

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

დოქტორანტურის საგანმანათლებლო პროგრამა „ფიზიკა“

ინგა სამხარაძე

არაორდინარული ატმოსფერული პროცესებისა და გარემოს დაბინძურების
ზოგიერთი საკითხების მოდელირება საქართველოს რთული ოროგრაფიის
პირობებში

ფიზიკის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაცია

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: თეიმურაზ დავითაშვილი
ფიზ.მათ.მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი

თბილისი
2022 წელი

Ivane Javakishvili Tbilisi State University
Faculty of Exact and Natural Sciences

Doctoral Program: **Physics**

Inga Samkharadze

**Modeling of Extraordinary Atmospheric Processes and Some Environmental
Pollution Issues in the Complex Orography of Georgia**

The thesis work is performed to obtain a PhD academic degree in Physics

Scientific Supervisor: Teimuraz Davitashvili,
Doctor of Phys-Math Sciences, Professor.

Tbilisi
2022 Year

აბსტრაქტი

სადისერტაციო ნაშრომში სამგანზომილებიანი ჰიდროსტატიკური მეზომასტაბური მოდელის საფუძველზე შესწავლილია ჰაერის დინების თავისებურებები, იზოლირებული დაბრკოლებისა და სამხრეთ კავკასიის რეალურ რელიეფის შემთხვევაში, არასტაციონარული ფართომასშტაბიანი ფონური პროცესების პირობებში. რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ ტროპოსფეროში ოროგრაფიულ თავისებურებების გავლენა მნიშვნელოვნად გარდაქმნის არამდგრად ფონურ ნაკადს. კერძოდ, ატმოსფეროს სინოპტიკური მასშტაბის მოძრაობის დროს მნიშვნელოვნად იზრდება ვერტიკალური მიმართულებით მეზომასტაბური ნაკადის ამპლიტუდები და საშუალო მნიშვნელობიდან მათი გადახრის სიდიდეები (ქარის სიჩქარის მაქსიმალურმა სიდიდემ მიაღწია 26 მ/წმ-ს, როდესაც შეუშფოთებელი ფონური ჰაერის ნაკადის სიჩქარე იყო 12 მ/წმ). გარდა ამისა, ნაჩვენებ იქნა, რომ ფონური დინების არარსებობის შემთხვევაშიც, ატმოსფერული ქარის სიდიდემ შეიძლება მნიშვნელოვნად მოიმატოს რელიეფის გავლენით. გარდა ამისა, რიცხვითი თვლის შედეგებმა აჩვენა, რომ ტროპოსფეროში კავკასიონის ქედის გავლენით (მოდელირებული რელიეფის პირობებში) მნიშვნელოვნად გაიზარდა ატმოსფერული დინების ამპლიტუდები და გაჩნდა მორევის ტიპის ტურბულენტური სტრუქტურები მაშინაც კი, როდესაც ფონური დინება იყო მცირე. ეს შედეგები პირველად იქნა მიღებული რიცხვითი მოდელირებით და კარგ თანხმობაშია მეტეოროლოგიურ დაკვირვებათა მონაცემებთან.

ასევე იმერეთის რეგიონის ძლიერი ქარების რეჟიმი და სტატისტიკური მახასიათებლები შესწავლილია ქუთაისის მეტეოროლოგიური სადგურის მონაცემების საფუძველზე. 1960-2021 წ.წ. პერიოდისათვის ქარის სიჩქარეები დაყოფილია 5 მ/წმ შუალედებად და თითოეული შუალედისთვის შესწავლილია ქარის სიჩქარეთა განმეორებადობა თვეების მიხედვით. ნაჩვენებია ქარის სიჩქარეთა გრადაციების პროცენტული განაწილება და მათი საშუალო მნიშვნელობების ცვლილება წლებისა და თვეების მიხედვით. დადგენილია რომ ენერგეტიკული თვალსაზრისით ქუთაისის

რეგიონისთვის ძირითადი წამყვანი ქარის სიჩქარის შუალედი 16-20 მ/წმ. უნდა აღინიშნოს აგრეთვე ისიც, რომ ზაფხულში 20-25 მ/წმ ინტერვალების ქარის მნიშვნელობები მინიმალურია დანარჩენი სეზონების ქარის მნიშვნელობებთან შედარებით, მაგრამ ენერგეტიკული თვალსაზრისით ეს არ არის მნიშვნელოვანი, რადგანაც ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედი უზრუნველყოფს ქარის ენერჯის გამოყენების მაქსიმალურ ეფექტურობას. ამგვარად, ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია ასეთი სიდიდის სიჩქარეები, რომლებიც უზრუნველყოფს ქარის ენერგეტიკული დანადგარის ავტომატურ რეჟიმს და წარმოადგენს ქარის ელექტროსადგურების გავითარებისთვის მნიშვნელოვან საუბველს დასავლეთ საქართველოში.

სადისერტაციო ნაშრომში შეისწავლება თავსხმა ნალექებისა და სეტყვის პროგნოზირების საკითხები, დაფუძნებული, ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების (WRF v.3.6) მოდელის რიცხვითი გათვლებზე, ARL READY-ის ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის მახასიათებლებზე და კახეთის მეტეოროლოგიური რადარით მიღებულ რეალურ მონაცემთა ურთიერთ შედარების ანალიზზე. თავდაპირველად კვლევები ეფუძნებოდა 2015-16 წლებში აღმოსავლეთ საქართველოში მეტეოროლოგიური რადარით დაფიქსირებულ რამოდენიმე ძლიერ თავსხმა წვიმისა და სეტყვის შემთხვევების შესწავლას. კერძოდ, აღნიშნული პროცესები შესწავლილ იქნა WRF მოდელის დრუბლების სამი და მიკროფიზიკის ხუთი პარამეტრიზაციის სქემების ყველა შესაძლო კომბინაციის მოდელირებითა და ARL READY სისტემის ძირითადი არამდგრადობის ენერჯის მახასიათებლებით, რითაც შეფასდა ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა. მიღებული შედეგების ველიდაციის მიზნით, შესწავლილ იქნა ყველა ის შემთხვევა როდესაც აღმოსავლეთ საქართველოში ადგილი ჰქონდა საშიშ მეტეოროლოგიურ მოვლენებს (თავსხმა წვიმა ,სეტყვა) 2015-19 წლებში. აღმოჩნდა, რომ ყველა შესწავლილ შემთხვევისთვის ARL READY სისტემის არამდგრადობის ენერჯის მახასიათებელი CAPE-ის რიცხვითი მნიშვნელობები იყო მაქსიმალური 09:00-15:00 UTC დროის შუალედში, როცა ნიადაგის მაღალი ტემპერატურის გამო ხელსაყრელი პირობები იქმნებოდა კონვექციური პროცესების

განვითარებისთვის. დისერტაციაში შემოთავაზებულია, რომ საშიში ლოკალური ატმოსფერული პროცესების WRF მოდელით პროგნოზირებისას აუცილებელია შესწავლილ იქნას ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა 09:00-15:00 UTC დროის შუალედში ARL READY სისტემის ერთერთი ძირითადი ინდიკატორის CAPE-ს საფუძველზე, რაც სიახლეა.

საქართველოში ისევე როგორც მთელს მსოფლიოში საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენების გახშირების ერთერთი ძირითადი მიზეზი გახდა ატმოსფეროში დამაბინძურებელ ნივთიერებათა კონცენტრაციების მკვეთრი ზრდა. ვინაიდან საქართველოში ერთ-ერთ მთავარ დამაბინძურებელ ნივთიერებას მტვერი წარმოადგენს, ამიტომ პირველად სადისერტაციო ნაშრომში შესწავლილ იქნა უდაბნოებიდან საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის მიგრაციის სახითხი რიცხვითი მოდელებისა და დისტანციური ზონდირების პროდუქტების საშუალებით. ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების ქიმიური WRF-Chem მოდელით ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ 2017 წლის ნოემბრიდან 2017 წლის დეკემბრამდე საქართველოს ტერიტორიაზე დაფიქსირდა უდაბნოებიდან მტვრის შემოტანის 9 შემთხვევა. ამათგან ორი ტიპური შემთხვევა, რომლებსაც ადგილი ჰქონდათ - 2018 წლის 22-24 მარტსა და 25-26 ივლისს დაწვრილებით განხილულია და შესწავლილია სადისერტაციო ნაშრომში. თვლის შედეგების ველიდაციამ სატელიტურ CALIPSO, MODIS და ავტომატური მეტეოროლოგიური სადგურის PM10 გაზომილ მონაცემებთან აჩვენა, რომ ჩვენს მიერ პარამეტრიზებული WRF-Chem მოდელი კარგად აღწერდა უდაბნოებიდან საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ტრანსპორტირებას კავკასიის რთული ოროგრაფიის პირობებში. გარდა ამისა, კვლევამ აჩვენა, რომ უდაბნოდან წამოსული მტვერი გავლენას ახდენდა საქართველოს კლიმატურ პარამეტრების ცვლილებაზე. ასევე, WRF-Chem და HYSPLIT რიცხვითი მოდელების თვლის შედეგების ურთიერთ შედარებამ აჩვენა, რომ შესწავლილი პერიოდის განმავლობაში, მტვრის გადატანა საქართველოს ტერიტორიაზე წარმოებდა თანაბრად აფრიკის, შუა აღმოსავლეთისა და ცენტრალური (დასავლეთი) აზიის უდაბნოებიდან. უნდა აღინიშნოს, რომ ყარაყუმისა და კიზილკუმის უდაბნოებიდან მტვრის შემოტანა დაფიქსირდა ორჯერ, რომლის

კვალი ჯერაც არ იყო დაფიქსირებული არც კავკასიის მყინვარებზე ელბრუსი და ყაზბეგი.

Abstract

The dissertation is devoted to the study of the air flow characteristics based on the three-dimensional hydrostatic mesoscale model, in the case of isolated obstacles and real relief of the South Caucasus region under non-stationary large-scale background processes. An analysis of the results of numerical experiments showed the occurrence of some orographic effects in the troposphere, at significant transformations of the unsteady background flow. In particular, during the damping of the motion of the synoptic scales, the amplitudes of the mesoscale flow of the vertical directions and the deviation of the velocity from their average value increased significantly (the maximum values of wind speed reached 26 m / s, when the speed of the unperturbed background air flow was 12 m / s). In addition, it was shown that even in the absence of a background current, an atmospheric wind may exist with significant speeds over mountainous areas. Besides, the calculation results showed that over the Caucasus ridges (as in the case of the modeled relief), there is a significant increase in the amplitudes of atmospheric currents throughout the troposphere and the existence of vortex structures even when the background flow approaches the state of calm. These results were first obtained by numerical modeling and are in good agreement with meteorological observations.

The strong wind regime and statistical characteristics of the Imereti region were researched according to the data of the Kutaisi Meteorological Station. For the period 1960-2021, the wind speeds are divided into intervals of 5 m/s, and for each interval the wind speed recurrence rate is studied by months. The paper presents the percentage distribution of wind speed gradations and the change in their average values over the years and months. It has been determined that in terms of energy, the main range of wind speed for the Kutaisi region is 16-20 m/s. It should also be mentioned that the wind values at intervals of 20-25 m/s in summer are minimal compared to the wind values in other seasons. But from an energy point of view, this is less important because a wind speed interval of 16-20 m/s ensures maximum efficiency of wind energy use. Thus, from an energy point of view, speeds of such magnitude are essential,

which ensure the automatic mode of the wind farms and are an important basis for the development of wind power plants in western Georgia.

The dissertation deals with the issues of forecasting excess precipitation and hail, based on numerical calculations of the weather research and forecasting model (WRF v.3.6), the thermodynamic state characteristics of the ARL READY atmosphere, and the analysis of mutual comparison of real data obtained with Kakheti meteorological radar. Initially, the researches were based on the study of several cases of heavy rain and hail detected by meteorological radar in Eastern Georgia in 2015-2016. In particular, these processes were studied by modeling all possible combinations of three cloud parameterization schemes of the WRF model and five microphysical models and ARL READY with the main characteristics of the energy instability of the system, which made it possible to estimate the thermodynamic state of the atmosphere. In order to confirm the results obtained, all the cases were studied when in Eastern Georgia in 2015-2019 severe weather phenomena (rain, hail) took place. It was found that for all the studied cases, the numerical values of the CAPE characteristic of the energy instability of the ARL READY system were maximum, from 09:00 to 15:00 UTC, when due to the high temperature of the soil, favorable conditions were created for the development of convection processes. The dissertation suggests that when predicting hazardous local atmospheric processes with the WRF model, it is necessary to study the thermodynamic state of the atmosphere from 09:00 to 15:00 UTC, based on the CAPE, one of the key indicators of the ARL READY system, which is a novelty.

One of the main reasons for the exacerbation of dangerous meteorological conditions in Georgia, as well as throughout the world, was the sharp increase in the concentration of pollutants in the atmosphere. Since dust is one of the main pollutants in Georgia, therefore, for the first time in the dissertation, the issue of dust migration from the deserts to the territory of Georgia was studied, through numerical models and Remote Sensing Products. The results of calculations performed by the Weather Research and Forecasting Chemistry model (WRF-Chem) from December 2017 to November 2017 showed that nine cases of dust transfer to the territory of Georgia were recorded. Two of them, which took place on March 22-24 and July

25-26, 2018, are modeled and discussed in this dissertation. Comparison of the calculation results with the data of observations of PM10 particulate matter and satellite products of the Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) showed that the chosen WRF-Chem model satisfactorily simulates the transport of desert dust to the territory of Georgia in the complex orography of the Caucasus. In addition, aeolian dust aerosol transported from deserts turned out to be a significant pollutant and influenced the climate in Georgia. Indeed, the calculations of the WRF-Chem model showed that during the period under study, dust was transferred to the territory of Georgia equally from the deserts of Africa, the Middle East and Central (West) Asia. It should be noted that among them the transfer of dust from the Karakum and Kyzylkum deserts was recorded twice, the traces of which have not yet been recorded on the glaciers of the Caucasus (Elbrus and Kazbeg).

შ ი ნ ა ა რ ს ი

აბსტრაქტი

Abstract

შესავალი 13

თავი 1. პრობლემის ისტორიული ანალიზი და კვლევის ამოცანის დასმა. 18

1.1. რთული ოროგრაფიის პირობებში ექსტრემალური მეტეოროლოგიური პროცესების პროგნოზის თეორიული კვლევების მოკლე მიმოხილვა 18

1.2. ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების თეორიული კვლევების მოკლე მიმოხილვა. 24

თავი 2. ჰაერის მასების დინამიკა მთა-ხეობებში. 28

2.1. ზონალური ჰაერის ნაკადის რიცხვითი მოდელირება კავკასიის რეგიონისათვის. 28

2.2. ჰაერის ნაკადი იზოლირებული დაბრკოლების შემთხვევაში. 33

2.3. ჰაერის ნაკადის მოდელირება კავკასიის რეალური ტოპოგრაფიის შემთხვევაში. 35

2.4. ქარის რეჟიმი ქუთაისის მეტეოსადგურის მონაცემების მაგალითზე. 41

2.5. მეორე თავის დასკვნა. 56

თავი 3. რთული ოროგრაფიის პირობებში ლოკალური კონვექციური პროცესების შესწავლა WRF მოდელითა და Ready სისტემის გამოყენებით. 58

3.1. WRF მოდელის მონაცემები და მეთოდოლოგია. 58

3.2. რიცხვითი გათვლები WRF მოდელის პარამეტრიზაციის სქემების საშუალებით . 63

3.3. Ready სისტემის მონაცემები და მეთოდები. 71

3.4. Ready სისტემის აეროლოგიური დიაგრამებით ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის შეწავლა. 81

3.5. საქართველოში მიმდინარე ზოგიერთი ექსტრემალური კონვექციური პროცესების განხილვა მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების საფუძველზე. 96

3.6. WRF მოდელისა და Ready სისტემის მიღებული შედეგების შედარება რადარის რეალურ მონაცემებთან. 103

3.7. მესამე თავის დასკვნა. 108

თავი 4. საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ნაწილაკების მიგრაციის შესწავლა. 109

4.1. საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ნაწილაკების მიგრაციის შესწავლა WRF-Chem მოდელით. 109

4.2. საქართველოში მტვრის ნაწილაკების გადატანის შესწავლა Hysplit მოდელით..	117
4.3. WRF-Chem v.3.6.1 და HYSPLIT მოდელის თვლით მიღებული შედეგების შედარება სატელიტურ CALIPSO და MODIS მონაცემებთან.	119
4.4. მეოთხე თავის დასკვნა.	126
დასკვნა	128
სადოქტორო ნაშრომის ფარგლებში გამოქვეყნებული სტატიები	132
გამოყენებული ლიტერატურა	133

აბრევიატურა

- ACM2**- Asymmetric Convective Model(ასიმეტრიული კონვექტიური მოდელი)
ADA- Aeolian Dust Aerosol(საჰაერო მტვრის აეროზოლი)
AFWA- Air Force Weather Agency(საჰაერო ძალების ამინდის სააგენტო)
AOD- Aerosol Optical Depth
Aqua- Latin for water
ARL- Air Resources Laboratory(საჰაერო რესურსების ლაბორატორია)
ARW- Advanced Research WRF(WRF-ის მოწინავე კვლევები)
BE -Bias Error (მიკერძობის ცდომილება)
CALIOP- Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (დრუბელ-აეროზოლ ლიდარი ორთოგონალური პოლარიზაციით)
CALIPSO- Cloud Aerosol Lidar, Infrared Pathfinder Satellite Observation(დრუბელ-აეროზოლ ლიდარი, ინფრაწითელი თანამგზავრული დაკვირვება)
CAPE- Convective Available Potential Energy(კონვექციური პოტენციური ენერჯია)
CAPS- Center for Analysis and Prediction of Storm(შტორმის ანალიზისა და პროგნოზის ცენტრი)
CCN- Giant Cloud Condensation Nuclei(გიგანტური ღრუბლის კონდენსაციის ბირთვები)
CINH- Convective Inhibition(კონვექტიური ჩახშობა)
GOCART- Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport(გოდარდის გლობალური ოზონის ქიმიური აეროზოლების რადიაცია და გადატანა)
DUSTGOCART/AFWA- Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport of the Air Force Weather Agency
DUSTUOC- DUST from the University of Cologne
ECMWF ERA-European Centre for Medium-Range Weather Forecast.
EL- Equilibrium Level(წონასწორობის დონე)
ESRL- Earth System Research Laboratories(დედამიწის სისტემის კვლევის ლაბორატორია)
FAA- Federal Aviation Administration(ფედერალური ავიაციის სააგენტო)
GDAS - Global Data Assimilation System(გლობალურ მონაცემთა ასიმილაციური სისტემა)
GFDL- Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(გეოფიზიკის სითხის დინამიკის ლაბორატორია)
GPSs- Convective Parameterization Schemes(კონვექციური პარამეტრიზაციის სქემები)
HYSPLIT- The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (ჰიბრიდული ერთ-ნაწილაკიანი ლაგრანჟის ინტეგრირებული ტრაექტორიის მოდელი)
LFC - Level of Free convection(თავისუფალი კონვექციის დონე)
LSM- Land Surface Model(დედამიწის ზედაპირის მოდელი)
LTD- Long-Traveled Desert Dust(გრძელ-მოგზაური უდაბნოს მტვერი)
MAX dBZ – Maximum Decibel (მაქსიმალური დეციბელი)
MCS- Mesoscale Convective System(მეზომასშტაბური კონვექციური სისტემა)
MM5- Mesoscale Model(მეზომასშტაბური მოდელი)
MODIS - the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (ზომიერი რეზოლუციის გამოსახულების სპექტრორადიომეტრი)
MODIS AOD- Aerosol Optical Depth(აეროზოლების ოპტიკური სიღრმე)
MODIS L2 AOT- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer satellite aerosol optical thickness (აეროზოლების ოპტიკური სისქე)
MYNN- Mellor – Yamada – Nakanishi and Niino.
NAM- The North American Mesoscale Forecast System(ჩრდილოეთ ამერიკის მეზომასშტაბური საპროგნოზო სისტემა)
NCAR- National Center for Atmospheric Research(ატმოსფეროს კვლევის ეროვნული ცენტრი)
NCEP- National Centers for Environmental Prediction(გარემოს პროგნოზის ეროვნული ცენტრები)
NEA- Georgian National Environmental Protection Agency(საქართველოს გარემოს დაცვის ეროვნული სააგენტო)
NMM- Nonhydrostatic Mesoscale Model (არაჰიდროსტატიკური მეზომასშტაბური მოდელი)

NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration(ოკეანისა და ატმოსფეროს ეროვნული ადმინისტრაცია)
NRL- Naval Research Laboratory(ნავალის კვლევის ლაბორატორია)
PM10- Particulate Matter(ნაწილაკები)
RADA- Regional-Scale Aeolian Dust Aerosol(რეგიონალური მასშტაბის საჰაერო მტვრის აეროზოლი)
READY- Real-time Environmental Applications and Display System(რეალურ დროში გარემოს აპლიკაციისა და ჩვენების სისტემა)
RMSE- Root Mean Square Error(ფესვი საშუალო კვადრატული ცდომილებიდან)
RRTM- Rapid Radiative Transfer Model (სწრაფი რადიაციის გადაცემის მოდელი)
RUC - Rapid Update Cycle(სწრაფი განახლების ციკლი)
University of Cologne
UTC- Universal Time Coordinated(დროის უნივერსალური სისტემა)
WFC - The Wide Field Camera
WRF- Weather Research and Forecasting(ამინდის კვლევა და პროგნოზი)
WSM3- WRF Single Moment 3

