებული უბნები: აეროპორტის ტრასა, მტკვრის მარცხენა სანაპირო, საბურთალოს და გლდანის რაიონები.

თავი 3 ეძღვნება ქ.თბილისში მიკრონაწილაკების ლოკალური გავრცელების რიცხვით მოდელირებას ფონური ჩრდილოეთის, სამხრეთის და დასავლეთის სუსტი ქარების დროს. ნაჩვენებია, რომ ფონური ჩრდილოეთის სუსტი ქარის დროს ქალაქის ოროგრაფია ხელს უწყობს მის განიავებას და მიკრონაწილაკების დაბინძურება არ არის მაღალი. გამონაკლისს წარმოადგენს ქალაქის ორი – ვაკისა და ფონიჭალის რაიონები, სადაც PM2.5-ის კონცენტრაცია 11 და 21 სთ–ის მახლობლობაში აღწევს და აჭარბებს 25 მკგ/მ³.

ფონური სამხრეთის სუსტი ქარის დროს რელიეფის ზემოქმედების შედეგად ქალაქის ტერიტორიის უმეტეს ნაწილში ფორმირდება კვაზისტაციონალური სამხრეთის ქარი. რთული რელიეფის გავლენა ქარის სიჩქარეზე განსაკუთრებით ვლინდება ქალაქის ჩრდილოეთ და ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილებში. ამ დროს მიკრონაწილაკების სივრცული განაწილება არაა ერთგვაროვანი: ქალაქის უმეტეს ნაწილში მათი კონცენტრაციები მერყეობს 0.001-0.01 მკგ/მ³ - ის ფარგლებში. ქალაქის ცენტრში, კახეთის გზატკეცილსა და ქალაქების თბილისისა და რუსთავის დამაკავშირებელი მაგისტრალის მიდამოებში იცვლება 1-დან - 5 მკგ/მ³-ის ფარგლებში. გაკეთებულია დავასკვნათ, რომ სამხრეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევაში ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში აეროზოლის გავრცელების უპირატეს მექანიზმს ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ტურბულენტური დიფუზია წარმოადგენს. ტურბულენტურ ნაკადებს გააქვს აეროზოლი მიწისპირა ფენიდან სასაზღვრო ფენაში, სადაც ადვექციური გადატანა იწვევს დაბინძურების დიდ ფართობზე გაფანტვასა და ჰაერის თვითგასუფთავებას.

ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს ზამთრის სეზონში დროის 0–6 სთ ინტერვალში ადგილი აქვს PM10 კონცენტრაციის შემცირებას. მტვრის კონცენტრაცია, როცა $t=0$ სთ, შედარებით მაღალია $z=100$ მ სიმაღლეზე ქალაქის ცენტრალურ და სამხრეთ აღმოსავლეთ ნაწილებში. დღის 18-21 სთ ინტერვალში კონცენტრაციის სიდიდე აღწევს 80–90 მკგ/მ³. მაღალი დამტვერიანების არედან დაშორებისას კონცენტრაცია თანდათანობით მცირდება და მისი მნიშვნელობა ქალაქის პერიფერიულ ნაწილებში უტოლდება 0.05 მკგ/მ³-ს . ამავე დროს PM10–ის კონცენტრაცია მიწის ზედაპირიდან

600 მ სიმაღლეზე მეტია 2 მ სიმაღლეზე მიღებულ კონცენტრაციაზე. აღნიშნული ეფექტი მიუთითებს აეროზოლის თერმიული კონვექციური გადატანის დიდ როლზე დროის 21–დან 24 სთ–მდე ინტერვალში. 0–დან 6 სთ–მდე ინტერვალში ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში PM10–ის კონცენტრაცია მცირედ იცლება. PM10–ის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება აჩვენებს, რომ ატმოსფეროს მიწისპირა ფენის ქვედა ნაწილში PM10–ის გავრცელების უპირატეს მექანიზმს კონვექციური გადატანა წარმოადგენს, რომელსაც 18 საათის შემდეგ, მიწისპირა ფენის ზედა ნაწილში, ემატება ჰორიზონტალური ადვექციის პროცესი.