შესავალი

საკვლევი პრობლემა - ბოლო ათწლეულების განმავლობაში საქართველოში მნიშვნელოვნად გახშირდა საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენები (თავსხმა წვიმები, სეტყვა, წყალდიდობები, ძლიერი ქარები). საქართველოს რელიეფის არაერთგავროვნებისა და რეგიონალური კლიმატის ცვლილების გამო რთულია ამ მოვლენების დროსა და სივრცეში პროგნოზირება. ამ მოვლენებიდან უმეტესობა დაკავშირებულია ფრონტალურ ატმოსფერულ პროცესებთან, თუმცა ხშირად ძალიან ძლიერი ატმოსფერული პროცესები უკავშირდება ლოკალურ (ადგილობრივ) კონვექციურ პროცესებს, როგორცაა, თავსხმა წვიმები, სეტყვა, წყალდიდობები, ქარბორბალები და ა.შ. გლობალური საპროგნოზო მოდელები ხშირ შემთხვევაში ზუსტად ვერ ასახავს მოსალოდნელი მეტეოროლოგიური პროცესის მთელ რიგ მახასიათებლებს, რეგიონალურ თავისებურებათა გაუთვალისწინებლობის გამო, თუმცა რელიეფის გავლენას მეტნაკლებად ითვალისწინებს, ამიტომ განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენენ რეგიონალური მოდელები. თუმცა მხოლოდ რელიეფის გავლენის შედარებით სრულყოფილი გათვალისწინება არ არის საკმარისი იმისათვის, რომ ზუსტად ვიწინასწარმეტყველოთ ატმოსფერული პროცესის თუნდაც სიმძლავრე, რადგან ატმოსფერული პროცესის ორივე ტიპის შემთხვევაში (ფრონტალური, ადგილობრივი), მეტად მნიშვნელოვანია ატმოსფეროს თერმოდინამური მდგომარეობის შეფასება, იმიტომ რომ, ატმოსფერული პროცესის განვითარების ხარისხი რელიეფის გარდა მნიშვნელოვნად დაკავშირებულია სწორედ ატმოსფეროს თერმოდინამიკურ მდგომარეობასთან. ამ პრობლემის გადაწყვეტა კიდევ უფრო რთულია იმ შემთხვევაში თუ ატმოსფერო (ტროპოსფერო) დაბინძურებულია მავნე ნივთიერებებით, კერძოდ, ეს ნივთიერებები ღრუბლებში მოხვედრის შემთხვევაში წარმოადგენენ კონდენსაციის ბირთვებს, რაც უმეტესად იწვევს უხვნალექიან და სეტყვასაშიში ღრუბლების ჩამოყალიბებას. ამიტომ ამინდის საპროგნოზო მოდელებში მნიშვნელოვანია აგრეთვე გათვალისწინებული იყოს ჰაერის დაბინძურების ხარისხი.

კვლევის მნიშვნელობა/აქტუალობა - საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების წინასწარმეტყველება ყოველთვის მნიშვნელოვანი იყო და არის რეგიონალური და გლობალური მასშტაბებით. მსოფლიოს წამყვანი სამეცნიერო ორგანიზაციები მუშაობენ სხვადასხვა ტიპის ამინდის და კლიმატის საპროგნოზო მოდელების გაუმჯობესებაზე, შეიქმნა მრავალი ატმოსფეროს დინამიკის საპროგნოზო გლობალური მოდელი, თუმცა ჯერჯერობით არ არსებობს არცერთი რეგიონალური საპროგნოზო მოდელი, რომელიც ზუსტად გაითვალისწინებს საქართველოს კლიმატურ და ოროგრაფიულ თავისებურებებს. განსაკუთრებით ეს საკითხი კვლავ გააქტიურდა 2015 წლის 13 ივნისის ტრაგედიის შემდეგ, როდესაც თავსხმა წვიმისა და მოვარდნილი ღვარცოფის შედეგად დაიღუპნენ ადამიანები, დაიხოცნენ ცხოველები და ფრინველები. თუმცა თუ გადავხედავთ 2015 წლიდან დღემდე მხოლოდ აღმოსავლეთ საქართველოში თუნდაც მხოლოდ მატერიალური ზარალის სტატისტიკას, ვნახავთ, რომ თავსხმა ნალექების და სეტყვის შედეგად ზარალი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კახეთის რეგიონში. რეალურად ლოკალურ ატმოსფერულ პროცესებზე მეცნიერული დაკვირვება შესაძლებელი გახდა 2015 წლიდან, სიღნაღის მეტეოროლოგიური რადარის დაკვირვების მონაცემების ანალიზის შედეგად. ბოლო 7 წლის სტატისტიკა აჩვენებს, რომ გლობალურ საპროგნოზო მოდელებს შეუძლიათ იწინასწარმეტყველონ მხოლოდ ფრონტალური ატმოსფერული პროცესები, თუმცა არის გამონაკლისი შემთხვევებიც (გლობალურ საპროგნოზო მოდელების უმეტესობის სიზუსტე დაახლოებით 70%-ის ფარგლებში მერყეობს). ხოლო ლოკალური ატმოსფერული პროცესების წინასწარმეტყველება გლობალური მოდელებით თითქმის შეუძლებელია (მათ შორის 2015 წლის 13 ივნისი). ამიტომ ძალიან მნიშვნელოვანია რეგიონალური საპროგნოზო მოდელის შესაძლებლობების გაუმჯობესების მიმართულებით მუშაობა და ლოკალური კონვექციური პროცესების შეფასება ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის შესაბამისად. ამავდროულად, ამ მიმართულებით მნიშვნელოვანია შეფასდეს ატმოსფეროს დაბინძურების ხარისხი, რომელიც ხელს უწყობს არაორდინალური ატმოსფერული პროცესების განვითარებას. საქართველოსთვის მყარი ნაწილაკების მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს საჰარის უდაბნოს მტვერი.

აღნიშნული მტვრის შტორმი ხშირად ვრცელდება საქართველოს ტერიტორიაზე ძირითადად სამხრეთ, სამხრეთ-აღმოსავლეთის მხრიდან. დაბინძურებული ჰაერი განსაკუთრებით საშიშია ადამიანების ჯანმრთელობისათვის. მას უკავშირდება, სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი, ისეთი სისტემების დაზიანება, როგორებიცაა: რესპირატორული, ნერვული და გულ-სისხლძარღვთა. მსოფლიოს ჯანდაცვის ორგანიზაციის მონაცემებით, მხოლოდ 2014 წელს, ჰაერის დაბინძურებასთან დაკავშირებული დაავადებებით 7 მილიონამდე ადამიანი დაიღუპა. გარდა ამისა, ატმოსფეროში მავნე მინარევების არსებობა მნიშვნელოვნად ზრდის ექსტრემალური მეტეოროლოგიური პროცესების სიხშირეს, განსაკუთრებით ამ მხრივ მნიშვნელოვანია თავსხმა წვიმა და სეტყვა. ჰაერში არსებული მყარი მინარევები ხშირ შემთხვევაში წარმოადგენენ კონდენსაციის ბირთვებს, რაც მეტნაკლებად განსაზღვრავს ღრუბლის სიძლიერეს და მისი სეტყვასაშიშროების ხარისხს. სეტყვა დიდ ზიანს აყენებს სოფლის მეურნეობას, განსაკუთრებით ზიანდება კახეთის რეგიონი, სადაც ერთერთი წამყვანი მიმართულებაა მევენახეობა. მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით ბოლო ხუთ წელიწადში სეტყვასაშიშროების დღეების რაოდენობა მკვეთრად გაიზარდა, რაც უშუალოდ უკავშირდება ატმოსფეროს დაბინძურებას მყარი მინარევებით.

კვლევის მიზანი - ნაშრომის კვლევის მიზანია შევისწავლოთ არაორდინალური, რეგიონალური მასშტაბის, ატმოსფერული პროცესების დინამიკა საქართველოს რთული ოროგრაფიული პირობების გათვალისწინებით და მასთან დაკავშირებული ზოგიერთი მავნე ნივთიერებათა მიგრაციის, დალექვისა და გარემოზე ზემოქმედების აქტუალური საკითხები.

ჰიპოთეზა ან/და საკვლევი საკითხები - აღნიშნული მიზნის მისაღწევად განხორციელდა შემდეგი საკითხების კვლევა.

რიცხვითი მოდელირებით შესწავლილ იქნა მეტეოროლოგიური ველების ცვლილების საკითხი ატმოსფეროს ქვედა ფენაში (ტროპოსფეროში), როცა ატმოსფერული მასები გადაადგილდებოდა შავი ზღვიდან კასპიის ზღვისკენ და პირუკუ დედამიწის ზედაპირის რელიეფის არაერთგვაროვანებისა და არამდგრადი ფართომასშტაბიანი ნაკადების გათვალისწინებით. შესწავლილ იქნა ჰაერის ნაკადის

ყოფაქცევა როგორც იზოლირებული, ხელოვნური დაბრკოლების, ასევე კავკასიის რეალური ტოპოგრაფიის შემთხვევაშიც.

დისერტაციაში იმერეთის რეგიონის ძლიერი ქარების რეჟიმი და სტატისტიკური მახასიათებლები შესწავლილია ქუთაისის მეტეოროლოგიური სადგურის მონაცემების საფუძველზე. 1960-2021 წ.წ. პერიოდისათვის ქარის სიჩქარეები დაყოფილია 5 მ/წმ შუალედებად და თითოეული შუალედისთვის შესწავლილია ქარის სიჩქარეთა განმეორებადობა თვეებისა და წლების მიხედვით. ნაჩვენებია ქარის სიჩქარეთა გრადაციების პროცენტული განაწილება და შეფასებულია ქუთაისის რეგიონისთვის წამყვანი ქარის სიჩქარის ინტერვალი, რის საფუძველზეც შესწავლილია რეგიონის ენერგოეფექტურობა. ენერგოეფექტურობის თვალსაზრისით ნაჩვენებია ქარის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობების ცვლილება წლებისა და თვეების მიხედვით. შესწავლილია თერმული და დინამიკური მდგრადობის კოეფიციენტების ცვლილება.

მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების საფუძველზე შესწავლილ იქნა 2015-19 წლებში საქართველოში დაფიქსირებული ძლიერი მეტეოროლოგიური პროცესების რამოდენიმე შემთხვევა (როდესაც ადგილი ჰქონდა თავსხმა წვიმასა და სეტყვას) როგორც WRF მოდელის, ასევე READY სისტემის საშუალებით. ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების (WRF)v.3.6 მოდელის რიცხვითი გათვლების შედეგები და READY-ით მიღებული მონაცემები შეფასებულ იქნა მეტეოროლოგიური რადარის რეალური მონაცემებით. ყოველი საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენების შემთხვევაში შეფასდა ატმოსფეროს თერმოდინამიკული მდგომარეობა მისი ენერგეტიკული მახასიათებლების საშუალებით. შემუშავებულია საშიში ლოკალური ატმოსფერული პროცესების პროგნოზირებისთვის რეკომენდაციები.

ახლო აღმოსავლეთის, აფრიკისა და ცენტრალური აზიის უდაბნოებიდან საქართველოს ტერიტორიაზე ატმოსფერული ნაკადებით მტვრის მიგრაციის შესწავლის მიზნით ეილერისა და ლაგრანჟის ცვლადებიან მოდელებთან ერთად გამოყენებულ იქნა დისტანციური ზონდირების პროდუქტები Cloud Aerosol Lidar, Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO), the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) და მტვრის PM10 გაზომილი რეალური მონაცემები. WRF-

Chem და HYSPLIT რიცხვითი მოდელების თვლის შედეგებისა და CALIPSO, MODIS და PM10 მონაცემების ურთიერთ შედარებამ აჩვენა, რომ შესწავლილი პერიოდის განმავლობაში, მტვრის გადატანა საქართველოს ტერიტორიაზე წარმოებდა თანაბრად აფრიკის, შუა აღმოსავლეთისა და ცენტრალური (დასავლეთი) აზიის უდაბნოებიდან რაც სიახლეა.

თავი 1. პრობლემის ისტორიული ანალიზი და საკვლევო ამოცანა.

1.1 რთული ოროგრაფიის პირობებში ექსტრემალური მეტეოროლოგიური პროცესების პროგნოზის თეორიული კვლევების მოკლე მიმოხილვა.

ბოლო ათწლეულის განმავლობაში საქართველოს ტერიტორიაზე მნიშვნელოვნად გახშირდა ექსტრემალური მეტეოროლოგიური მოვლენები (თავსხმა წვიმები, სეტყვა, ძლიერი ქარები). საქართველოს რთული რელიეფის პირობების შესაბამისად გახშირდა ისეთი მეტეოროლოგიური პროცესები რომელთა არამარტო გრძელვადიანი, არამედ მოკლევადიანი პროგნოზირებაც საკმაოდ რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ამ ატმოსფერული მოვლენების ძირითადი ნაწილი ლოკალური ხასიათისაა და ძირითადად დაკავშირებულია ჰაერის მასების კონვექციურ მოძრაობასთან. ამიტომ ატმოსფეროს ფიზიკის დღის წესრიგში დგება საკითხი დროის მოკლე პერიოდში შესრულდეს პროგნოზი ლოკალურ ტერიტორიაზე მიმდინარე კონვექციური პროცესების შესახებ. ამ მიზნის მისაღწევად აუცილებელია ყოველი კონკრეტულ ტერიტორიისათვის ჰაერის დინამიკასთან ერთად შევისწავლოთ ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა და დავადგინოთ ატმოსფეროს არასტაბილურობის ხარისხი (Позднякова, 2010).

ატმოსფერული პროცესების დინამიკაზე რელიეფის გავლენის შესწავლას მიეძღვნა მრავალი მნიშვნელოვანი შრომა, როგორც საზღვარგარეთ, ისე საქართველოში (Smith, 1979; Diodato, 2005; Finardi & Morzeli, 1997; Давицашвили, 1988; Kordzadze & Demetrashvili, 2000; ხვედელიძე, 2002; Surmava, 2000). მაგალითად, (Smith, 1979) გამოკვლეულია მიწისპირა ფენაში რელიეფის გავლენა როგორც ფერდობის, ასევე მთა-ხეობის ქარისათვის და განხილულია ნალექების განაწილების კანონზომიერებანი მცირე სიმაღლის რელიეფის შემთხვევაში. ასევე გეოინფორმაციული სისტემების დახმარებით შესწავლილ იქნა რელიეფის გავლენა ატმოსფეროს ცირკულაციაზე, დედამიწაზე ნალექების ცვალებადობასა და კლიმატის ცვლილებაზე, და მიღებული შედეგები შედარებულ იქნა სამხრეთ იტალიის მთიანი რეგიონებისათვის რეალურ გაზომილ მონაცემებთან (Diodato, 2005). განსხვავებული ოროგრაფიის პირობებში (მარტივი,

რთული და ძალიან რთული) ატმოსფეროში ქარის გავლენით გაფრქვეული დამაბინძურებელი ნივთიერებების გავრცელება შესწავლილია 2-დან 200 კმ რადიუსში და გამოკვლეულია ქარის ველის სივრცული განაწილება, განსხვავებული საწყისი სასაზღვრო პირობებით, როგორც წრფივი, ასევე მასის შენახვისა და ჰიდროსტატიკური მოდელებით, რითაც განსაზღვრულია მავნე ნივთიერებების გავრცელების მიმართულება (Finardi & Morzeli, 1997).

კვლევებმა აჩვენა, რომ ნოტიო ჰაერის მასების გადაადგილება მთებსა და ბორცვებზე იწვევს სხვადასხვა სახის ღრუბლების წარმოქმნას და შესაბამისად ნალექების განაწილების მრავალფეროვნებას მთელს დედამიწაზე. ჰაერის ნაკადის მთებზე გადადინებისას უმთავრესად ქარი იცვლის როგორც მიმართულებას, ასევე სიძლიერესა და შინაგან არასტაბილურობას, რაც ძირითადად განსაზღვრავს ამ ადგილის ლოკალურ კლიმატის თავისებურებას (Robert & Houze, 2012).

გლობალური და რეგიონალური კლიმატი არის მნიშვნელოვანი ფაქტორი ბუნებრივი გარემოს ჩამოყალიბებაში, მცირე მასშტაბების შემთხვევაშიც კი ოროგრაფიული მრავალფეროვნება იწვევს ატმოსფეროში ენერჯის არაერთგვაროვან განაწილებას. მთაგორიანობის დინამიკურ მახასიათებლებს აქვთ დიდი მნიშვნელობა რეგიონალურ და ლოკალურ ჰაერის ნაკადებზე, რაც გავლენას ახდენს მიმდინარე რეგიონის კლიმატზე. ფერდობის კლიმატი კი შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს მთა-ხეობათა კლიმატისაგან და ეს გავლენა შეიძლება იგრძნობოდეს ასობით და ათასობით კილომეტრებზეც კი. ასეთ კლიმატური განსხვავება ძირითადად დამოკიდებულია ჰაერის მასების მიმართულებაზე, მასშტაბზე, ფერდობის დახრილობაზე, აგრეთვე ადგილმდებარეობაზე (გრძედი, განედი), რელიეფის ზომაზე და დამატენიანებელ-დამაბინძურებელ წყაროს სიძლიერეზე. მაგალითად, (Martin et.al., 2013) გამოკვლეულია ძირითადი მეტეოროლოგიური პარამეტრების (ტემპერატურა, წნევა, ტენიანობა) ცვალებადობა მთაგორიანობის გავლენით, სადაც ასევე გათვალისწინებულია ძირითადი მეტეოროლოგიური მოვლენების (ღრუბლიანობა, ნალექები რადიაცია) ზემოქმედება. თითოეული შემთხვევაში შესწავლილია ოროგრაფიის როლი გლობალური მასშტაბის ზომიერი ან მუსონური მოძრაობების,

სინოპტიკური მასშტაბის ციკლონური ან ანტიციკლონური მოძრაობების, ხმელეთისა და ზღვის ბრიზების, ლოკალური მასშტაბის მთისა და ხეობის ცირკულაციური მოძრაობების გაძლიერებაში(Yoshino, 1981). ნაჩვენებია, რომ ოროგრაფიის გავლენა ძირითადად დამოკიდებულია მის სიმაღლეზე, ფერდობის დახრის კუთხეზე და აგრეთვე მნიშვნელოვან ტოპოგრაფიულ ელემენტებზე, როგორცაა, მთის მასივის სიგანე, მისი ორიენტაცია, მთის ფორმა და დაბლობისა ან ხეობის განფენილობა(Yoshino, 1981). კვლევებმა აჩვენეს, რომ რთული ოროგრაფიის გავლენა ატმოსფერულ პროცესებზე დაკავშირებულია თერმული და დინამიკური პარამეტრების განაწილებაზე, რაც იწვევს ჰაერის მასების არათანაბრობას ოროგრაფიის გასწვრივ, რის შედეგადაც ადგილი აქვს სხვადასხვა სახის ღრუბლების წარმოქმნას (Hernandez & Diaz, 1995).

ატმოსფერულ პროცესებზე რელიეფის გავლენის შესწავლა ძირითადად დაიწყო ცნობილი მეცნიერების ნ. კოჩინის (Кочин, 1937), ა. დოროდნიცინის (Дородницын, 1940; Дородницын, 1950), პ. კენის (Quency, 1948), რ. შკორერის (Scorer, 1949; 1953; 1954) და ი. კიბელის (Кибел, 1955) გამოკვლევების საფუძველზე. მათ შრომებში რელიეფისა და ჰაერის ნაკადის ურთიერთქმედება წარმოდგენილია ტალღურ პროცესის სახით. ხოლო შემდეგი კვლევები განხორციელდა ვ. კოჟევნიკოვის (Кожевников, 1963; 1968), ე. პეკელისის (Пекелис, 1966; 1969), რ. ლონგის (Long, 1954; 1955), ი.სოიერის (Sawer, 1960), ა.კლაუსის (Claus, 1964) და სხვა. მათ შრომებში ნაჩვენებია, რომ რელიეფის არაერთგვაროვნება იწვევს ქარზურგა ტალღების ინდუცირებას, რომლებიც ზედა ტროპოსფეროში იწყებენ გავრცელებას, როგორც ჰორიზონტალური ისე ვერტიკალური მიმართულებით.