ამრიგად, გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ქ. თბილისის ატმოსფეროში მიკროაეროზოლების კონცენტრაციების დროსა და სივრცეში ცვლილება რთულია. ის დამოკიდებულია, როგორც ატმოსფეროს დამაბინძურებელი წყაროების მდებარეობაზე და ინგრედიენტის სივრცეში გაფრქვევის ინტენსივობაზე, ასევე რელიეფის გავლენით ფორმირებულ ლოკალურ მეტეოროლოგიურ პროცესებზე.

ლიტერატურა-REFERENS

1. J.M. Samet, S.L.Zeger, F. Dominic, F. Curriero, et al. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and Mortality from Air Pollution in the United States; Research Report, 94. Health Effects Institute: Cambridge, MA, USA, 2000.
2. C.A Pope., R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. J. Am. Med. Assoc, 287, 2002, pp. 1132–1141.
3. K. Katsouyanni, G.Touloumi, C.Spix, J. Schwartz, et al. Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: Results from time series data from the APNEA project. BMJ, 314, pp.1658–1663, 1997.
4. Ю.А. Израэль. Экология и контроль состояния природной среды. Ленинград, Гидрометеиздат, 1979. 375 с.
5. M. Hadei, A. Shahsavani et al. Burden of mortality attributed to PM_{2.5} exposure in cities of Iran; contribution of short-term pollution peaks. Atmospheric Environment, vol._224, 2020, 117365. [https://doi.org/ 10.1016/j.atmosenv.2020.117365](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117365)
6. F.J. Gonzalez-Barcala, S. Pertega, et. al. Truck traffic related air pollution associated with asthma symptoms in young boys: a cross-sectional study. Public Health, 127, 2013., 10.1016/j.puhe.2012.12.028
7. The Global Health Cost of Ambient PM_{2.5} Air Pollution. Pollution Management & Environment Health. World Bank Group.
8. Загрязнение воздуха и жизнь растений. Под ред. М. Трешоу. Ленинград, Госгидрометиздат, 536 с.
9. Average PM2.5 concentration of the most polluted countries in the world in 2019 and 2020. <https://www.statista.com/statistics/1135356/most-polluted-countries-in-the-world/>
10. List of most polluted cities by particulate matter concentration. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most-polluted_cities_by_particulate_matter_concentration. Environmental pollution, https://air.gov.ge/reports_page
11. ს. გუნია, გ. გუნია. გარემოს გაჭუჭყიანების თანამედროვე მდგომარეობა. თბილისი, მეცნიერებადატექნიკა. 1975, გვ. 53-56.
12. Г.С. Гуния. Вопросы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на территории Грузинской ССР. Ленинград, Гидрометеиздат. 1985, 84 с.
13. С.У. Гуния., Г.С. Гуния. К вопросам исследования состояния загрязнения атмосферы на территории Грузинкой ССР. Труды ГрузСХИ, 101, 1977, с. 201-208.