მრავალი წლების განმავლობაში, მეცნიერების ყურადღება მიმართული იყო ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი პრობლემის ამინდის მოკლევადიანი და გრძელვადიანი პროგნოზირების საკითხების გადაჭრაზე. ეს პრობლემა თავისებურ ინტერესს და განსაკუთრებულობას იძენს ლოკალურ-რეგიონალური ფიზიკური პირობების გათვალისწინებისას. ამ პირობებიდან უმნიშვნელოვანესია დედამიწის რელიეფის გავლენის გათვალისწინება. რელიეფის გავლენის ფიზიკურ-დინამიკური ეფექტები,

რომლებიც ცვლიან მეტეოროლოგიური ელემენტების ევოლუციის ხასიათს, დიდი ხანია მეცნიერთა ინტერესის სფეროში მოხვდა. ი. კიბელი იყო ერთ-ერთი პირველი მკვლევარი ამ მიმართულებით (Кибель, 1973). შემდეგი გამოკვლევები შესრულებული იყო ა. დოროდნიცინის (Дородницын, 1950), გ. ბიკოვის (Белов, 1975; Быков, 1962), ვ.სადოკოვის (Садоков, 1984), შ. მუსელიანის, ვ. კოჟევნიკოვის (Кожевников, 1968), ს.გუნიას (Гуния, 1958), რ. ნოზაძის (Микашавидзе & Нозадзе, 1969), ზ. ხვედელიძის (ხვედელიძე, 2002), თ. დავითაშვილის (Давиашвили, 1988), დ. დემეტრაშვილის (Kordzadze & Demetrashvili, 2000), ა. სურმავას (Surmava, 2000) და სხვების მიერ იქმნებოდა და პრაქტიკაში რეალიზირებული ხდებოდა მრავალი სახის რიცხვითი სქემები რელიეფის გავლენის გათვალისწინებით.

ცნობილია რომ, მეტეოროლოგიური ელემენტების ცვალებადობა ვლინდება ჰაერის მასების, ფრონტების, წყვეტის ზედაპირების, ციკლონების, ანტიციკლონების ზღვიდან ხმელეთზე, დაბლობიდან მთიან რაიონებსა და პირიქით გადაადგილებისას (Давиашвили et al., 1979; 1987). ზღვები, მდინარეთა ხეობები, წყალსაცავები, დიდი ქალაქის კონფიგურაციები გავლენას ახდენენ მათ ზედაპირზე გადანაცვლებულ ჰაერის მასათა ტალღურ ბუნებაზე. თვით იმ ფაქტორების დასახელებაც კი, რომლებიც განაპირობებენ მეტეოროლოგიური ელემენტების ცვლილების ხასიათს ხაზს უსვავს ადგილობრივი რელიეფური თავისებურებების მნიშვნელობას (Давиашвили et al., 1987). მსოფლიოს მეცნიერთა გვერდით, მეტეოროლოგიური სიდიდეების ევოლუციის შესწავლის საკითხებში, ფართო მონაწილეობას ღებულობენ ქართველი მეცნიერები. ერთ-ერთი პირველი იყო პროფ. ს. გუნია (Гуния, 1958), რომელმაც შეიმუშავა დენის ფუნქციის გამოსათვლელი რიცხვითი სქემები ამიერკავკასიისათვის. დ.ნოზაძემ და მისმა თანამშრომლებმა დაამუშავეს ატმოსფერული წნევისა და ტემპერატურის რიცხვითი სტატისტიკური პროგნოზის სხვადასხვა ვარიანტები; ი.ჩიგოვამემ და ბ. მიქაშავიძემ (Микашавидзе, 1969) შექმნეს ნალექების პროგნოზირების რიცხვითი სქემები, რომლებიც დანერგული იყო ოპერატიულ პრაქტიკაში. ზ. ცქვიტინიძემ შეიმუშავა სქემა ნახევარსფეროსათვის (ბაროტროპიული მოდელი) (Цквитиანიძე, 1974); ი. სულაქველიძემ- ნალექების პროგნოზის სქემა (Сулаквелиძე, 1988); ატმოსფეროს

გეოპოტენციალის პროგნოზული სქემა ბაროტროპიული ატმოსფეროსათვის, რომელშიც ოროგრაფიის გავლენა იყო ჩართული, შექმნეს და ოპერატიულ პრაქტიკაში დანერგეს ზ. ხვედელიძემ, თ. დავითაშვილმა, პ. ჯანელიძემ (Давиашвили et al., 1979; 1987)); აღსანიშნავია ასევე ზ. ხვედელიძისა და ზ. გეწაძის (Хведелидзе & Ецадзе, 1987) სქემა თავისუფალ კონვექციაზე; ზ. ხვედელიძის, ჯ. დოლოძისა და დ. ჩიტაღაძის მიერაა შექმნილი ნალექების სინოპტიკურ სტატისტიკური პროგნოზი აღმოსავლეთ საქართველოს რეგიონისათვის (Khvedelidze et. al., 2004). ი. ალადაშვილის და ზ. ხვედელიძის მიერ შემუშავებულ იქნა ჰაერის მინიმალური ტემპერატურის განსაზღვრის მეთოდები (ხვედელიძე & ალადაშვილი, 2002). აღსანიშნავია, რომ თ. დავითაშვილმა შეიმუშავა ამინდის მოკლევადიანი პროგნოზის რიცხვითი მოდელი ამიერკავკასიის ტერიტორიისათვის, რომელიც კორექტულად ითვალისწინებდა ამიერკავკასიის რთულ ოროგრაფიას ერთმანეთში ჩადგმული ბადეთა მეთოდის გათვალისწინებით (Давиашвили, 1985), ასევე მის მიერაა შემოთავაზებული ტელესკოპიზაციის ახალი მეთოდი ერთმანეთში ჩადგმულ ბადეებს შორის კომპლექსური ურთიერთგავლენის გათვალისწინებით (Давиашвили, 1988; 1996). ცალკე აღსანიშნავია ა. კორძაძის (Корძაძე, 1977), დ. დემეტარშვილის, ა.სურმაგას (სურმაგა, 2001), თ.დავითაშვილის (Давиашвили,1988) და სხვათა შრომები, რომლებიც ეძღვნება ამიერკავკასიაზე მეტეოროლოგიური ელემენტებისა ტალღური მოძრაობის ცლილების შესწავლას რიცხვითი მეთოდების საშუალებით.

ჰაერის მასათა გადაადგილებისას ატმოსფეროში ტალღური პროცესების, ფრონტებისა და ფრონტალური ზედაპირების თვისებები მკვეთრად არის დაკავშირებული ტურბულენტობასთან. სხვადასხვა მასშტაბების ხვეულები განუწყვეტლივ წარმოიშობიან ძირითადი მოძრაობის დარღვევის შედეგად. ნაკადიდან მოწყვეტის შემდეგ ხვეულები თავიანთი ენერჯიის გამო ღებულობენ გამოკვეთილ ბუნებრივ სახეს და რა თქმა უნდა მოქმედებს, როგორც ძირითად ნაკადთან, ისე სხვა გრიგალურ წარმონაქმნებთან. ასეთი პროცესი გრძელდება მანამ , სანამ ხვეულების ზომები იმდენად არ შემცირდება, რომ მათ შორის იმოქმედებს მოლეკულური

ურთიერთქმედების ძალები, რის შედეგადაც ხდება ამ ხვეულების სრული დისოციაცია (Demetrashvili and Davitashvili, 2013; Davitashvili, 1996).

ტურბულენტური მოძრაობის ძირითადი როლი მდგომარეობს იმაში, რომ სწორედ მისი საშუალებით ხორციელდება ატმოსფეროსა და ხმელეთის ზედაპირს შორის მრავალსახა ურთიერთქმედება. აქედან გამომდინარე ტურბულენტობის მნიშვნელობა განსაკუთრებას იძენს ისეთ რთულ და ფიზიკურ-გეოგრაფიულ რეგიონებზე, როგორცაა საქართველოს ტერიტორია, რომელიც დასერილია ასობით მდინარის ხეობებით, ათეულ მთათა სისტემით, მნიშვნელოვანი დაბლობებით, ტყის დიდი მასივით, თოვლიანი ზედაპირებით და შავი და კასპიის ზღვების უშუალო სიახლოვეთ. ამიტომ ტურბულენტური მოძრაობის მათემატიკური აღწერა და მისი გათვალისწინება ჰიდროდინამიკის განტოლების ამოხსნაში, უთუოდ აზუსტებს რელიეფური ფაქტორების გავლენის ბუნებას. ტურბულენტობის თეორიის განვითარებაში და მისი ატმოსფერული პროცესების შესწავლა – გამოყენებაში დიდი წვლილი მიუძღვის ი. კოლმოგოროვს, ა. ოზუხოვს, დ. ტეილორს, ა.მონინს და სხვებს.

სამეცნიერო ტექნიკურმა პროგრესმა და ენერჯის მოხმარების მაღალმა ტემპმა განვითარებული მრეწველობის მქონე ქვეყნებში, აქტუალური გარემოს დაცვის, კერძოდ, ატმოსფეროს მავნე მინარევებისა და გამონაბოლქვებისაგან გაჭუჭყიანების პრობლემა. ცნობილი მეცნიერი ბერლიანდი ამ საკითხთან დაკავშირებით აღნიშნავს, რომ საჰაერო აუზის მავნე ნივთიერებებით გაჭუჭყიანების ხარისხი დამოკიდებულია არა მხოლოდ ტექნოლოგიურ და კონსტრუქციულ პარამეტრებზე (მაგ. წყაროს სიმაღლე და, სიმძლავრე, გამონაბოლქვის ტემპერატურა სხვა), არამედ ისეთ ფაქტორებზეც როგორცაა ქარის სიჩქარე, ატმოსფეროს სტრატეფიკაცია, ოროგრაფია და სხვა, ამიტომ ბოლო ხანებში საქართველოს ტერიტორიისთვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გარემოს დაჭუჭყიანების მეტეოროლოგიური ასპექტების შესწავლას, ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების გათვალისწინებით (Davitashvili and Khantadze, 2004; 2008; Gordeziani et al, 2000; Davitashvili and Gordeziani, 2000)

1.2 ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების თეორიული კვლევების მოკლე მიმოხილვა.

აეროზოლების შემცველობის მატება ატმოსფეროში წარმოადგენს კლიმატის ცვლილების ერთ-ერთ მთავარ მიზეზს (Solomon et al., 2007). ხოლო მტვერი (ძირითადად წარმოიქმნება ეროდირებადი ნალექებისა და უდაბნოების ქარიშხლების დეფლაციიდან) და კვამლი (ძირითადად ბიომასისა და ნავთობპროდუქტების წვის გამო) წარმოადგენენ ატმოსფერული აეროზოლის ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტებს (Choobari et.al., 2014). თავის მხრივ მინერალური მტვერი (ძირითადად უდაბნოების ქარიშხალიდან მოდის) ლიდერობს ბუნებრივ აეროზოლებში, რადგან აეროზოლების გლობალური მასის 75% მინერალური მტვერია (Ginoux et al., 2012). დედამიწის კლიმატურ სისტემაში მინერალური მტვრის როლს აძლიერებს მისი აქტიური მონაწილეობა ყველა მასშტაბის ფიზიკურ, ქიმიურ და ბიოგეოქიმიურ პროცესებში (Shao et.al., 2011a. Rizza et. al., 2017). კერძოდ, ატმოსფერული მტვრის აეროზოლი (ამა) ფანტავს და შთანთქავს მოკლე ტალღების გამოსხივებას და ამით გავლენას ახდენს ატმოსფეროს გამოსხივების ბალანსზე, ხილვადობაზე, ღრუბლებზე და ნალექების წარმოქმნაზე (Charlson et. al., 1992; Kim et.al., 2001) გარდა ამისა, ამა ატმოსფეროს (ღრუბლების) მოლეკულურ და იონურ სტრუქტურებს ცვლის (ალაგებს) ქიმიური რეაქციების საშუალებით. დაბინძურებული ადგილების გავლით, ამა (გოგირდით დაფარული ქიმიური რეაქციების გამო) შეიძლება გახდეს გიგანტური ღრუბლის კონდენსაციის ბირთვები (ღკმ), რაც აძლიერებს წვეთების შეჯახებას და შეერთებას და, შესაბამისად, ზრდის თბილი ნალექების წარმოქმნას (Charlson et. al., 1992).

ამასთან ერთად სატელიტურმა, საჰაერო და ლაბორატორიულმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ამა–ს ასევე შეუძლია ნალექების თავიდან აცილება (Rosenfeld at.al., 2001). მართლაც, ამა–ს შეუძლია ნალექების ჩახშობა თბილ ღრუბლებში, ღრუბლის კონდენსაციის ბირთვების რაოდენობის გაზრდით (Hui et.al., 2008) და მიუხედავად იმისა, რომ მტვრის მავნე ზემოქმედება ნალექებზე გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე კვამლის ზემოქმედებით გამოწვეული. ღრუბლებში ამა–ს დიდმა რაოდენობამ შეიძლება გამოიწვიოს ნალექების შემცირება (Rosenfeld at.al., 2001). ამრიგად, ამა

გავლენას ახდენს ატმოსფეროს შემადგენლობაზე არა მხოლოდ ფიზიკური ზემოქმედებით, არამედ ქიმიურ რეაქციებში მონაწილეობით. იგივე, ღრუბლებში დალექვის შემთხვევაში, ამა ადიდებს ღრუბლის ბირთვს, ცვლის ღრუბლების ალბედოს, ცვლის ღრუბლების ოპტიკური თვისებებს. ამრიგად, ამა ქმნის დაბრკოლებებს ღრუბლების წარმოქმნისა და ნალექების ნორმალური ფორმირებისთვის და ამით ირიბ გავლენას ახდენს კლიმატზე (Andreae & Rosenfeld, 2008).

დედამიწაზე მშრალი რეგიონები (მცირე ნალექებით) კლიმატის ცვლილების ერთ-ერთი ყველაზე მგრძობიარე ადგილებია, რადგან მათ უფრო მეტი საფრთხე ემუქრებათ (გასულ საუკუნეში გლობალურ მშრალ რეგიონებში ზედაპირული დათბობა 20–40%-ით მეტი იყო, ვიდრე მაღალი ტენის შემცველ რეგიონებში) მათ შორის აღსანიშნავია გლობალური გაუდაბნოების დაჩქარება (Huang et.al, 2016; 2017; 2012). დედამიწაზე მშრალი რეგიონების გაზრდა მოხდა ნახევრად მშრალ რეგიონებში 1960-იანი წლებიდან, როდესაც ნახევრად მშრალი რეგიონების ფართობი 1990–2004 წლებში 7%-ით გაიზარდა 1948–1962 წლებთან შედარებით, კლიმატის ცვლილების ან სხვა ფაქტორების გამო. მაგალითად, კლიმატის ცვლილება აღმოსავლეთ აზიის ნახევრად მშრალი რეგიონებში, პირველ რიგში, განპირობებული იყო აღმოსავლეთ აზიის ზაფხულის მუსონის შესუსტებით (Huang et.al., 2016). როგორც წესი, დედამიწაზე უდაბნოების მიმდებარე მშრალი და ნახევრად მშრალი რეგიონები ყველაზე ხშირად განიცდიან მტვრის ქარიშხალებს, თუმცა მეზობელი რეგიონები ასევე არ არის დაცული ძლიერი ქარიშხლებით მტვრის გადატანისგან (Huang et.al., 2010). მართლაც, კვლევებმა აჩვენა, რომ აფრიკის უდაბნოებიდან ძლიერი ქარი ატმოსფეროში დიდი რაოდენობით მტვერს გადაიტანს, თუმცა აღსანიშნავია, რომ დაახლოებით 30% ხელახლა ბრუნდება უდაბნოებში, 20% ტრანსპორტირდება რეგიონალური მასშტაბით, ხოლო დაახლოებით 50% გადადის ატლანტის ოკეანეზე და წყნარი ოკეანეების გარეთ (Huang et.al., 2010; Zhang et.al., 1997). რაც შეეხება მტვრის მიგრაციას ჩრდილოეთ აფრიკიდან, ბოლოდროინდელი კვლევის თანახმად, საჰარიდან იფრქვევა ყოველწლიურად დიდი რაოდენობის მინერალური მტვერი წელიწადში და მისი გავრცელების ძირითადი

მიმართულებებია: ატლანტის ოკეანის გადაღმა შეერთებული შტატები, კარიბის ზღვისპირეთი და სამხრეთ ამერიკა, ხმელთაშუა ზღვას და ევროპა, აღმოსავლეთ ხმელთაშუაზღვისპირეთი, შუა აღმოსავლეთი და აღმოსავლეთი აზია.

რეგიონალური მასშტაბის მტვრის აეროზოლი (რმმა) მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გვალვაზე, გაუდაბნოების პროცესებზე და, ზოგადად, კლიმატურ პირობებზე მშრალ და ნახევრადმშრალ რეგიონებშიც (Han et. al., 2008; Wang et.al., 2008). გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ჩრდილოეთ კავკასიის ტერიტორია მიეკუთვნება რმმა-ს მიერ დაზარალებულ რეგიონებს, რომლებშიც მტვერი ძლიერი ქარის გამო აფრიკისა და შუა აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან ტრანსპორტირდება (Shahgedanova et. al., 2013; Kutuzov et. al., 2014., Davitashvili and Samkharadze, 2021) მიუხედავად იმისა, რომ მტვერი საქართველოში ერთ-ერთი მთავარი დამაბინძურებელია (საქართველოს გარემოს დაცვის ეროვნული სააგენტოს მონაცემებით), რმმა-ს უდაბნოებიდან საქართველოში გადატანა ჯერ არ არის ჯეროვნად შესწავლილი (Davitashvili and Samkharadze, 2021). მცინვარებში უდაბნოს მტვრის (შპს) ნიმუშების ანალიზის საფუძველზე, კარგადაა შესწავლილი ევროპის ალპებში რმმა-ს მისი წარმოშობის საკითხი და ქიმიური მახასიათებლები (Schwikowski et. al., 1999; Grousset et. al., 2003; Sodemann et. al., 2006), დასავლეთ და ცენტრალურ აზიაში (Eghbali et.al., 2016; Dong et. al., 2009; Prasad et. al., 2009), ჰიმალაის და ტიბეტის პლატო (Kang et. al., 2010; Li et. al., 2011), ხმელთაშუაზღვის რეგიონი (Erel et. al. 2006), კავკასია (Shahgedanova et. al., 2013; Kutuzov et. al., 2014; Mikhalenko et. al., 2015; Kutuzov et. al., 2016; Davitashvili et al., 2018; 2019). LTD, რომელმაც კავკასიის ტერიტორიას მიაღწია, რუსეთში მთა ელბრუსის მწვერვალზე აღმოაჩინეს. (Shahgedanova et. al., 2013; Kutuzov et. al., 2014) და მთა ყაზბეგის მწვერვალზე საქართველოში (Kutuzov et. al., 2016).

მტვრის ნაწილაკები მთა ელბრუსზე (5115 მ.ზ.დ) ნაპოვნია ყინულის ბირთვებში, რომელიც მოპოვებულია სამეცნიერო ექსპედიციების მიერ 2009, 2012 და 2013 წლებში. მიღებული მასალების ანალიზმა აჩვენა, რომ მტვერი წელიწადში 3-7-ჯერ ვრცელდება ძირითადად შუა აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან და, შედარებით იშვიათად ჩრდილოეთ საჰარიდან. კერძოდ, ნიმუშების იზოტოპურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ

მტვრის აეროზოლების მიმართულებების 17 შემთხვევიდან, 13 ნიმუში მოდის შუა აღმოსავლეთიდან გავრცელებულ მტვერზე და მხოლოდ 4 ნიმუში საჰარის ჩრდილო-აღმოსავლეთიდან (Kutuzov et. al., 2014). ყაზბეგის მყინვარიდან (4500 მ სიმაღლეზე) მოპოვებული ყინულის ბირთვის (18 მ) ანალიზმა, რომელიც ჩატარდა ელექტრონული მიკროსკოპის და რენტგენის დიფრაქციის სკანირებით, აჩვენა, რომ ადგილობრივი წარმოშობის მტვერთან ერთად, ასევე იყო მტვერი, რომელიც მხოლოდ შუა აღმოსავლეთისა და საჰარის უდაბნოებიდან იყო გადატანილი (Kutuzov et. al. 2016). უნდა აღინიშნოს, რომ მთ. ყაზბეგი მდებარეობს საქართველოს ტერიტორიის ჩრდილოეთ საზღვარზე, ხოლო შესაბამისი კვლევა საქართველოს ტერიტორიაზე LTD-ს გადატანის მარშრუტების შესწავლასთან დაკავშირებით ჯერ არ ჩატარებულა სათანადო მეთოდით.

თავი 2. ჰაერის მასების დინამიკა მთა-ხეობებში.

2.1. ზონალური ჰაერის ნაკადის რიცხვითი მოდელირება კავკასიის რეგიონისთვის.

ცირკულაციებს შორის, მუსონური ტიპის ცირკულაცია ყველაზე მკვეთრად გამოხატული დასავლეთ საქართველოში. ასეთი მუსონური ტიპის ჰაერის ნაკადმა შეიძლება მნიშვნელოვანად შეცვალოს არა მარტო დასავლეთ საქართველოს, არამედ აღმოსავლეთ საქართველოს კლიმატიც. ამიტომ მნიშვნელოვანია ამ ფენომენის შესწავლა მათემატიკური მოდელირების საშუალებით. ამგვარი კვლევის ჩასატარებლად პირველ რიგში უნდა მიმოვიხილოთ საქართველოს ტერიტორიაზე არსებული ძირითადი სინოპტიკური პროცესები.

საქართველოს ტერიტორიაზე დაკვირვებული ძირითადი სინოპტიკური პროცესების კლასიფიკაცია და ამ პროცესებით გამოწვეული ამინდის ხასიათი სტატისტიკური და ემპირიული მეთოდებით შესწავლილ იქნა სინოპტიკოსებისა და მეტეოროლოგების მიერ (Kordzakhia, 1961; Javakhishvili, 1981; 1988). გრძელმასშტაბიანი სინოპტიკური პროცესების შესწავლამ აჩვენა, რომ საქართველოს ტერიტორიაზე ძირითადად გვაქვს ხუთი პროცესის ტიპი:

- დასავლეთის ატმოსფერული პროცესები (ატმოსფერული მასების გადატანა ხდება განედის გასწვრივ, 54% შემთხვევაში).
- აღმოსავლეთის ატმოსფერული პროცესები (21% წელიწადში).
- ანტიციკლონური პროცესები (7% წელიწადში).
- ტალღური აღრევები (სამხრეთიდან თბილი ფრონტის შემოჭრა, 4% წელიწადში).
- ორმხრივი ატმოსფერული პროცესები (შემოჭრა დასავლეთიდან და აღმოსავლეთიდან ერთდროულად, წელიწადში 1,5 %).

უნდა აღინიშნოს, რომ თბილი (ცივი) ჰაერის მასების შემოჭრა ჩრდილოეთიდან იშვიათია, ვინაიდან მთავარი კავკასიონის ქედი არის ბუნებრივი ბარიერი ჩრდილოეთიდან შემოსული ჰაერის მასებისათვის. ამიტომ როგორც წესი ჩრდილოეთის დინებები გვერდს უვლიან მთავარი კავკასიონის ქედს და

შემოედინებიან ან ჩრდილო-დასავლეთიდან ან ჩრდილო-აღმოსავლეთის მხრიდან (Javakhishvili, 1981). როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სამხრეთიდან შემოდის მხოლოდ ატმოსფერული პროცესების 13%, ხოლო დასავლეთისა და აღმოსავლეთის პროცესები (ჰაერის მასების ზონალური გადატანა შავი ზღვიდან კასპიის ზღვისკენ და პირიქით) შეადგენს 75%. სწორედ ამიტომ, დასავლეთ საქართველოში კლიმატის ცვლილების უკეთ შესასწავლად, აუცილებელია შევისწავლოთ მეტეოროლოგიური ველების ცვლილება ატმოსფეროს ქვედა ფენაში, როცა ატმოსფერული ნაკადი მოძრაობს შავი ზღვიდან ხმელეთისკენ და პირიქით.

შესწავლა გვიჩვენებს, რომ საქართველოს ტერიტორიაზე კლიმატის ფორმირება არის გამოწვეული როგორც ფართომასშტაბიანი სინოპტიკური, ასევე განსაკუთრებით ლოკალური ატმოსფერული პროცესების მოქმედებით, რომლებიც ძირითადად გამოწვეულია კავკასიის რელიეფის რთული ოროგრაფიით (Khvedelidze, 1978; Davitashvili, 1979; 1996). დამატებით საქართველოს გეოგრაფიული ადგილმდებარეობა თამაშობს მნიშვნელოვან როლს რეგიონალური კლიმატის ჩამოყალიბებაში (Javakhishvili, 1981; 1988; Kordzakhia, 1961). მართლაც, საქართველოს ტერიტორიის ადგილმდებარეობა ერთის მხრივ შავ და კასპიის ზღვებს შორის და მეორეს მხრივ მთავარ და მცირე კავკასიონის ქედებს შორის, თამაშობს მნიშვნელოვან როლს საქართველოში მეტეოროლოგიური ველების სივრცულ-დროით განაწილებაში. კავკასიის ტერიტორიაზე დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ საქართველოს ტერიტორიაზე ძირითადად ხდება ატმოსფერული მასების შემოსვლა დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ და პირიქით (Javakhishvili, 1981; 1988; Kordzakhia, 1961).



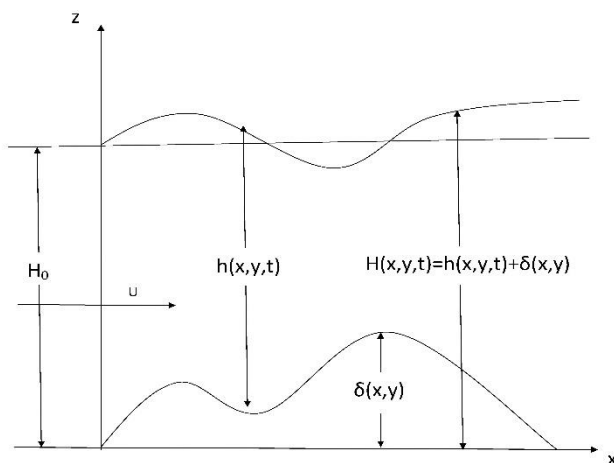
სურ.2.1.1 კავკასიის რუკა.

მართლაც სურ. 2.1.1 გვიჩვენებს, რომ მთავარ და მცირე კავკასიონის ქედებს შორის არის ხელსაყრელი კორიდრი ატმოსფერული ჰაერის მასების გადასატანად შავი ზღვიდან კასპიის ზღვისკენ მცირე დაბრკოლებით საქართველოს ცენტრალურ ნაწილში (ლიხის ქედი, რომელიც აკავშირებს მთავარ და მცირე კავკასიონის ქედებს). ლიხის ქედის დასავლეთით რელიეფი თანდათანობით დაბლდება შავი ზღვის სანაპიროზე (კოლხეთის დაბლობი). ლიხის ქედის აღმოსავლეთი ნაწილი არის ქართლის დაბლობი, რომელიც ვრცელდება მდინარე მტკვრის გასწვრივ აზერბაიჯანის საზღვრამდე. სურ. 2.1.1 –იდან კარგად ჩანს, რომ რომ შავი ზღვა, მთავარი და მცირე კავკასიონი ლიხის ქედთან ერთად თამაშობს მნიშვნელოვან როლს დასავლეთ საქართველოს კლიმატის ჩამოყალიბებაში. მეცნიერული კვლევა აჩვენებს, რომ ფართომასშტაბიანი სინოპტიკური პროცესები საქართველოში არის არამდგრადი და მათი მონაცვლეობა მნიშვნელოვნად მოქმედებს მეზომასშტაბური ჰაერის ყოფაქცევაზე (Javakhishvili, 1988). ამ საკითხის შესწავლის პროცესში იბადება კითხვა, თუ რამდენად ექვემდებარება მეზომასშტაბური ნაკადები ფართომასშტაბიან ატმოსფერულ პროცესების ცვალებადობას რთული ოროგრაფიის შემთხვევაში.

ასეთი კვლევები ნაწილობრივ ჩატარდა საქართველოს ტერიტორიის მაგალითზე 2 და 3-D ჰიდრავლიკური მოდელების გამოყენებით (Demetrashvili, 1979; Demetrashvili, 2013; Davitashvili, 2015). ამ თავში წარმოდგენილია მეტეოროლოგიური ველების სტრუქტურული ცვალებადობის შესწავლა რიცხვითი მოდელით ატმოსფეროს ქვედა ფენაში, როცა ატმოსფერული მასები გადაადგილდება შავი ზღვიდან კასპიის ზღვამდე და პირიქით და მათზე გავლენას ახდენს არამდგრადი ფართომასშტაბიანი ნაკადები და დედამიწის ზედაპირის რელიეფის არაერთგვაროვანება. ამ მიზნის მისაღწევად ვიყენებთ სამგანზომილებიან არასტაციონალურ მოდელს, რომელიც შექმნილია „მშრალი ატმოსფეროსთვის“ (Davitashvili, 2015, Samkharadze and Davitashvili, 2004).

განვიხილოთ ტროპოსფეროში მოძრავი ჰაერის მასა, რომელიც შემოსაზღვრულია ქვემოდან არაერთგვაროვანი დედამიწის ზედაპირით $\delta(x, y)$ და ზემოდან ტროპოპაუზის თავუსუფალი ზედაპირით $H(x, y, t)$ რომელთა ცვალებადობა არის განსაზღვრული მოდელის განტოლებების ინტეგრირებით (ნახ.2.1.1). გამარტივების

მიზნით პირველ ეტაპზე უგულებელვყოთ ატმოსფეროში მიმდინარე კონდენსაციისა და რადიაციის პროცესები.



ნახ.2.1.1. მოდელირებული სივრცის ვერტიკალური განაწილების სქემა.

შემოთავაზებული იდეების მიხედვით (Kibel, 1964; Gutman, 1972) გამოიყენება თავისუფალი კონვექციის თეორიის გამარტივება, ატმოსფერული ჰაერის მასების ტრანსპორტირების ამოცანა ტროპოსფეროში ფორმულირებულია მეტეოროლოგიური პარამეტრების ფონური მნიშვნელობებიდან გადახრის თვალსაზრისით.

დეკარტეს კოორდინატა სისტემიდან x , y და z (სადაც x და y ღერძები მიმართულია შესაბამისად აღმოსაღეთისკენ, ჩრდილოეთისკენ და z მიმართულია ვერტიკალურად ზევით) რელიეფთან დაკავშირებულ კოორდინატა სისტემაზე x_1, y_1, ζ გადასვლით შემდეგი დამოკიდებულებებით

$$x_1 = x, y_1 = y, \zeta = \frac{z - \delta(x, y)}{h(x, y, t)},$$

$$h = H(x, y, t) - \delta(x, y)$$

ახალი განტოლებათა სისტემა მიიღებს შემდეგ სახეს (Davitashvili & Demetrashvili, 2015)

$$\frac{du}{dt} = -\Theta_0 \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \lambda \vartheta' \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) + l v + \mu \Delta u + F_u, \tag{2.1.1}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\Theta_0 \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \lambda \vartheta' \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - l u + \mu \Delta v + F_v, \tag{2.1.2}$$

$$\Theta_0 \frac{\partial \varphi'}{\partial \zeta} = \lambda \vartheta' h, \quad \varphi = c_p (p/1000)^{R/c_p}, \quad (2.1.3)$$

$$\frac{d \vartheta'}{dt} + S w = \mu \Delta \vartheta' - u' \frac{\partial \Theta}{\partial x} - v' \frac{\partial \Theta}{\partial y}, \quad (2.1.4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = e^{\sigma h} \int_0^1 E e^{-\sigma h \zeta} d\zeta, \quad \tilde{w} = \frac{1}{h} \left[e^{\sigma h \zeta} \int_0^{\zeta} E e^{-\sigma h \zeta} d\zeta - \zeta e^{\sigma h} \int_0^1 E e^{-\sigma h \zeta} d\zeta \right], \quad (2.1.5)$$

$$w = \zeta \frac{\partial h}{\partial t} + u \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) + v \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) + \tilde{w} h, \quad (2.1.6)$$

$$E(x, y, t) = \sigma u h \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) + \sigma v h \left(\zeta \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \delta}{\partial y} \right) - \frac{\partial u h}{\partial x} - \frac{\partial v h}{\partial y}. \quad (2.1.7)$$

სადაც,
$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial}{\partial \zeta}, \quad \Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2},$$

$$u = U + u', \quad v = V + v', \quad w = w', \quad \vartheta = \Theta + \vartheta', \quad \varphi = \Phi + \varphi',$$

$$F_u = -IV + \frac{\partial U}{\partial t}, \quad F_v = IU + \frac{\partial V}{\partial t}, \quad S = \frac{\partial \Theta}{\partial z},$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} = \frac{l}{\lambda} \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial y} = -\frac{l}{\lambda} \frac{\partial U}{\partial z}.$$

სადაც გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები: u , v და w ჰაერის სიჩქარის კომპონენტები შესაბამისად x , y და z კოორდინატების გასწვრივ; \tilde{w} არის ქარის სიჩქარის ვერტიკალური კომპონენტის ანალოგი რელიეფთან დაკავშირებულ კოორდინატთა სისტემაში; ϑ' და φ' არის პოტენციალური ტემპერატურისა და წნევის ანალოგის გადახრები ფონური მნიშვნელობებიდან Θ და Φ , შესაბამისად; U და V არის ქარის სიჩქარის კომპონენტების ფონური მნიშვნელობები x და y , ღერძების გასწვრივ, შესაბამისად. g , Θ_0 , l არის თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, საშუალო პოტენციალური ტემპერატურა და კორიოლისის პარამეტრები, შესაბამისად; c_p , R , λ არიან კუთრისითბოტევადობა მუდმივი p წნევის დროს, გაზის მუდმივა მშრალი ჰაერისათვის და ამომგდები ძალის პარამეტრი, შესაბამისად; σ აღწერს სიმკვრივის ცვლილებას სიმაღლის მიხედვით; F_u და F_v სივრცისა და დროის ფუნქციები აღწერენ ფართომასშტაბიანი სინოპტიკური პროცესების გავლენას მეზომასშტაბურ პროცესებზე.

განტოლებათა სისტემა (2.1.1)-(2.1.7) იხსნება შემდეგი საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით:

$$\tilde{w} = 0, \left(w = u \frac{\partial \delta}{\partial x} + v \frac{\partial \delta}{\partial y}, z = \delta(x, y) \right) \text{ თუ } \zeta = 0, \quad (2.1.8)$$

$$\tilde{w} = 0 \quad \left(w = \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y}, z = \delta(x, y) \right), \quad \varphi' = 0, \text{ თუ } \zeta = 1 \quad (2.1.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \varphi'}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \text{ თუ } x = 0, L_x, \quad (2.1.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \varphi'}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0, \text{ თუ } y = 0, L_y, \quad (2.1.11)$$

$$u = u^0, \quad v = v^0, \quad \varphi' = \varphi'^0, \quad h = H_0 - \delta(x, y), \text{ თუ } t = 0, \quad (2.1.12)$$

სადაც H_0 არის თავისუფალი ზედაპირის საწყისი სიმაღლე; L_x და L_y არის ბადის ჰორიზონტალური მასშტაბი x და y ღერძების გასწვრივ, შესაბამისად. სასაზღვრო პირობების ძირითადი მოთხოვნა (2.1.10) და (2.1.11) ითვალისწინებს, რომ მათ უნდა უზრუნველყონ შემფოთებების გავლა, რომელიც წარმოიქმნება ბადის შიგნით, გვერდითი საზღვრების გასწვრივ მნიშვნელოვანი არეკვლის გარეშე.

\tilde{w} და h აღებულია უწყვეტობის განტოლებიდან

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{w}h}{\partial z} = \sigma wh,$$

\tilde{w} -სთვის (2.1.8) და (2.1.9) სასაზღვრო პირობების გამოყენებით.

ამრიგად, (2.1.1)-(2.1.7) განტოლების ამონახსნი, (2.1.8)-(2.1.12) საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით მართკუთხა პარალელეპიპედში $M(0 \leq \zeta \leq 1, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y)$. განტოლება იხსნება რიცხვითი მეთოდებით კერძოდ, 2 დონიანი ლაქს-ვენდროვის მეთოდით (Richtmayer & Morton., 1972).

2.2. ჰაერის ნაკადი იზოლირებული დაბრკოლების შემთხვევაში.

სანამ ჰაერის ნაკადის ქცევას განვიხილავდეთ რეალური ტოპოგრაფიის შემთხვევაში, განვიხილოთ ჰაერის ნაკადი იზოლირებული წრიული დაბრკოლების

შემთხვევაში, როცა დაბრკოლების ფორმა მოცემულია შემდეგი ფორმულით (Demetrashvili & Davitashvili, 2013):

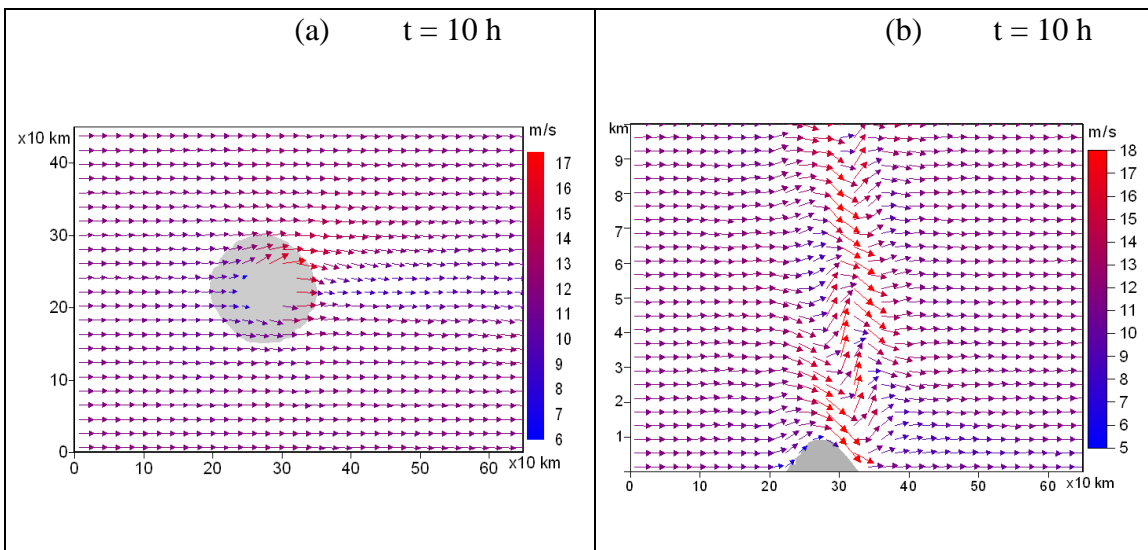
$$\delta(x, y) = \begin{cases} a_0(1 - r^2/r_0^2)^3, & r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \leq r_0 \\ 0, & r > r_0, \end{cases}$$

სადაც a_0 და r_0 დაბრკოლების მაქსიმალური სიმაღლე და ნახევარ-სიგანე, x_0 და y_0 არის ზედა საზღვრის ჰორიზონტალური კოორდინატები.

რიცხვითი გათვლები შესრულდა 21 ვერტიკალურ დონეზე, რომლებიც აღებული იქნა თანაბარი ვერტიკალური ბიჯი $\Delta z = 0.05$. ყოველ დონეზე არის განთავსებული 46×66 ბადის წერტილი 10 კმ-იანი ბადის ბიჯით. იზოლირებული წრიული დაბრკოლების სხვა პარამეტრებს აქვთ შემდეგი რიცხვითი მნიშვნელობები : $a_0 = 1$ კმ, $r_0 = 75$ კმ, $H_0 = 12$ კმ, $S = 0.003 \text{ K/m}$,

$\sigma = 10^{-4} \text{ მ}^{-1}$, $l = 10^{-4} \text{ წმ}^{-1}$, $\lambda = 0.033 \text{ მ/s}^2 \text{ K}$, $\Theta_0 = 300 \text{ K}$. დროის $\Delta t = 60 \text{ s}$.

რიცხვით ექსპერიმენტებში ერთიანი დაურღვეველი ატმოსფერული ფონური სიჩქარე მიმართულია x ღერძის გასწვრივ და დროის მიხედვით იცვლებოდა შემდეგნაირად: ფონური სიჩქარე იზრდებოდა 2 საათის განმავლობაში და მიაღწია 12 მ/წმ-ს. ამის შემდეგ ის არ შეცვლილა $t = 10$ სთ-მდე.



ნახ.2.2.1 მეზომასშტაბური ატმოსფერული ნაკადის ტრანსფორმაციის ხედი $z = 500$ მ სიმაღლეზე.

ჩატარდა რიცხვითი ექსპერიმენტების სერია, რომლებიც ასახავდნენ ლიხის ქედის ანალოგიურ ხელოვნურ დაბრკოლებაზე მეზომასშტაბური ნაკადის დინების თავისებურებებს. აქ წარმოდგენილია მხოლოდ ზოგიერთი მახასიათებელი ექსპერიმენტების რიცხვითი თვლის შედეგების მოკლე ანოტაცია. მაგალითად ნახ.2.2.1 (a). ასახავს ჰაერის ნაკადის ტრანსფორმაციას იზოლირებული დაბრკოლების მახლობლობაში ჰორიზონტალურ $z = 500$ მ სიმაღლეზე, ხოლო ნახ.2.2.1 (b)-ზე წარმოდგენილია ჰაერის ნაკადის ტრანსფორმაცია z_{0x} ვერტიკალურ სიბრტყეში (რომელიც გადის დაბრკოლების ცენტრში). ნახ. 2.2.1 (a)-ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ 10 საათის განმავლობაში მეზომასშტაბური ჰაერის მოძრაობა ირღვევა ჰორიზონტალურ სიბრტყეში და ნაკადი მნიშვნელოვნად ტრანსფორმირდება. კერძოდ, ნახ. 2.2.1 (a)-დან აშკარად ჩანს, რომ ამ დროის განმავლობაში, ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ჰაერის ნაკადის სიჩქარე იზრდება დაბრკოლების მახლობლობაში ჩახვეულობის წარმოქმნის ტენდენციით. ნახ. 2.2.1 (b)-ს ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ტალღის ამპლიტუდა დაბრკოლების გარშემო მნიშვნელოვნად იზრდება მთელს ტროპოსფეროში. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ თითქმის მსგავსი შედეგი იქნა მიღებული ორგანოზომილებიანი მოდელის შემთხვევაშიც (Demetrashvili, 1979).