14. G. Gunia, Z. Svanidze, L. Svanidze. The Determination of Metals' Microadmixtures in Atmospheric Air. Bull. Georg. Acad. Sci., v. 154, No. 3, 1996, pp. 165-170.
15. გ. გუნია. ატმოსფეროს ეკოლოგიური მონიტორინგის მეტეოროლოგიური ასპექტები. თბილისი, ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი, 2005, 265 გვ.
16. D. Gordeziani, T. Davitashvili, Z. Khvedelidze. On the One Mathematical Model of the Georgian Transport Corridor Pollution. Bulletin of the Georgia Academy of Sciences 162 (1), 2000, pp. 73-76.
17. T. Davitashvili. Mathematical modeling pollution from heavy traffic in Tbilisi streets WSEAS Transon Environment and Development, v. 5, 2009, pp. 498-507,
18. T. Davitashvili, I. Samkharadze. Mathematical Model of Georgian Territory Pollution with account of „Hot Points”. Elanlarged Sessions of I. Vekua Institute of Applied Mathematics, vol. 20, No. 3, 2005, pp. 51-58.
19. D. Gordeziani, T Davitashvili. Mathematical model of the atmosphere pollution with non-classic boundary condition. Applied Mathem. and Informatics 4 (1), 1999, pp. 75-92.
20. Т.С. Уланова, М.В. Антипева, М.В. Волкова, М.И. Гилева. Исследование содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе вблизи автомобильных дорог. DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.05.
21. В.Ф. Ккутенов, В.В. Степанов, В.К. Азаров. О реальном Выбросе Твердых частиц автомобильным транспортом. Экология, № 4(81), 2013, с. 45-47.
22. М.В. Графкина, А.В. Азаров, Д.Р. Добринский, Д.А. Никененко. К вопросу контроля и нормирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферном воздухе при движении автомобильного транспорта. Вестник МГСУ. 2017, т. 12, вып. 4(103), с. 373-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.373-380.
23. В.Н. Азаров. Об организации мониторинга PM_{10} и $PM_{2.5}$ на примере г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного 2011. Вып. 25 (44). С. 398–401.
24. A. S Monin. Theequationofturbulentdiffusion. Dokl. Akad. Nauk. SSSR.1955, v. 105, p. 256-259.
25. R.W Boubel, Donald L.F, D.B. Turner and A.C. Stern.Fundamentals of Air Pollution - (Third Edition). Academic Press, 1994. 574 pp. www.sciencedirect.com/science/book/9780080507071
26. Степаненко С.Н., Волошин В.Г. Анализ Функции плотности распределения концентрации в гауссовых моделяхрассеяние примеси в атмосфере, 2008, № 3, с. 5-15.

27. М.Е. Верлянд. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы. Ленинград Гидрометеоиздат, 1975.
28. Schwere, S., A. Stohl and M. W. Rotach, 2002: Practical considerations to speed up Lagrangian stochastic particle models. *Computers & Geosciences* Vol. 28, 143-154.
29. Cheng X., Ding G., Li D. Differences in MM5 and WRF Meteorological Field Simulations and Impact on Air Quality Forecasting by CMAQ Model. *Res. Environ. Sci.*, 2009,22, 1411-1419.
30. Surmava A.A. Numerical investigation of the modeling of transportation and deposition of the radioactive pollution in the Caucasian Region in case of the hypothetical accident on the Armenian Nuclear Power Plant. *Journal of the Georgian Geophysical Society*. 15B, 2012, pp. 32-45.
31. Kordzadze A., Surmava A., Kukhalashvili V. Numerical investigation of the air possible pollution in case of large hypothetical accidents at some industrial territories of the Caucasus. *Journal of the Georgian Geophysical Society*. 16 B, 2013, pp.13-23.
32. Surmava, V. Kukhalashvili. Numerical modeling of the possible pollution of the atmosphere over the eastern part of the Black Sea. *Bulletin of Akaki Tsereteli State University*, 2013, pp. 122–125.
33. A. Surmava, N. Gigauri. Spatial Distribution of Dust Concentration in Kakheti Atmosphere in Case of Non-stationary Sources of Pollution, *J. Georgian Geophysics Soc.*, Issue B, Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, 2016, v. 19b, pp. 18-25.
34. A. Surmava, L. Gverdsiteli, N. Gigauri, L. Intskirveli. Numerical Simulation of Dust Distribution over the Complex Terrain Region of Georgia. *Journal of the Georgian Geophysical Society*, Issue A. v. 20 A, 2017, pp. 37-43.
35. Surmava. A. Numerical Modeling of Zestafoni City Dust Dispersion in case of Western Wind. *J. Georgian Geophysics Soc.*, Issue B, Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v. 21(2), 2018, pp. 21-26.
36. Gigauri N.G. Gverdsiteli L.V., Surmava A.A., Intskirveli L.N. Numerical Simulation of Industrial Dust Distribution in the Territory of Zestafoni, Georgia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. V. 230. 2018. pp. 119-128
37. Gigauri N.G. Gverdsiteli L.V., Surmava A.A., Intskirveli L.N. Numerical Simulation of Industrial Dust Distribution in the Territory of Zestafoni, Georgia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. V. 230. 2018. pp. 119-128.
38. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва, Наука, 1982, 320 с.
39. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. Ленинград, Гидрометеорологическое издательство, 1969.