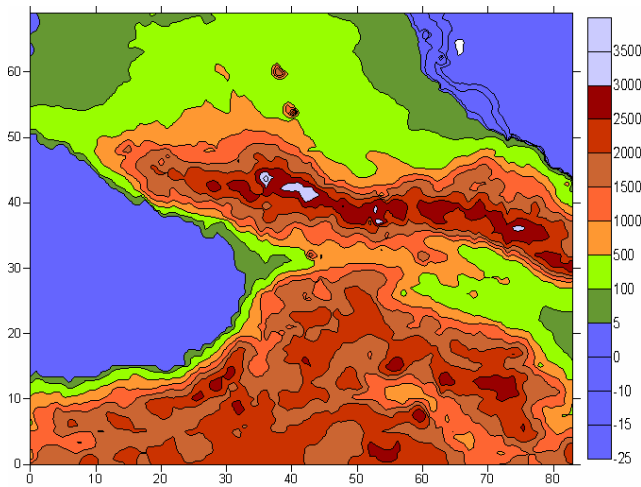
2.3. ჰაერის ნაკადის მოდელირება კავკასიის რეალური ტოპოგრაფიის შემთხვევაში.

ზოგიერთი რიცხვითი გაანგარიშება განხორციელდა (2.1.1)-(2.1.7) განტოლებების საფუძველზე კავკასიის რეალური რელიეფის გათვალისწინებით (2.1.8)-(2.1.12) სასაზღვრო და საწყისი პირობები ფარგლებში. კერძოდ, რიცხვით ექსპერიმენტებში გათვალისწინებულია კავკასიისა და მისი შემოგარენის ტოპოგრაფიული რუკებიდან მიღებული მატრიცული მონაცემები რელიეფის სიმაღლის და მისი დახრილობის ზოგიერთი პარამეტრის გამოყენებით, შესაბამისად, 10 კმ-იანი ბიჯით (იხილეთ ნახ. 2.3.1). როგორც ნახ. 2.3.1 გვიჩვენებს ჩვენს მიერ მოპოვებული და დამუშავებული რელიეფის სიმაღლისა და დახრილობის მატრიცული მონაცემები

დამაკმაყოფილებლად აღწერს კავკასიის საკმაოდ რთული და ორიგინალური ტოპოგრაფიის მახასიათებლებს და განსაკუთრებით კარგად ასახავს ატმოსფერული ნაკადების დერეფანს საქართველოს ტერიტორიაზე.

რიცხვითი გათვლებისთვის, შერჩეულია რეგიონი M 830x690 კმ ჰორიზონტალური ზომებით, რომელიც ვერტიკალური მიმართულებით დაფარულია 30 დონიანი ბადური ქსელით და თითოეულ ჰორიზონტალურ ბადეზე არის 84 x 70 წერტილი. ბადის ბიჯი არის 10 კმ. დროის ბიჯი იყო $\Delta t = 6$ წამი. სხვა პარამეტრები აღებულია შემდეგი რიცხვითი მნიშვნელობებით: $H_0 = 12$ კმ, $S = 0.003 K/m$, $\sigma = 10^{-4}$ მ⁻¹, $\lambda = 0.033$, $l = 10^{-4}$ წ 1, მ/წ² კ, $\Theta_0 = 300 K$.

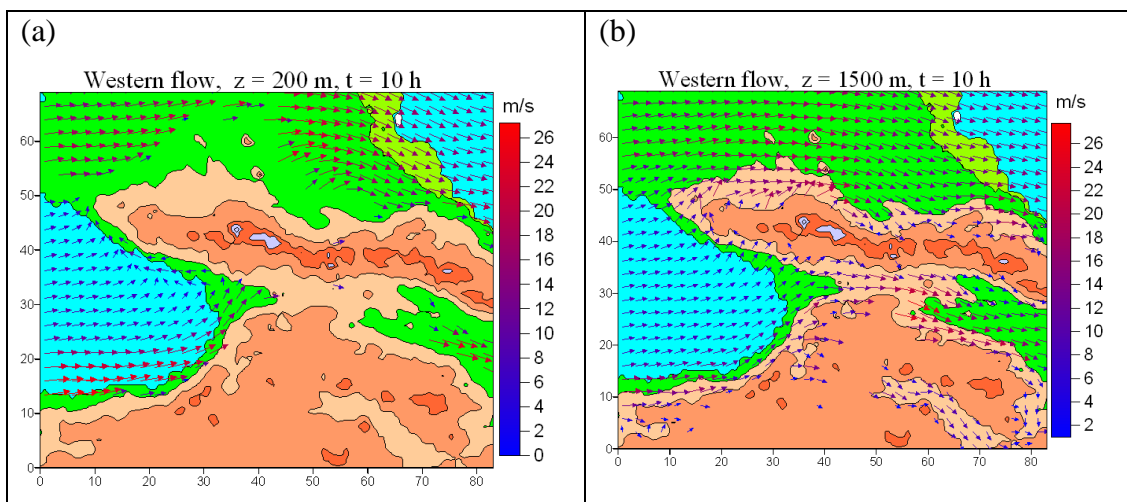
რიცხვით ექსპერიმენტებში ერთგვაროვანი შეუშფოთებელი ფონური დინება მიმართული იყო ox ღერძის გასწვრივ და ის დროში იცვალბოდა შემდეგნაირად: ფონური დინებები წარმოიშვა $t = 0$ მომენტში და ორ საათის შემდეგ მიაღწია 12 მ/წმ-ს. ამის შემდეგ ის არ იცვლბოდა $t = 10$ სთ–ის განმავლბაში.

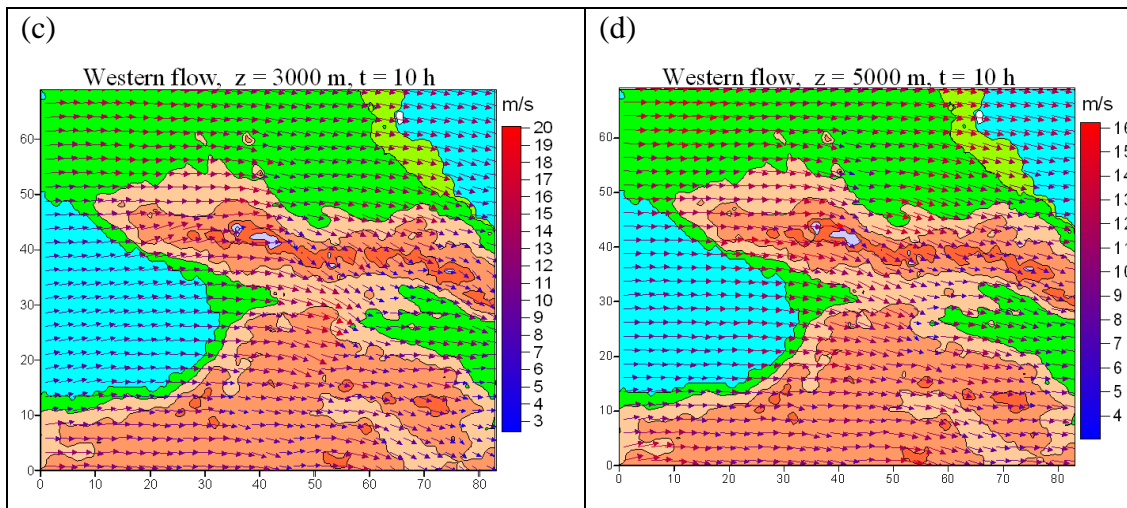


ნახ. 2.3.1. რიცხვითი გაანგარიშებისათვის გამოყენებული კავკასიის ციფრული რუკა (ზღვის დონიდან მეტრებში).

რიცხვითი გათვლების ზოგიერთი შედეგები, რომელიც განხორციელდა (2.1.1) - (2.1.7) განტოლებათა საფუძველზე (2.1.8) - (2.1.12) სასაზღვრო და საწყისი პირობებით წარმოდგენილია ნახ.2.3.2 და ნახ.2.3.2 –ის სახით. ნახ.2.3.2-ზე წარმოდგენილია დასავლეთის მიმართულების შეუშფოთებელი აირის ნაკადები სხვადასხვა სიმაღლეზე z

= 200, 1500, 3000 და 5000 მ (ზღვის დონიდან) $t = 10$ სთ-ზე. ნახ.2.3.2-დან ნათლად ჩანს, რომ დასავლეთის დინება მნიშვნელოვან ცვლილებებს განიცდის ოროგრაფიის გავლენით $t = 10$ სთ-ის მომენტისთვის. კერძოდ, აფხაზეთისა და აჭარის სანაპიროებზე, რომლებიც საკმაოდ მაღალი მთის სისტემებით ხასიათდება, რელიეფის გავლენით ჰაერის ნაკადი ორ დინებად იყოფა და ერთი მათგანი ჩრდილოეთისკენ მიემართება. ასევე აშკარად ჩანს, რომ დასავლეთის ატმოსფერული ნაკადის უდიდესი ნაწილი ვერ გადალახავს (თავს არიდებს) კავკასიონის მთებს და ვრცელდება მთელ ჩრდილოეთ კავკასიაში. გარდა ამისა, დინების ანალიზი $z = 200$ მ-ზე გვიჩვენებს, რომ ლიხის ქედის ოროგრაფიული დაბრკოლების ზემოქმედების გამო ქარის ჩახვეულობა წარმოიქმნება კოლხეთის დაბლობზე, დაახლოებით 12-16 მ/წმ სიჩქარის (ნახ. 2.3.2 a), ხოლო ჰაერის ნაკადის ანალიზი $z = 1,500$ მ სიმაღლეზე აჩვენებს, რომ კოლხეთის დაბლობზე ქარის ჩახვეულობის (მორევის) წარმოქმნის ნაცვლად, კავკასიონის მთავარ ქედზე არსებობს ჰაერის მორევის რამდენიმე სუსტი წარმონაქმნი (ნახ. 2.3.2 b) . ნახ. 2.8.2 (c, d) ანალიზი ნათლად აჩვენებს, რომ სიმაღლის მატებასთან ერთად ($z = 3000$ მ-დან $z = 5000$ მ-მდე), მთავარი კავკასიონის მთების გავლენით ნაკადი სუსტდება და მისი მიმართულება თანდათან უბრუნდება ფონურ მიმართულებას. მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ოროგრაფიის გავლენა მოძრავ ჰაერის ნაკადზე მაინც აშკარად იკვეთება ჰაერის ნაკადის ბრუნვის გადახრით და ჰაერის ნაკადის სიჩქარის ზრდით (ქარის მაქსიმალური სიჩქარე აღწევს დაახლოებით 26 მ / წმ) კავკასიონის ძირითადი ქედის გარშემო.



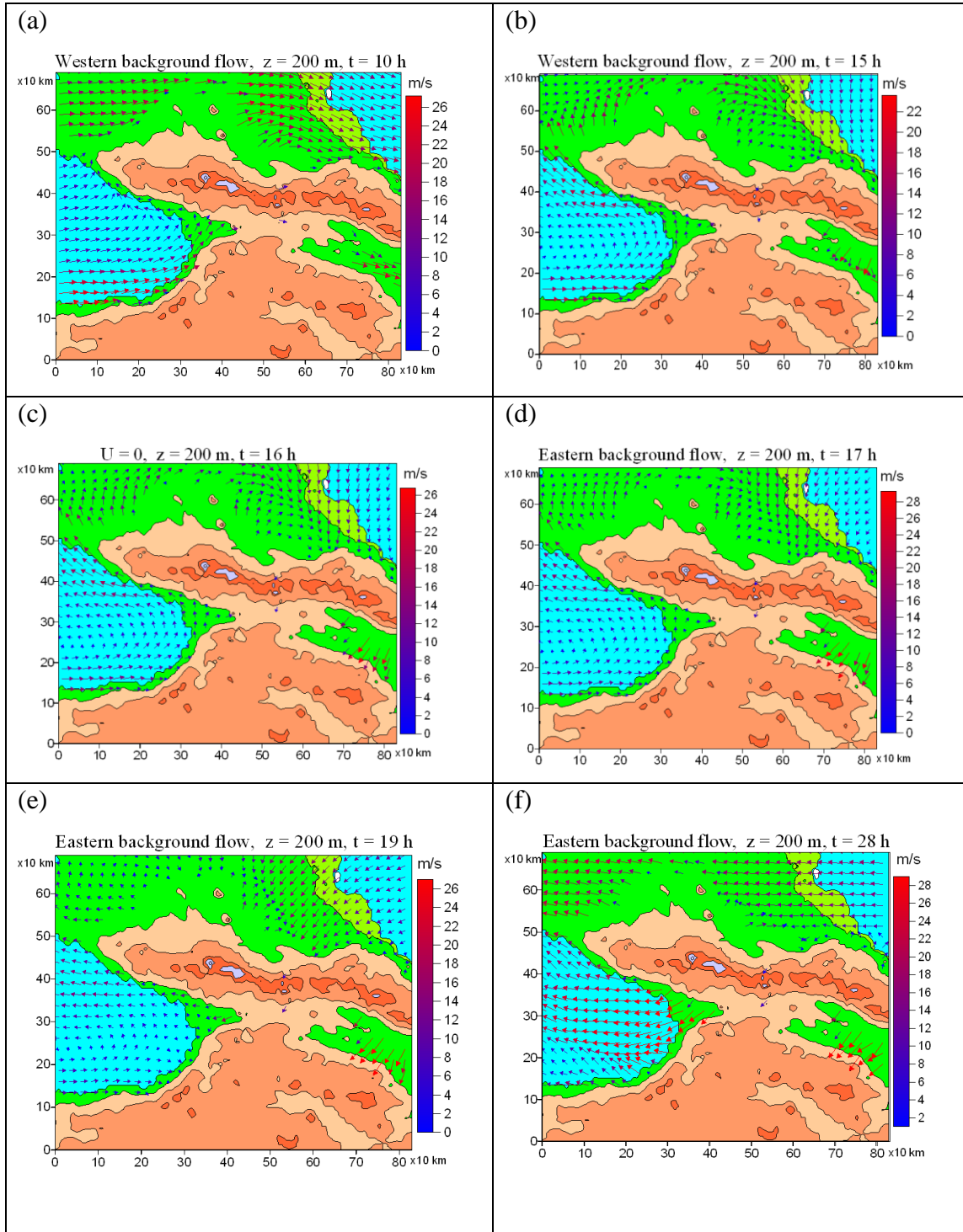


სურ.2.3.2 დასავლეთის ჰაერის ველების მიმდინარეობა კავკასიის ტერიტორიაზე $t = 10$ სთ შემდეგ სიმაღლეებისათვის (a) $z = 200$ მ, (b) $z = 1500$ მ, (c) $z = 3000$ მ, (d) $z = 5000$ მ.

მეზომასშტაბური ჰაერის ნაკადის ქცევის შესწავლა საქართველოში (დასავლეთ საქართველოში), როცა დასავლეთის ფონური ჰაერის ნაკადი (მიმართულია შავი ზღვიდან კასპიის ზღვისკენ) შეცვლილია აღმოსავლეთის ფონური ჰაერის ნაკადით (მიმართულია კასპიის ზღვიდან შავი ზღვისკენ) დიდ ინტერესს წარმოადგენს, ვინაიდან აღმოსავლეთის პროცესები ხშირია საქართველოს ტერიტორიაზე. ამიტომ, კავკასიის რეალურ ტოპოგრაფიის შემთხვევაშიც ჰაერის ნაკადის თავისებურებათა შესწავლის მიზნით, ჩატარდა რიცხვითი გათვლები, როდესაც დასავლეთის ფონური დინება $U=12$ მ/წმ სიჩქარით გარდაიქმნება აღმოსავლეთიდან მომავალ დინებად $U = -12$ მ/წმ. საპირისპირო სიჩქარით. თუმცა ფონური ნაკადის ცვლილების დრო $t=12$ სთ-მდე იყო იგივე, რაც წინა რიცხვითი ექსპერიმენტებში, წარმოებული (2.1.1) - (2.1.7) განტოლებების საფუძველზე, (2.1.8) - (2.1.12) საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით.

ნახ.2.3.3-ში წარმოდგენილია შემფოთებული ნაკადის ველები ზღვის დონიდან $z = 200$ მ სიმაღლეზე დროის სხვადასხვა მომენტებისთვის. რიცხვითმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ ფონური ნაკადის სიჩქარის შემცირებისას 12 მ/წმ-დან 0 მ/წმ-მდე, ოროგრაფიულად შემფოთებული დინება მნიშვნელოვან ცვლილებებს განიცდიდა. კერძოდ, კოლხეთის დაბლობის გარშემო და შავი ზღვის აღმოსავლეთ ნაწილში აშკარად

შეინიშნებოდა ქარის მოქცევა საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით და მეტი ჩახვეულობების წარმოქმნის ტენდენცია.



ნახ.2.3.3. საჰაერო დენის ველების სიმულაცია კავკასიონზე $z = 200$ მ-ზე შემდეგი დროებისთვის: (a) - 14 სთ, (b) - 15 სთ, (c) - 16 სთ, (d) - 17 სთ, (e) - 19 სთ, (f) - 28 სთ.

ჰაერის ნაკადის გადადინებისას იზოლირებული წრიული ფორმის დაბრკოლების შემთხვევაშიც კი ძალიან საინტერესოა მეზომასშტაბური ჰაერის ნაკადის შემფოთების ფენომენი, როცა არ გვაქვს ფონური ნაკადი. ანალოგიურია (ნახ. 2.3.3 c). ნაკადის ნიმუში, რომლის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მიუხედავად ფონის არ არსებობისა ზედაპირულ ფენაში შეიძლება შენახულ იქნას მნიშვნელოვანი ქარები, რომელთა სიჩქარეც დაახლოებით 12-16 მ/წმ არის. რაც აიხსნება იმით, რომ ფონური დინების გაქრობის შემდეგ, მეზომასშტაბური მოძრაობის არსებობა ოროგრაფიულად არაერთგვაროვან ძირეულ ზედაპირზე გამოწვეულია წნევის ველის შემფოთებით, ამიტომ მეზომასშტაბური მოძრაობა შენახუნებულია ფონური წნევის გრადიენტის არარსებობის გამო. $T = 16$ საათის შემდეგ, როდესაც აღმოსავლეთის ფონური დინება წარმოიქმნება და 16-22 საათის განმავლობაში მიაღწევს 12 მ/წმ სიჩქარეს, მეზომასშტაბური დინება თანდათან გარდაიქმნება და გარკვეული დროის განმავლობაში იქმნება ისეთი სტრუქტურის ნაკადი, რომელიც შეესაბამება აღმოსავლეთ ფონის დინებას (ნახ. 2.3.3 d-f). სხვადასხვა სიმაღლეზე ატმოსფერული დინების ნიმუშების ანალიზმა აჩვენა, რომ ფართომასშტაბიანი პროცესების გარდაქმნის არასტაციონარული ხასიათი განსხვავდება ტროპოსფეროს ქვედა და ზედა ფენებში. ქვედა ფენაში, სადაც ოროგრაფიული ფაქტორი ძალიან მნიშვნელოვანია, სინოპტიკური პროცესების შეცვლაზე მეზომასშტაბური ნაკადის რეაგირების დრო უფრო მეტია, ვიდრე ტროპოსფეროს ზედა ფენებში და მეზომასშტაბური დინება ერთდროულად არ რეაგირებს ფონის ცვლილებაზე. ვერტიკალური ჭრილის შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ იზოლირებულ წრიულ დაბრკოლებაზე ჰაერის ნაკადის შემთხვევაში, რეალური რელიეფის ზემოთ ტალღის ამპლიტუდა მნიშვნელოვნად იზრდება მთელს ტროპოსფეროში და ჩახვეულობის (მორევის) სტრუქტურის ფორმირებას ადგილი აქვს ფონური ატმოსფერული პროცესების არ არსებობის დროსაც (ნახ. 2.3.).

2.4. ქარის რეჟიმი ქუთაისის მეტეოსადგურის მონაცემების მაგალითზე.

დედამიწის მოსახლეობისთვის, მრავალგვარ მეტეოროლოგიურ ელემენტებსა და მოვლენებს შორის, დიდი მნიშვნელობა აქვს ქარს. ქარის როლი მნიშვნელოვანია, რადგან მას გააჩნია როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი შედეგები. მაგალითად კაცობრიობა ზომიერ ქარს იყენებს ენერგეტიკული თვალსაზრისით, თუმცა მეორე მხრივ ქარი იწვევს მნიშვნელოვან ნგრევას 10-12 მ/წმ სიჩქარის დროსაც კი, აზიანებს ელექტროგაყვანილობას და კავშირგაბმულობის საშუალებებს. 35 მ/წმ სიჩქარის ზემოთ კი ზიანს აყენებს კაპიტალურ შენობებს. არ არსებობს შენობა-ნაგებობა, რომელიც უძლებს 90 მ/წმ სიჩქარის ქარს. ქარის სიჩქარის და მიმართულების ცვლილება ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორია ამინდის ჩამოყალიბებაში, კლიმატური პარამეტრების ცვლილებაში. იგი არის ალტერნატიული ენერჯის წყარო. ქარმა შეიძლება ასობით ტონა მტვერი გადაიტანოს ერთი ადგილიდან მეორეზე და გააძლიეროს ნიადაგის გამოშრობა-გაუდაბნოება. განსაკუთრებით საშიშია ლოკალური წარმოშობის ძლიერი ქარები-ტორნადო, ქარბორბალა და სხვა. ქარის საშუალო სიჩქარეები წარმოადგენს არასაკმარის ენერგეტიკულ მაჩვენებელს. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, ქარის სიჩქარის დაბალი მნიშვნელობის დროს თვალნათელია მათი გამოყენების არაპერსპექტიულობა, თუმცა სიჩქარის მაღალი მნიშვნელობა მუდამ ვერ უზრუნველყოფს ქარის ენერჯის გამოყენების ეფექტურობას. ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია ისეთი სიჩქარეები, რომლებიც უზრუნველყოფს ქარის ენერგეტიკული დანადგარის ავტომატურ რეჟიმს. ქარის სამუშაო სიჩქარეებიდან ენერგეტიკული თვალსაზრისით განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ისეთი სიჩქარეები, რომლებიც აღემატება 5 მ/წმ-ს (ელიზბარაშვილი ე., 2007).

ქარის გაბატონებული მიმართულება დამოკიდებულია ფიზიკურ-გეოგრაფიულ პირობებზე, წლისა და დღეღამის დროზე. საქართველოს ტერიტორიაზე მიწისპირა ქარის ზონალური და მერიდიანული მდგენელების განაწილება სეზონურ ხასიათს ატარებს. ზამთარში საქართველოს ტერიტორიის დიდ ნაწილზე გაბატონებულია ქარის მიმართულება დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ და ჩრდილოეთიდან

სამხრეთისაკენ, ხოლო გაზაფხულსა და ზაფხულში ქარი ძირითადად ქრის დასავლეთის და სამხრეთის მიმართულებით. შემოდგომაზე საქართველოს ბარში ქარის მიმართულება მიმართულია დასავლეთისაკენ, ხოლო მთებში ჯერ კიდევ შენარჩუნებულია სამხრეთისა და დასავლეთის მიმართულება (ელიზბარაშვილი ე., 2007). საქართველოს ტერიტორიაზე ქარის სიჩქარის სივრცული განაწილების კანონზომიერებანი თეორიულად საკმარისად კარგად იქნა შესწავლილი მრავალი ავტორის მიერ (ხვედელიძე, 2002; კოტარია, 1992; Хведелидзе, 2009). ბოლო წლებში კი შექმნილია არაერთი ფიზიკურ-მათემატიკური მოდელი, რომელშიც განსაზღვრული იქნა ქარის ბუნება ლოკალურ რეგიონებში, მათ შორის მთა-გორიან ტერიტორიაზე (სამხარაძე, 2011; ხვედელიძე, 2002; Хведелидзе, 2009; 2011, Demetrashvili and Davitashvili, 2013). ქარი არის ჰაერის მასების ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მოძრაობა, რომელიც გამოწვეულია ტემპერატურისა და წნევის გრადიენტებით (კოტარია, 1992). შუა განედებში, როგორცაა საქართველოს მდებარეობა, დომინირებს წნევის გრადიენტით გამოწვეული მოძრაობები, იზობარების პარალელურად, და გარდა ამისა, დედამიწის მოძრაობის გამო ქარი ძლიერდება კორიოლისის ძალით (ხვედელიძე, 2002). ხახუნისა და ოროგრაფიის გავლენა ჰაერის მასების მოძრაობაზე მნიშვნელოვანია, რადგან ისინი ეწინააღმდეგებიან მოძრაობას და აიძულებენ მისი მიმართულების ცვლილებას დაბალი წნევის ზონისკენ. ამასთანავე, საქართველოს ტერიტორიაზე, ატმოსფეროს ზედაპირულ ფენაში ქარის მიმართულება და სიჩქარეა დიდადაა დამოკიდებული ადგილობრივ გეოგრაფიულ– ოროგრაფიულ პირობებზე (Хведелидзе, 2009; 2011, Demetrashvili and Davitashvili, 2013).

საქართველოს ტერიტორიის კომპლექსური რელიეფი გარკვეულ გავლენას ახდენს ჰაერის მასების მოძრაობაზე ატმოსფეროს ქვედა ფენებში. საქართველოს ასეთი რთული რელიეფური პირობები განაპირობებს სხვადასხვა მასშტაბური ცირკულაციის სისტემების ჩამოყალიბებას და ევოლუციას და მეტეოროლოგიური ელემენტების არაერთგვაროვან სივრცით განაწილებას. ამას მოწმობს ის ფაქტი, რომ ისეთ მნიშვნელოვან პარამეტრს, როგორცაა ქარის წლიური განაწილება, საქართველოში მრავალფეროვანია, მკვეთრად გამოხატული სივრცითი არაერთგვაროვნებით.

ისევე როგორც მიმართულება, ქარის სიჩქარეც დამოკიდებულია ფიზიკურ-გეოგრაფიულ პირობებზე და წლის დროზე (თუმცა საქართველოს ტერიტორიაზე ძირითადად მაინც დასავლეთის და აღმოსავლეთის ატმოსფერული პროცესები ჭარბობს). ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე საქართველოს ტერიტორიაზე იცვლება 0,6-დან(აბასთუმანი) 9,2მ/წმ (მთა-საბუეთი) ფარგლებში. ყველაზე ძლიერი ქარები დამახასიათებელია ლიხის ქედისათვის. ძლიერი ქარიანობით გამოირჩევა საქართველოს ტერიტორიის საშუალო და მაღალმთიანი ზონა. აქ ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე ძირითადად 5-9მ/წმ ფარგლებშია. ძლიერი ქარებია დამახასიათებელი აგრეთვე მდინარე რიონის ხეობისათვის, კერძოდ ქუთაისის მიდამოებში, სადაც ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე 5-10მ/წმ-ს აღწევს (ელიზბარაშვილი ე., 2007). ზემოთ თქმულიდან გამომდინარე საქართველოში ქარი ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მეტეოროლოგიური ელემენტია, რომელიც შესაძლებელია გამოიყენებულ იქნას ენერგეტიკულ ინდუსტრიაში. მაგალითად ერთ-ერთი ასეთი ტერიტორიაა ქ. გორის მიმდებარე ტერიტორია და ეს ადგილი არჩეულ იქნა პირველი ქარის ელექტროსადგურის ასაშენებლად. ამჟამად ქარის ელექტროსადგური მუშაობს გამართულად და მისი ეფექტურობა 54%-ია, რაც ასეთი ტიპის სადგურისთვის მაღალი მაჩვენებელია. ელექტროსადგურის მიერ გამომუშავებული ენერგია 1 დეკემბრიდან სრულად მიეწოდება საქართველოს ელექტროსისტემას (5,5 მლნ კვტ) და უზრუნველყოფილი იყო 10 572 კილოვატ საათი ენერგია (Tatishvili and Samkharadze, 2017). ქარის ენერგია ელექტროენერჯის წარმოების აუცილებელი და ყველაზე მნიშვნელოვანი წინაპირობაა. ელექტროსადგურს სჭირდება ქარის სიჩქარე მინიმუმ 3 მ/წმ ენერჯის გამომუშავების დასაწყებად და მისი შემდგომი განვითარება ქარის სიჩქარის პირდაპირპროპორციულია. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ქართლის ქარის ელექტროენერჯის ეფექტურობა 54%-ია, რაც მსოფლიოში ერთ-ერთი საუკეთესო მაჩვენებელია. ასე რომ, საჭირო ხდება ახალი ტერიტორიების აღმოჩენა მაღალი ენერჯის გენერირების შესაძლებლობებით. ამ მიზნით ქუთაისის რეგიონი ავირჩიეთ შესასწავლად ვინაიდან მას მაღალი ენერგეტიკული პოტენციალი გააჩნია. მიუხედავად ასეთი სადგურების დადებითი თვისებებისა, მათ გააჩნიათ გარკვეული უარყოფითი

თვისებებიც. ქარის ელექტროსადგურის მიერ განვითარებული სიმძლავრე დამოკიდებულია ქარის სიჩქარეზე. ქარის გენერატორი იწყებს სიმძლავრის გაცემას თუ ქარის სიჩქარე 2-3 მ/წმ-ია. ქარის სიჩქარის ზრდასთან ერთად ეს სიმძლავრე იზრდება და აღწევს გენერატორის ნომინალურ სიმძლავრეს ქარის 12 მ/წმ სიჩქარის დროს. თუ ქარი გაძლიერდა და მისმა სიჩქარემ გადააჭარბა 25 მ/წმ გენერატორი გაითიშება. გარდა ამისა, ძლიერი ქარების ($V \geq 30$ მ/წმ) შესახებ ქუთაისის, მთა საბუეთისა და ტყიბულის მეტეოროლოგიური სადგურების მონაცემების 1960-2005 წწ. მოპოვებული ინფორმაციის მიხედვით შეიძლება ვთქვათ, რომ ქუთაისის მეტეოსადგურის სხვადასხვა ტიპის მონაცემები 2,5-ჯერ და 7,5-ჯერ აღემატება ტყიბულისა და მთა-საბუეთის შესაბამის მონაცემებს (კაპანაძე, ხვედელიძე, 2018). ამიტომ შევეცადეთ იმერეთის რეგიონის ძლიერი ქარების რეჟიმისა და სტატისტიკური მახასიათებლების შესასწავლად ქუთაისის მეტეოსადგურის ფართო და საიმედო მონაცემებით გვესარგებლა და ქარის რეჟიმი ამ პარაგრაფში ძირითადად სტატისტიკური მეთოდებით შეგვესწავლა.

ქუთაისის რეგიონისთვის განსაკუთრებით ხშირია მთა-ხეობის ქარები და ასევე მექანიკური წარმოშობის ქარები-ფიონები. დასავლეთ საქართველოს მთიან რაიონებში მთა-ხეობის ქარები მთელი წლის განმავლობაშია და ამასთან, წლის თბილ პერიოდში მათი განმეორადობა საკმარისად დიდია (ელიზბარაშვილი ე., 2007). მთა-ხეობის ქარი წარმოადგენს ერთი და იგივე სიმაღლეზე ფერდობისა და თავისუფალი ატმოსფეროს არათანაბარი გათბობა-გაცივების შედეგს. დღისით მთის ფერდობი და მისი მიმდებარე ჰაერის ფენები უფრო მეტად თბება, ვიდრე ჰაერი ხეობის ზემოდ. ამიტომ ბარიული გრადიენტი მიმართულია ხეობიდან ფერდობისაკენ, ღამით კი საწინააღმდეგო სურათი წარმოიქმნება, რაც ფიონურ ქარებთან ერთად ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია.

ქარის ველის შესწავლის თეორიული საფუძველი არის ატმოსფეროს ჰიდროთერმოდინამიკა და ამ მხრივ მრავალი ათეული შრომაა შესრულებული ქართველი მეცნიერების მიერ (კოტარია, 1992; სამხარაძე, 2011; ხვედელიძე, 2002; Хведелидзе, 2009, Demetrashvili and Davitashvili, 2013). ამასთანავე, თვით ქარის

ბუნებიდან გამომდინარე, მისი მრავალგვარი ვარიაციების ანალიზისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს სტატისტიკურ მიდგომას. ჩვენი მიზანია დავადგინოთ ძლიერი ქარის ბუნება (>15 მ/წმ) საქართველოს სხვადასხვა, ერთმანეთისგან განსხვავებულ ტერიტორიაზე სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე. ქარი ჰაერის მასების ჰორიზონტალური გადაადგილებაა და აქვს სივრცეში სიჩქარის სამი მდგენელი. ქარი სხვადასხვა ფაქტორების ზეგავლენით დიდ ცვლილებას განიცდის. ქარი დროის უმცირეს მონაკვეთში შეიძლება მეტად განსხვავებული სიძლიერით უბერავდეს და მიმართულებას იცვლიდეს. ეს ცვლილება განსაკუთრებით მკაფიოა მიწისპირა ფენაში, ძირითადად ოროგრაფიის გავლენით. ჰაერის დინება - ქარი ბიძგების სახით პულსაციას განიცდის, რაც ცნობილია ქარის სიმძლავრის (სიმძაფრის) სახელწოდებით. მისი სიმძლავრის ზომად შეიძლება მივიღოთ დროის გარკვეულ შუალედში (წუთი, საათი, დღე-ღამე, დეკადა, თვე) ბიძგების მაქსიმუმ და მინიმალურ სიჩქარეთა სხვაობის შეფარდება დროის იმავე მონაკვეთის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობასთან, რაც შემდეგი დამოკიდებულებით შეიძლება გამოისახოს (სამხარაძე, ხვედელიძე, 2016):

$$B = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{aver}}}, \quad (2.4.1)$$

სადაც, V_{\max} და V_{\min} ქარის მაქსიმალური და მნიშვნელობებია დროის მოცემულ შუალედში, V_{aver} არის ქარის საშუალო მნიშვნელობა დროის იგივე შუალედში, B არის ქარის სიჩქარის დინამიკური მდგრადობის პარამეტრი (ხვედელიძე, 2005). (2.4.1) გვიჩვენებს, რომ ზოგადად რაც დიდია სიჩქარის ამპლიტუდა, მით მეტია B პარამეტრის მნიშვნელობა. B პარამეტრი დიდ მნიშვნელობებს ღებულობს გაზაფხულზე და შემოდგომაზე, მინიმალურს ზაფხულში. ზოგადად ქარის სიმძლავრე დამოკიდებულია ტემპერატურულ გრადიენტზე. გარდა ამისა ჰაერის ტურბულენტური მოძრაობა და აქედან გამომდინარე, ქარის სიმძლავრე დამოკიდებულია ატმოსფეროს ტემპერატურულ სტრატეფიკაციაზე, ამიტომ პარამეტრის ანალოგიურად, შემოგვაქვს თერმიული მდგრადობის პარამეტრი:

$$A = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{aver}}}, \quad (2.4.2)$$

სადაც, T_{max} და T_{min} ტემპერატურის მაქსიმალური და მინიმუმები დროის მოცემულ შუალედში, T_{aver} არის ტემპერატურის საშუალო მნიშვნელობა დროის იგივე შუალედში. (2.4.2) ახასიათებს ქარის თერმულ რეჟიმს და A არის თერმული მდგრადობის პარამეტრი.

ვინაიდან ანომომეტრული ჩანაწერები პრაქტიკულად აღარ არსებობს (რომელიც ქარის მყისიერ მნიშვნელობას წერდა), ამიტომ, მათემატიკური სტატისტიკის ცნობილი მეთოდების გამოყენებით, ძლიერი ქარის სიმძაფრის გამოსათვლელად, მათი პარამეტრების მნიშვნელობებისა და ქარის ველის სტრუქტურის შესწავლის მიზნით შესწავლილ იქნა იმერეთის რეგიონის ძლიერი ქარების რეჟიმი და სტატისტიკური მახასიათებლები ქუთაისის მეტეოსადგურის მონაცემებით. ქარის სიჩქარის 60 წლიანი მონაცემები (1960-2021 წ.წ.) დავყავით 5 მ/წმ შუალედებად და შევისწავლეთ ქარის სიჩქარის განმეორებადობა თითოეული ინტერვალისათვის. რეგიონალური კლიმატური ცვლილების უკეთ წარმოსაჩენად 60 წლიანი ინტერვალი დავყავით ორ შუალედად 1990 წლამდე შემდეგ. როგორც აღვნიშნეთ ქარის გენერატორის კომფორტულ სამუშაო სიჩქარედ ითვლება 3 მ/წმ-20 მ/წმ ქარის სიჩქარის შუალედი. ხოლო 25 მ/წმ-ს ზემოთ ქარის სიჩქარის დროს გენერატორი მწყობრიდან გამოდის. ამიტომ გარდა საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობებისა აუცილებელია ქარის სიჩქარის აბსოლუტური მაქსიმალურ მნიშვნელობათა განაწილების შესწავლაც. თუმცა შედარებისთვის ქარის აბსოლუტური მაქსიმალური განაწილებები შევისწავლეთ არა მხოლოდ 25 მ/წმ-ზე მეტი ქარის სიჩქარის მნიშვნელობებისთვის, არამედ 16-20 მ/წმ და 20-25 მ/წმ ქარის სიჩქარის შუალედებისთვისაც.

ცხრ. 2.4.1-ზე წარმოდგენილია ქარის სიჩქარის აბსოლუტურ მნიშვნელობათა 16-20 მ/წმ გრადაციის განმეორებათა რიცხვი თვეებისა და წლების მიხედვით 1960-1990 წ.წ. მეტი თვალსაჩინოებისათვის განმეორებათა რიცხვის მაქსიმალური მნიშვნელობები (>25) გამუქებულია. როგორც ცხრ.2.4.1 გვიჩვენებს ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ გრადაციის განმეორებათა რიცხვი დაბალია (<25) ზაფხულის სეზონისთვის, ხოლო დანარჩენი სამი სეზონისათვის ქარის სიჩქარის მოცემული ინტერვალისთვის განმეორებათა რიცხვი

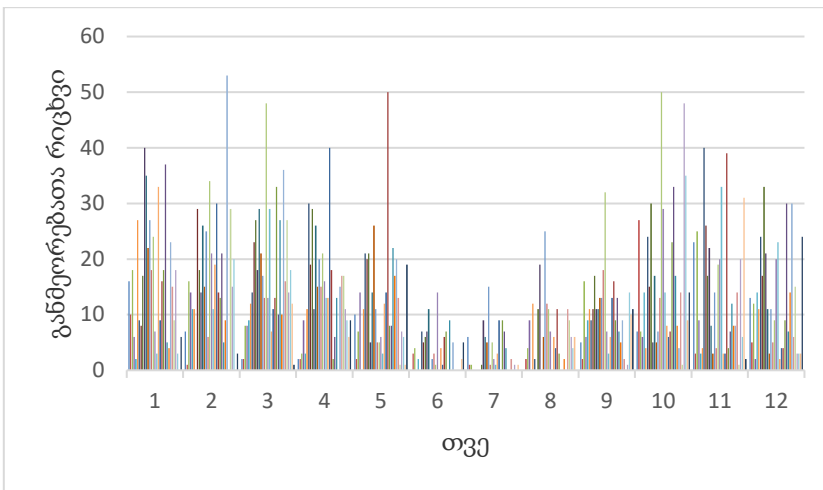
შედარებით მაღალია. განხილული წლებისთვის კი განმეორებათა რიცხვის მაქსიმალური მნიშვნელობა ფიქსირდება თებერვლის თვეში (53).

ცხრ. 2.4.1. ქარის სიჩქარის აბსოლუტური მნიშვნელობათა 16-20 (მ/წმ) გრადაციების განმეორებადობათა რიცხვი თვეებისა და წლების მიხედვით.