40. ა. სურმავა, ლ. ინწკირველი, ვ. კუხალაშვილი. მტვრის ტრანსპორტი, რეგიონული და ლოკალური გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. თბილისი, სტუ, 2021, 118 გვ.
41. Zilitinkevich S.S., Monin A.S. Turbulence in dynamic models of the atmosphere. Leningrad, Nauka, 1971.
42. Marchuk G.I., Kochergin V.P., Sarkisyan A.S., et al., Mathematical models of ocean circulation. Nauka, Novosibirsk, 1980.
43. Гандин Л.С., Данович А.М., и др. Задачник по динамической метеорологии. Ленинград, Гидрометеиздат 1967, 218 с.
44. Orlanski I. A rational sub division of scales for atmospheric processes. Bull. Amer. Meteorol. Soc., vol. 56, 1975, pp. 527-530.
45. Ogura Y. A review of numerical modeling research on small-scale convection in the atmosphere. Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., No. 27, 1963, pp. 65-76.
46. Gambo K. The characteristic feature of medium-scale disturbances in the atmosphere, pt. I. J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II, 48, No. 3, 1970, pp. 328-341.
47. Пушистов П.Ю., Шличков В.А. Влияние планетарного Пограничного слоя на развитие крупно- и среднemasштабных бароклинных волн. Изв. АН СССР, Физика Атмосферы и океана, т. 13, No. 2, с. 115-122.
48. Гандин Л.С., Лайхтман Д.Л., Матвеев Л.Т., Юдин М.И. Основы динамической метеорологии. Ленинград, Гидрометеиздат. 1955, 647 с.
49. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Динамика облаков. Ленинград, Гидрометеиздат, 1984, 752 с.
50. Чаилдс Э. Физические основы гидрологии почв. Ленинград, Гидрометеиздат, 1973, 329 с.
51. Чудновский А.Ф. Теплофизика почвы. Москва, Наука, 1976, 352 с.
52. Будаговский А.И. Впитывание воды в почву. Москва, Изд-во АН СССР, 1955, 253 с.
53. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград, Гидрометеиздат, 1974, 304 с.
54. Казаков А.Л., Лазриев Г.Г. Л. О параметризации приземного слоя атмосферы и деятельного слоя почвы. Изв. АН СССР, Геофизика, 1978, No. 3.
55. Shuman F.G., Hovermale L.R. An operational six-level primitive equation model. Journ. Appl. Mech., v. 7, No.4, 1968, pp. 525-547
56. Шуман Ф. Многоуровневая модель по полным уравнениям. Лекции по численным методам прогноза погоды. Ленинград, Гидрометеиздат, 1969, с. 481-498.



ალექსანდრე სურმაგა - ფიზიკა მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტისა და ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელი.

ლიანა ინწკირველი - ქიმიურ მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის ბუნებრივი გარემოს დაბინძურების მონიტორინგისა და პროგნოზირების განყოფილების ხელმძღვანელი.



ნათია გიგაური - ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის აკადემიური დოქტორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი

ვეფხია კუხალაშვილი - მათემატიკის მაგისტრი, ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტის მეცნიერ თანამშრომელი.