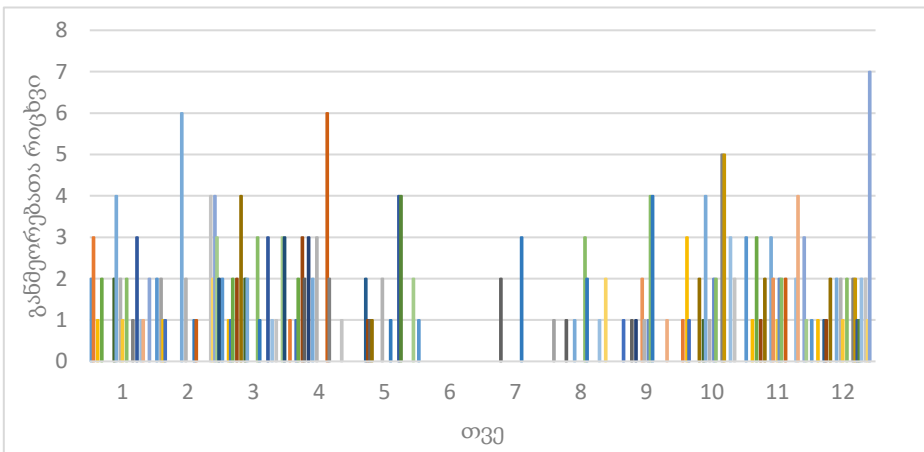
თვეები/ წლები	I	II	III	IV	V	VI	VI I	VI II	IX	X	XI	XI I	საშ.
1960	1 6	7	2	2	1 0	0	6	0	5	7	2 3	1 3	7,6
1961	1 0	1	2	2	2	3	1	2	2	2 7	3	5	5
1962	1 8	1 6	8	3	7	4	1	4	1 6	7	2 5	1 2	10
1963	6	1 4	8	9	1 4	0	0	9	6	6	9	2	7
1964	2	1 1	9	3	0	2	0	0	9	1 4	3	1 4	5,6
1965	2 7	1 1	1 2	1 1	1 1	0	0	1 2	1 1	4	4	1 1	9,5
1966	9	0	1 4	3 0	2 1	7	0	2	9	2 4	4 0	2 4	15
1967	8	2 9	2 3	1 9	2 0	5	0	0	1 1	1 5	2 6	1 7	14,4
1968	1 7	1 8	2 7	2 9	2 1	6	1	1 1	1 7	3 0	1 7	3 3	19
1969	4 0	1 4	1 8	1 1	5	7	9	1 9	1 1	5	2 2	2 1	15
1970	3 5	2 6	2 9	2 6	1 4	1 1	6	0	1 1	1 7	8	1 1	16,1
1971	2 2	1 5	2 1	1 5	2 6	0	5	6	1 3	5	3	3	11,2
1972	2 7	2 5	1 7	2 0	1 1	2	1 5	2 5	1 3	7	1 4	1 1	15,6
1973	1 8	6	1 3	1 5	5	3	1	1 2	1 8	1 3	4	5	9,4
1974	2 4	3 4	4 8	2 1	5	1	5	1 1	3 2	5 0	1 9	9	21,6
1975	7	2 1	1 3	1 6	6	4	2	7	7	2 9	2 0	2 0	13,5
1976	3	1 1	2 9	1 3	3	0	1	0	3	1 4	3 3	2 3	11,1
1977	3 3	1 9	7	1 3	1 2	4	3	6	6	8	3	2	9,7
1978	9	3 0	1 1	4 0	1 4	1	9	4	1 3	6	3	4	12
1979	1 6	1 4	1 3	1 8	5 0	6	0	1 1	1 6	7	3 9	4	16,2
1980	1 8	1 3	3 3	2	8	7	9	3	9	2 3	4	9	11,5
1981	3 7	2 1	1 0	6	8	0	7	0	1 3	3 3	7	3 0	14,3

1982	5	5	2 7	1 3	2 2	9	4	0	7	1 7	1 2	7	10,7
1983	4	9	1 0	0	1 7	0	0	2	5	8	8	1 4	6,4
1984	2 3	5 3	3 6	1 5	2 0	5	0	0	9	4	8	3 0	17
1985	1 5	0	1 6	1 7	1 3	0	2	1 1	2	1 4	1 4	6	9,2
1986	9	2 9	2 7	1 7	1	0	0	9	0	1	1	1 5	9
1987	1 8	1 5	1 4	1 1	7	0	1	6	1	4 8	2 0	3	12
1988	3	2 0	1 8	9	6	0	0	4	1 4	3 5	6	3	9,8
1989	0	0	1 2	6	1	2	1	6	1 0	9	3 1	3	6,7
1990	6	3	1	9	1 9	5	0	0	1 1	1 4	2	2 4	7,8

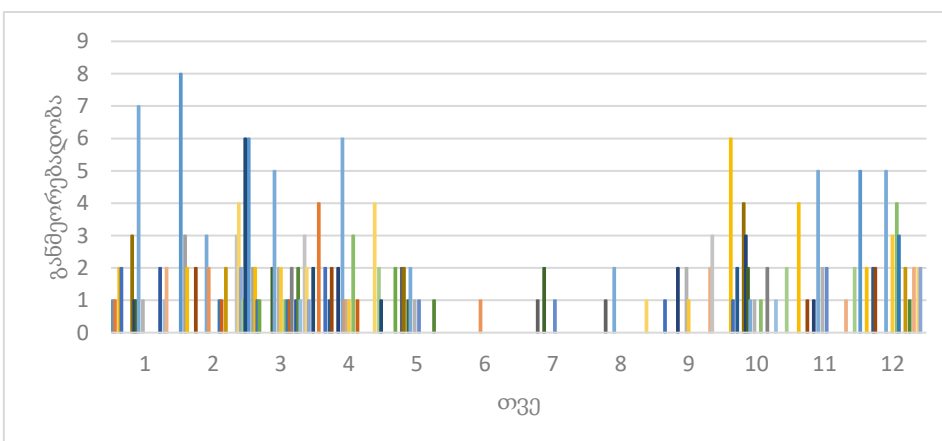
თვალსაჩინოებისათვის ცხრილში მოცემული მონაცემები წარმოდგენილია ნახ. 2.4.1-ზე. როგორც ნახ.2.4.1-დან ჩანს ქარის სიჩქარეთა განმეორებადობა ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ ინტერვალისათვის მნიშვნელოვნად იცვლება სეზონების მიხედვით, ყველაზე მეტი განმეორებადობა სიჩქარის ამ ინტერვალს აქვს გაზაფხულსა და შემოდგომაზე, ხოლო ყველაზე მცირე განმეორებადობა გვხვდება ზაფხულში. ნახ.2.4.2-ზე წარმოდგენილია ქარის სიჩქარეთა განმეორებადობა ქარის სიჩქარის 20-25 მ/წმ ინტერვალისთვის. ნახ.2.4.2-დან ჩანს ამ ინტერვალის ქარის სიჩქარის განმეორებათა მინიმალურია მხოლოდ ზაფხულის სეზონისთვის. ზაფხულში იშვიათად გვხვდება 20-25 მ/წმ ინტერვალის ქარი. ანლოგიურად ნახ.2.4.3-ზე წარმოდგენილია ქარის სიჩქარის >25 (მ/წმ) გრადაციების განმეორებადობათა რიცხვი თვეების მიხედვით (1984-2014 წ.წ), ნახ.2.4.3-დან შეგვიძლია ვთქვათ, რომ განმეორებათა რიცხვის განაწილება სეზონების მიხედვით წინა ორი ინტერვალის ანალოგიურია, გამონაკლისია მხოლოდ ის რომ ამ შემთხვევაში ძლიერი ქარების სიხშირე შედარებით დაბალია.



სურ.2.4.1. ქარის სიჩქარის აბსოლუტურ მნიშვნელობათა 16-20 (მ/წმ) გრადაციების განმეორებადობათა რიცხვი თვეებისა და წლების მიხედვით.

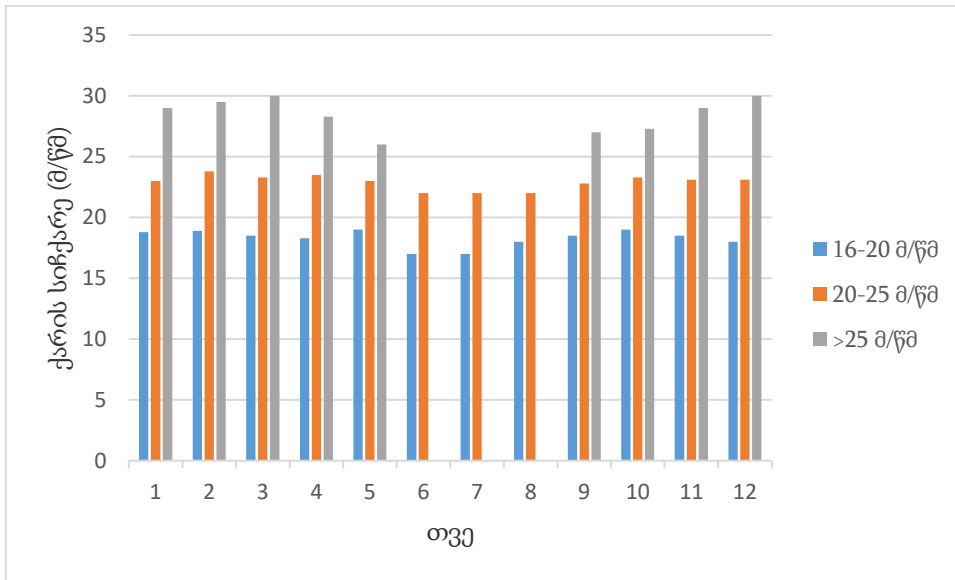


ნახ.2.4.2. ქარის სიჩქარის აბსოლუტურ მნიშვნელობათა 20-25 (მ/წმ) გრადაციების განმეორებადობათა რიცხვი თვეებისა და წლების მიხედვით (1984-2014 წ.წ.).



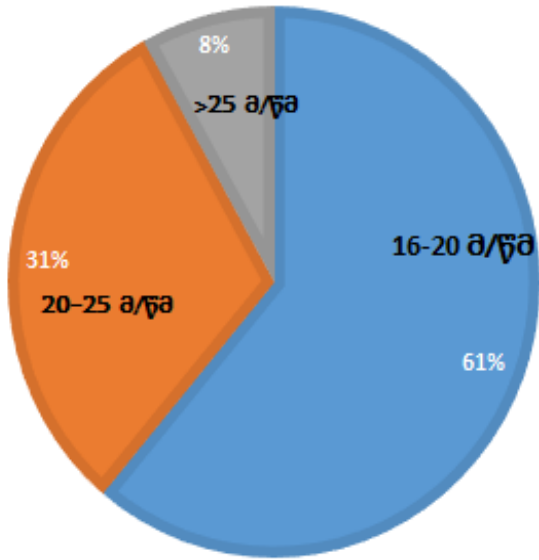
ნახ.2.4.3. ქარის სიჩქარის აბსოლუტურ მნიშვნელობათა >25 (მ/წმ) გრადაციების განმეორებადობათა რიცხვი თვეების მიხედვით (1984-2014 წ.წ.).

ნახ. 2.4.4-ზე წარმოდგენილია ქუთაისის რეგიონისთვის ქარის სიჩქარეთა აბსოლუტურ მნიშვნელობების ინტერვალური განაწილება თვეების მიხედვით (1990-2021 წ.წ), როგორც ნახ. 2.4.4-დან ჩანს ყველა სეზონის განმავლობაში ფიქსირდება 16-20 მ/წმ და 20-25 მ/წმ ინტერვალების ქარი. ხოლო ძალიან ძლიერი ქარის მნიშვნელობები (>25 მ/წმ) ზაფხულის სეზონზე არ გვხვდება. უნდა აღინიშნოს აგრეთვე ისიც, რომ ზაფხულში 16-20 მ/წმ და 20-25 მ/წმ ინტერვალების ქარის მნიშვნელობები მინიმალურია დანარჩენი სეზონების ქარის მნიშვნელობებთან შედარებით.



ნახ. 2.4.4. ქუთაისის რეგიონისთვის ქარის სიჩქარეთა აბსოლუტური მნიშვნელობების ინტერვალური განაწილება თვეების მიხედვით (1990-2021 წ.წ).

ნახ. 2.4.5-ზე წარმოდგენილია 1990-2021 წ.წ ქუთაისის რეგიონისთვის ქარის სიჩქარეთა აბსოლუტური მნიშვნელობების გრადაციების განმეორებადობის პროცენტული განაწილება. როგორც ნახ. 2.4.5-დან ჩანს მოცემული წლებისთვის ქარის სიჩქარის განმეორებათა რიცხვი 16-20 მ/წმ შუალედში გაცილებით მაღალია (61%), ვიდრე დანარჩენი ორი ინტერვალისთვის (20-25 მ/წმ - 30%, >25 მ/წმ- 8 %).



ნახ. 2.4.5. ქუთაისის რეგიონისთვის ქარის სიჩქარეთა აბსოლუტური მნიშვნელობების ინტერვალური განმეორებადობის პროცენტული განაწილება (1990-2021 წ.წ).

როგორც აღვნიშნეთ ქარის გენერატორის ასამუშაველად საკმარისია 3 მ/წმ ქარის სიჩქარის მნიშვნელობა, ამიტომ მნიშვნელოვანია თვეების მიხედვით ქარის საშუალო სიჩქარის განაწილების ცოდნა. ცხრ. 2.4.2 -ზე წარმოდგენილია ქარის საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობები თვეების მიხედვით 1990-2021 წლებისათვის. რადგან აქ გვაქვს არა მყისიერი სიჩქარე , არამედ საშუალო მნიშვნელობები, ამიტომ ყურადღება გავამახვილეთ 5 მ/წმ -ზე მეტი ქარის სიჩქარეებზე. ცხრილში გამუქებულია ქარის სიჩქარის ის მნიშვნელობები რომელთა სიდიდე აღემატება ან ტოლია 5 მ/წმ -ის.

როგორც ცხრ.2.4.2-დან ჩანს, რომ ქარის სიჩქარეთა საშუალო მნიშვნელობები 5 მ/წმ-ის ზემოთ იშვიათია ზაფხულის სეზონისთვის, ხოლო დანარჩენი სამი სეზონის განმავლობაში ქარის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობები უმეტესად 5 მ/წმ-ზე მეტია.

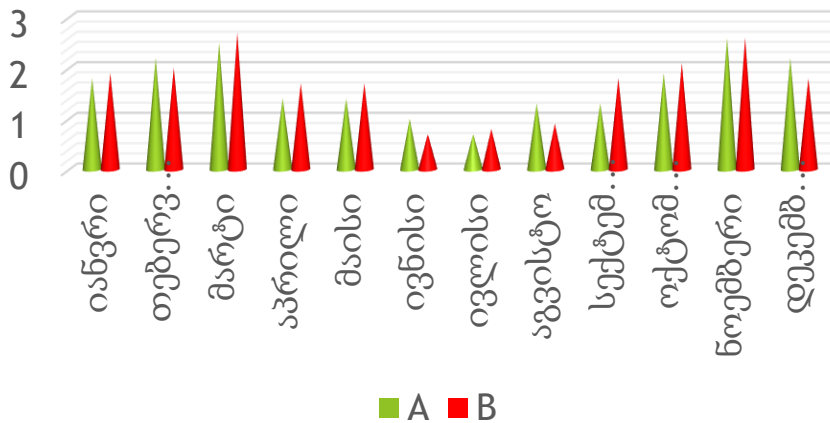
ცხრ.2.4.2. ქარის სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობების განაწილება თვეების მიხედვით 1990-2021 წ.წ.

თვეები/წლები	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1990	3.3	5	3.8	5.3	5	3.9	2.5	2.7	4.6	5.4	4.2	6.4
1991	4.4	6.7	6.6	6.2	5.8	3.9	3	2.6	3.4	5.7	6.1	5.1
1992	3.3	4.1	5.1	5.2	5.4	4.4	4.8	4.7	4.6	5.5	5.3	5.2

1993	6	5.4	6.2	5.7	6.3	4.4	4	3.5	4.5	6.6	6.7	5.7
1994	6.4	5.6	5.3	6.4	4.9	4.8	5	4	8.8	8.5	3.9	4.5
1995	5.6	4.3	7	4.9	4.9	3.7	3.9	3.2	4.3	5.1	4.4	5.7
1996	8.9	7.8	8.6	7.6	5.7	3.5	4.1	4.9	4.4	5.0	7.5	8.0
1997	4.2	3.9	3.7	5.4	4.1	3.8	3.7	3.4	4.1	3.3	5.4	4.9
1998	5.9	4.3	6.3	4.8	5.9	3.5	3.6	3.7	6.2	5.4	6.3	4.9
1999	4.3	5.9	6.0	5.4	4.2	4.4	4.3	2.4	3.6	3.7	4.9	6.0
2000	3.6	3.7	4.6	4.5	4.0	3.9	4.0	3.3	3.6	5.8	6.4	3.5
2001	5.0	4.9	5.3	5.1	3.3	3.8	3.9	5.4	5.6	4.4	4.9	7.4
2002	3.5	4.6	5.3	4.5	4.2	3.3	4.3	3.8	3.7	4.5	4.8	6.6
2003	5.8	5.1	5.0	7.5	4.5	3.5	3.0	2.5	4.2	3.0	4.9	5.6
2004	5.7	2.9	4.6	5.7	3.3	3.6	2.9	2.7	2.8	5.4	4.8	3.1
2005	4.9	7.3	4.4	4.4	4.5	3.0	2.9	2.7	2.5	3.6	4.0	5.6
2006	6.3	4.1	5.7	4.3	3.9	4.0	2.8	2.9	3.9	2.1	4.1	2.8
2007	3.5	4.9	5.4	3.2	7.4	3.8	3.4	4.5	3.3	5.4	4.2	5.2
2008	6.4	4.9	5.1	4.3	3.0	3.4	3.1	3.7	3.7	5.2	5.5	5.8
2009	5.7	5.8	4.7	4.7	3.4	5.6	2.8	2.6	3.7	5.1	5.6	6.1
2010	6.5	8.3	6.2	5.2	3.5	4.3	3.0	3.9	4.9	3.7	4.2	4.6
2011	4.3	6.6	4.5	6.4	3.8	2.7	2.8	4.5	3.1	3.5	3.1	5.8
2012	5.5	5.9	3.9	3.9	3.1	4.1	4.2	2.5	3.9	5.0	5.1	7.2
2013	4.4	6.4	6.1	5.4	5.1	3.5	2.3	3.0	2.5	4.4	5.3	4.3
2014	3.8	7.6	5.8	4.2	3.5	3.6	3.8	3.8	3.8	5.4	6.5	5.2
2015	5.0	5.4	5.9	4.0	3.5	3.5	3.1	3.8	5.7	3.7	3.5	2.7
2016	4.8	4.8	4.6	4.5	3.0	2.7	2.8	2.3	1.8	5.6	6.5	3.4
2017	3.7	3.4	5.7	5.4	2.8	3.0	2.7	3.3	3.6	3.3	4.0	5.1
2018	4.0	5.1	5.0	5.3	3.5	2.7	2.2	3.4	2.9	4.5	4.9	4.5
2019	4.0	3.6	3.3	2.9	3.1	3.0	2.0	2.7	3.7	2.5	7.5	3.8
2020	3.5	4.5	5.0	3.9	3.3	3.7	2.8	2.9	4.2	6.0	3.9	7.2
2021	4.5	2.8	4.1	3.0	3.3	2.5	2.5	2.6	1.8	4.7		

როგორც ზემოთ ავლინებით, ქარის ველის სტატისტიკური დახასიათებისათვის შემოღებულია დინამიკური (B) და თერმული მდგრადობის (A) კოეფიციენტები, ჩვენ გამოვთვალეთ მათი საშუალო მნიშვნელობები წლების განმავლობაში. 1984-2014 წლებისათვის როცა ქარის სიჩქარე 16-20 მ/წმ-ის შუალედშია დინამიკური და თერმული მდგრადობის კოეფიციენტების საშუალო მნიშვნელობებიც სეზონების მიხედვით განიცდის ცვლილებას (ნახ.2.4.6). რაც ბუნებრივია, რადგან ქარის სიჩქარის ცვლილება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ტემპერატურის ცვლილებასთან. როგორც ცნობილია ქარის სიჩქარის დღეღამურ სვლაში მაქსიმუმი შუადღეს მყარდება. ამის მიზეზია თერმული არამდგრადობა, რის გამოც ძლიერდება ვერტიკალური

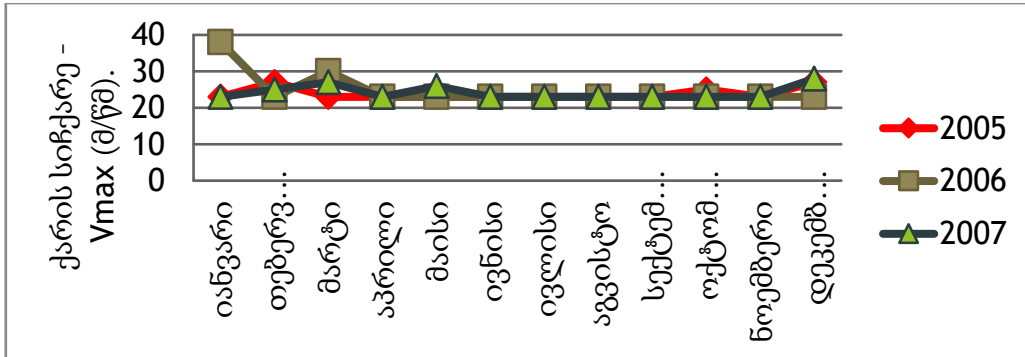
ტურბულენტური ცვლა, და ურთიერთქმედება ატმოსფეროს ქვედა და ზედა ფენებს შორის. ატმოსფეროს ქვედა ფენებში მატულობს ზედა ფენებიდან სწრაფად მოძრავი ნაწილაკების ნაკადი, ხოლო ზედა ფენებში კი მატულობს ისეთი ნაწილაკების ნაკადი, რომელთაც ჰორიზონტალური მოძრაობის ნაკლები სიჩქარე გააჩნია. წლის თბილი პერიოდის განმავლობაში ქარის სიჩქარის მაქსიმუმი გადაინაცვლებს დღის მეორე ნახევარში (ელიზბარაშვილი ე., 2007).



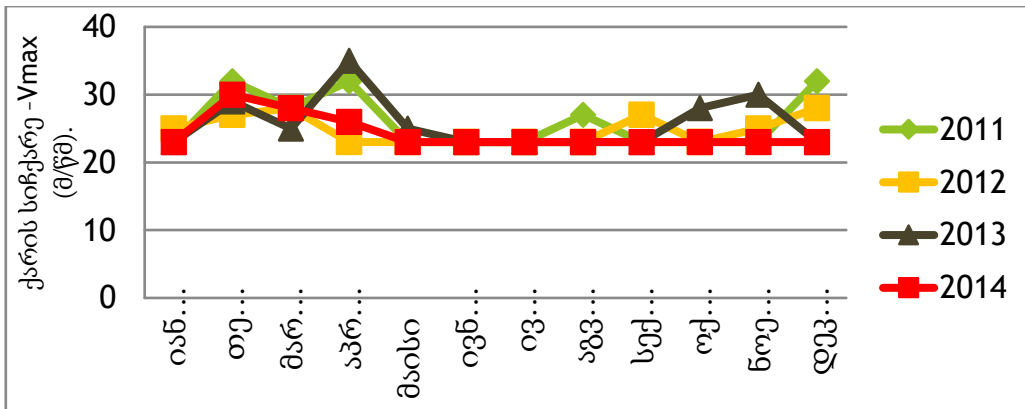
ნახ. 2.4.6. A და B კოეფიციენტების საშუალო მნიშვნელობების განაწილება თვეების მიხედვით (ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ -სათვის).

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ნახ.2.4.6-ზე წარმოდგენილია A და B კოეფიციენტების საშუალო მნიშვნელობების განაწილება თვეების მიხედვით ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ -სათვის. როგორც სურათიდან ჩანს კოეფიციენტების ცვლილება თვეების მიხედვით ქარის სიჩქარის ცვლილების მსგავსია, სიჩქარეების მაქსიმუმი როგორც აღვნიშნეთ სეზონების მიხედვით გვხვდება გაზაფხულსა და შემოდგომის ბოლოს, ანალოგიურად იცვლება სეზონების მიხედვით A და B კოეფიციენტების მნიშვნელობაც. როგორც ცნობილია ძირითადი ფრონტალური პროცესები საქართველოს ტერიტორიაზე დაიკვირვება გაზაფხულსა და შემოდგომაზე, რაც დაკავშირებულია თერმულ არამდგრადობასთან, დროის გარკვეულ შუალედში აღებული მაქსიმალური და მინიმალურ ტემპერატურათა დიდი სხვაობა იწვევს თერმულ არამდგრადობას, რაც უშუალოდ განსაზღვრავს წნევის ცვლილების ხასიათს რის შედეგადაც სეზონების მიხედვით ყალიბდება ჰაერის მასების გადაადგილების ტენდენცია.

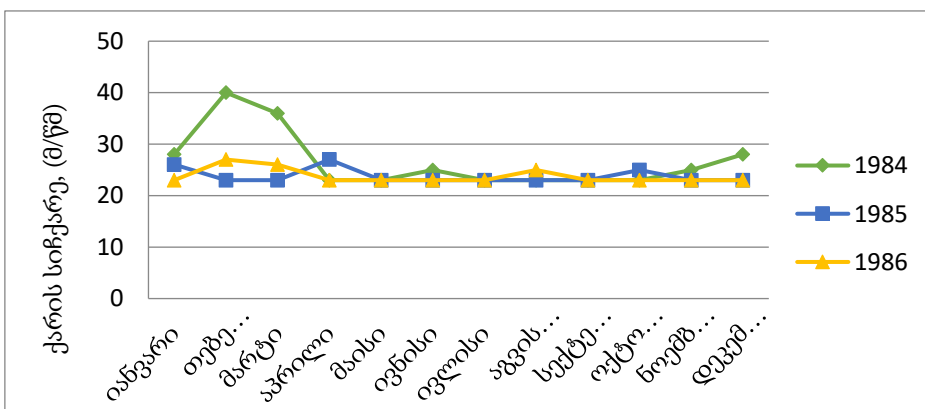
ნახ. 2.4.7-2.4.11-ზე წარმოდგენილია ქარის მაქსიმალური სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით ზოგიერთი წლისათვის. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ თვეების მიხედვით ქარის მაქსიმალური მნიშვნელობები დაფიქსირებულია თებერვალ-მარტში, ხოლო მინიმალური ივლისში (ნახ. 2.4.7-2.4.11).



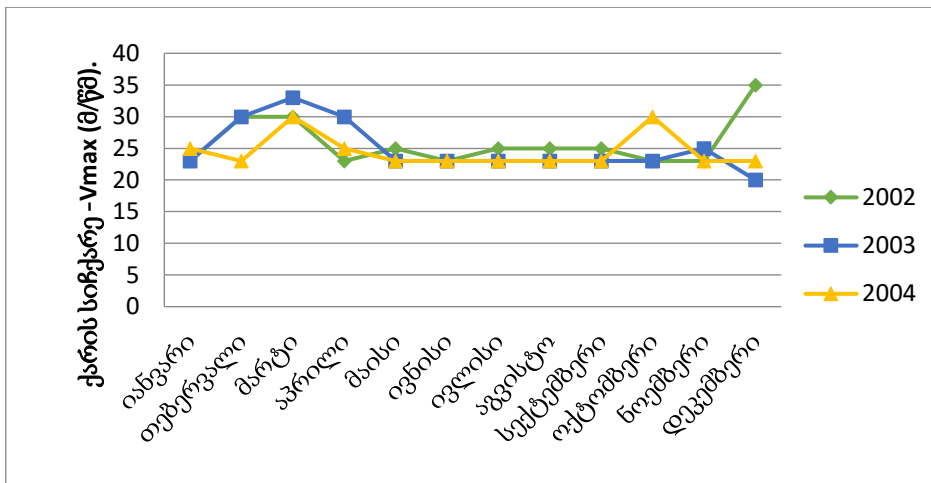
ნახ. 2.4.7. ქარის სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით ქუთაისის რეგიონისათვის.



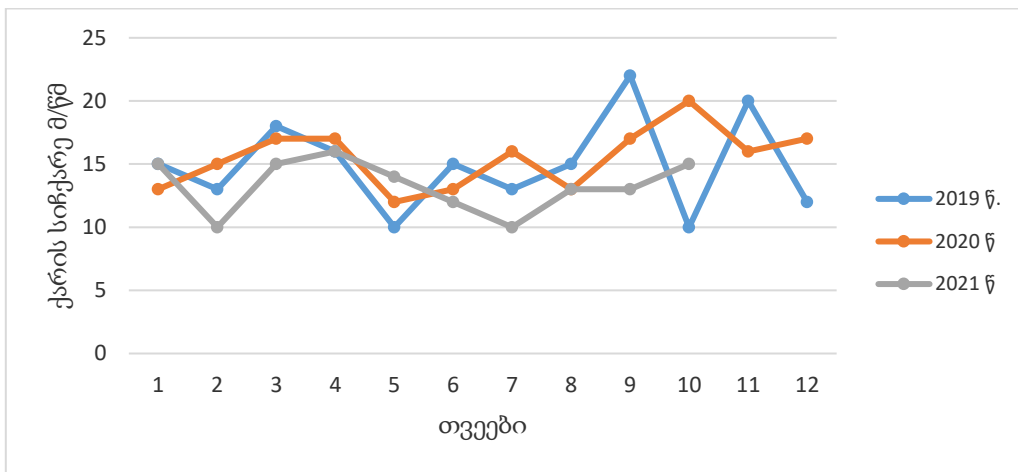
ნახ. 2.4.8. ქარის სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით ქუთაისის რეგიონისათვის.



ნახ. 2.4.9 ქარის სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით 1984-1986 წ.წ. ქუთაისის რეგიონისათვის.



ნახ. 2.4.10 ქარის სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით 1984-1986 წ.წ. ქუთაისის რეგიონისათვის ($V > 25$ მ/წმ).



ნახ. 2.4.11 ქარის სიჩქარეების განაწილება თვეების მიხედვით ქუთაისის რეგიონისათვის.

როგორც კვლევამ აჩვენა ყველაზე მეტი განმეორებადობა გვაქვს ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედში, ყველაზე მცირე კი 25 მ/წმ-ზე მეტი სიჩქარის შემთხვევაში. თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ სამივე შუალედის შემთხვევაში ქარის სიჩქარის სეზონური ცვლილება თითქმის ერთნაირია. განმეორებათა რიცხვის მაქსიმუმი გვხვდება ზამთრის ბოლოს და გაზაფხულის დასაწყისში, ასევე შემოდგომის ბოლოს ზამთრის დასაწყისში. წარმოდგენილი კვლევის თანახმად ანალოგიურად იცვლება სეზონების მიხედვით თერმული და დინამიკური მდგრადობის კოეფიციენტებიც. აღსანიშნავია, რომ თერმული პარამეტრი მნიშვნელოვნად არის დაკავშირებული დინამიკურ პარამეტრთან, რადგან დროის გარკვეულ შუალედში ტემპერატურათა ცვლილება მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ქარის სიჩქარის ცვლილების ტენდენციას.

ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია აგრეთვე ქარის სიჩქარის ხანგრძლივობაც, თუმცა ეს პარამეტრი გარკვეულწილად დაკავშირებულია განმეორებადობასთანაც, ამიტომ შესაძლებელია ვთქვათ, რომ ენერგეტიკული თვალსაზრისით ქუთაისის რეგიონისთვის ძირითადი წამყვანი ქარის სიჩქარის შუალედი 16-20 მ/წმ. უნდა აღინიშნოს აგრეთვე ისიც, რომ ზაფხულში 20-25 მ/წმ ინტერვალების ქარის მნიშვნელობები მინიმალურია დანარჩენი სეზონების ქარის მნიშვნელობებთან შედარებით, მაგრამ ენერგეტიკული თვალსაზრისით ეს არ არის მნიშვნელოვანი, რადგანაც ენერჯის მოხმარება მინიმალურია. ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედი უზრუნველყოფს ქარის ენერჯის გამოყენების მაქსიმალურ ეფექტურობას. ამგვარად, ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია ასეთი სიდიდის სიჩქარეები, რომლებიც უზრუნველყოფს ქარის ენერგეტიკული დანადგარის ავტომატურ რეჟიმს და წარმოადგენს ქარის ელექტროსადგურების გავითარებისთვის მნიშვნელოვან საფუძველს დასავლეთ საქართველოში.

2.5. მეორე თავის დასკვნა

ატმოსფერული ჰაერის დინამიკა იზოლირებული დაბრკოლებისა და სამხრეთ კავკასიის რეალურ რელიეფის შემთხვაში, არასტაციონარული ფართომასშტაბიანი ფონური პროცესების არსებობის პირობებში შესწავლილია სამგანზომილებიანი ჰიდროსტატიკური მეზომასტაბური მოდელის საფუძველზე. რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ ოროგრაფიულ თავისებურებათა გავლენა, ტროპოსფეროში მნიშვნელოვნად გარდაქმნის არამდგრად ფონურ ნაკადს. კერძოდ, სინოპტიკური მასშტაბის ატმოსფერული ჰაერის მოძრაობის დროს მნიშვნელოვნად იზრდება მეზომასტაბური ნაკადის ამპლიტუდები ვერტიკალური მიმართულებით და მათი საშუალო მნიშვნელობიდან სიჩქარის გადახრის მნიშვნელობები (ქარის სიჩქარის მაქსიმალურმა სიდიდემ მიაღწია 26 მ/წმ-ს, როდესაც შეუშფოთებელი ფონის ჰაერის ნაკადის სიჩქარე იყო 12 მ/წმ). გარდა ამისა, ნაჩვენები იქნა, რომ ფონური დინების არარსებობის შემთხვევაშიც, ატმოსფერული ქარის სიდიდემ შეიძლება მნიშვნელოვნად მოიმატოს რთული ოროგრაფიის პირობებში. გარდა ამისა,

განგარიშების შედეგებმა აჩვენა, რომ კავკასიონის ქედმა მნიშვნელოვნად გაზარდა ტროპოსფეროში ატმოსფერული დინებათა ამპლიტუდები და გააჩინა მორევის ტიპის სტრუქტურები მცირე ფონური დინების შემთხვევაშიც. ეს შედეგები პირველად იქნა მიღებული რიცხვითი მოდელირებით და ეთანხმება მეტეოროლოგიურ დაკვირვებათა მონაცემებს. შესწავლილ იქნა ატმოსფერულ ნაკადთა სიძლიერე და განმეორადობის მახასიათებელი პარამეტრები, ენერგეტიკული თვალსაზრისით, ქუთაისის მაგალითზე. როგორც კვლევამ აჩვენა ყველაზე მეტი განმეორებადობა გვაქვს ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედში, ყველაზე მცირე კი 25 მ/წმ-ზე მეტი სიჩქარის შემთხვევაში. თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ მათთვის ქარის სიჩქარის სეზონური ცვლილება თითქმის ერთნაირი იყო. განმეორებათა რიცხვის მაქსიმუმი აღინიშნებოდა ზამთრის ბოლოს და გაზაფხულის დასაწყისში, ასევე შემოდგომის ბოლოს და ზამთრის დასაწყისში. წარმოდგენილი კვლევის თანახმად ანალოგიურად იცვლებოდა სეზონების მიხედვით თერმული და დინამიკური მდგრადობის პარამეტრებიც, აღსანიშნავია, რომ თერმული პარამეტრი მნიშვნელოვნად არის დაკავშირებული დინამიკურთან რადგან დროის გარკვეულ შუალედში ტემპერატურათა ცვლილება მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ქარის სიჩქარის ცვლილების ტენდენციას. ენერგეტიკული თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია აგრეთვე ქარის სიჩქარის ხანგრძლივობაც, თუმცა ეს პარამეტრი გარკვეულწილად დაკავშირებულია განმეორებადობასთანაც, ამიტომ შესაძლებელია ვთქვათ, რომ ქუთაისის რეგიონისთვის ძირითადი წამყვანი ქარის სიჩქარის შუალედია 16-20 მ/წმ რაც ძალიან მნიშვნელოვანია ენერგეტიკული თვალსაზრისით. ასევე აღსანიშნავია, რომ 20-25 მ/წმ ინტერვალის ქარის მნიშვნელობები მინიმალურია ზაფხულში დანარჩენ სეზონებთან შედარებით, თუმცა ენერგეტიკული თვალსაზრისით ეს არ არის მნიშვნელოვანი, რადგანაც ენერჯის მოხმარება ამ პერიოდში მინიმალურია. ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედი უზრუნველყოფს ქარის ენერჯის გამოყენების მაქსიმალურ ეფექტურობას და ასეთი სიდიდის ქარის სიჩქარეები უზრუნველყოფენ ქარის ენერგეტიკული დანადგარის გამართულ ავტომატურ რეჟიმს რაც წარმოადგენს ქარის ელექროსადგურების გავითარებისთვის მნიშვნელოვან საფუძველს დასავლეთ საქართველოს რეგიონისთვის.

თავი 3. რთული ოროგრაფიის პირობებში ლოკალური კონვექციური პროცესების შესწავლა WRF მოდელითა და Ready სისტემის გამოყენებით.

3.1 WRF მოდელის მონაცემები და მეთოდოლოგია.

რეგიონალური კლიმატური ფორმირებები რთული ოროგრაფიის ტერიტორიაზე განპირობებულია გრძელმასშტაბიანი სინოპტიკური და ლოკალური ატმოსფერული პროცესების ერთობლივი მოქმედებით, სადაც ძირითადად გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს რთული ოროგრაფიის სტრუქტურას. კავკასიის ტერიტორია და განსაკუთრებით საქართველო არის ამის კარგი მაგალითი, სადაც ოროგრაფიული არაერთგვაროვნება თამაშობს მნიშვნელოვან როლს მეტეოროლოგიური სიდიდეების დროსა და სივრცეში განაწილებაზე (საქართველოს ტერიტორიის 85% არის მთაგორიანი). როგორც ცნობილია, გლობალური ამინდის საპროგნოზო მოდელებით შეიძლება ვიწინასწარმეტყველოთ ფართომასშტაბიანი ატმოსფერული პროცესები, მაგრამ არ არის საკმარისი მეზომასშტაბური პროცესების პროგნოზირებისთვის, რაც ძირითადად დაკავშირებულია რეგიონის რთულ რელიეფთან და ზედაპირული საფარის არაერთგვაროვნებასთან. მცირემასშტაბიანი ატმოსფერული პროცესების მოდელირებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ ადგილობრივი რელიეფის ძირითადი მახასიათებლები, ზედაპირის არაერთგვაროვნება და მათი გავლენა გრძელ ან მოკლევადიან ატმოსფერულ პროცესებზე. ბოლო წლებში ფართოდ გამოიყენება ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების მოდელები (WRF) მოკლე და საშუალო მასშტაბის ამინდის წინასწარმეტყველებისათვის (Skamarock et al., 2005). WRF მოდელის 3.6 ვერსია წარმოადგენს კარგ საშუალებას რეგიონალური და მეზომასშტაბური ატმოსფერული პროცესების შესწავლისათვის, როგორცაა, რეგიონალური კლიმატი, ექსტრემალური ნალექები, სეტყვა, ოროგრაფიის გავლენა მეზომასშტაბურ ატმოსფერულ პროცესებზე (Skamarock et al., 2005). ზოგადად WRF მოდელი არის რიცხვითი მეთოდებით ამინდის პროგნოზირებისა და მოდელური ატმოსფეროს სიმულირების სისტემა, რომელიც შექმნილია როგორც კვლევითი, ასევე ოპრეტიული გამოყენებისათვის. WRF მოდელი დამუშავებულია: აშშ ატმოსფეროს კვლევის

ეროვნული ცენტრის (NCAR) მეზომასშტაბური და მიკრომასშტაბური მეტეოროლოგიის განყოფილებაში (MMM), ოკეანისა და ატმოსფეროს ადმინისტრირების (NOAA) ცენტრებში გარემოს პროგნოზირებისათვის (NCEP) და დედამიწის სიტემის კვლევის ლაბორატორიაში (ESRL), სამხედრო-საჰაერო თავდაცვის დეპარტამენტის ამინდის სააგენტოში (AFWA) და საზღვაო-სამხედრო აკადემიის კვლევით ლაბორატორიაში (NRL), შტორმების ანალიზისა და პროგნოზირების ცენტრში (CAPS), ავიაციის ფედერალურ ადმინისტრაციაში (FAA) და მსოფლიოს სხვადასხვა უნივერსიტეტების მეცნიერთა მონაწილეობით.

უნდა აღინიშნოს, რომ ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების და პერსპექტიული კვლევების მოდელი (WRF-ARW) არის ისეთი კვლევის ინსტრუმენტი, რომელიც გვთავაზობს ატმოსფეროს ფიზიკის პარამეტრიზირებულ სქემათა მრავალრიცხოვან ვარიანტებს, რომლებიც შეიძლება შერწყმული იყოს ერთმანეთთან მრავალი ხერხით (Orlando, 2014; Segele et al., 2013; Silva et al., 2010; Yair et al., 2010; Kain et al., 2004; Gilliland & Rowe, 2007; Wang & Seaman, 1997). მართლაც, WRF-ARW მოდელში ფიზიკის ძირითადი კატეგორიების პარამეტრიზაცია (მიკროფიზიკა, ღრუბლების პარამეტრიზაცია, პლანეტარული სასაზღვრო ფენის ფიზიკა, ატმოსფერული რადიაციის ფიზიკა) ორმხრივად არის დაკავშირებული WRF-ARW მოდელის მეშვეობით ძირითად მეტეოროლოგიურ ცვლადებთან (პოტენციური ტემპერატურა, ტენიანობა, ქარი და ა.შ.) და მათი ცვლილების ტენდენციებთან (Skamarock et al., 2005; Orlando, 2014; Segele et al., 2013; Silva et al., 2010).

კავკასიის რთულ ოროგრაფიულ პირობებში, ოპტიმალური საპროგნოზო რეგიონალური მოდელის შერჩევის მიზნით, ჩვენს მიერ რიცხვითი თვლის შედეგებით გამოცდილ და შესწავლილ იქნა WRF-NMM ოპერატიული მოდელის (კავკასიის რთული ოროგრაფიის გათვალისწინებით) შემდეგი ფიზიკური სქემები: ბეტს-მილერ-ჯენიჩის „გროვა ღრუბლების“ ღრმა და არაღრმა კონვექსიის მარეგულირებელი პარამეტრიზაციის სქემა (Janjić, 1994), მიკროფიზიკური სქემა–ფერიეს ახალი სქემა: რაგიონალური სქემა პროგნოსტიკული შერეული ფაზის პროცესებისათვის.

სასაზღვრო ფენის სქემა–მელორ-იამადა-ჯენიკის სქემა: ერთ-განზომილებიანი პროგნოსტიკული ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯის სქემა ლოკალური ვერტიკალური შერევით (Janjić, 1994; 2000).

დედამიწის ზედაპირის ფიზიკა – NMM-ის ხმელეთის ზედაპირის მოდელი (LSM): ეფუძნება 2005 წლის მაისის NOAA-ის ხმელეთის ზედაპირის მოდელს 4-ფენიანი ნიადაგის ტემპერატურითა და სინოტივით, ფრაგმენტული თოვლის საფარითა და ნიადაგის წყინვის ფიზიკით.

ზედაპირის ფენების ფიზიკა – ჯენიკის მსგავსების სქემა: ეფუძნება მონინ-ობუხოვის სქემას ზილიტინკევიჩის თერმული არაერთგვაროვნების სიგრძისა და მსგავსების სტანდარტული ფუნქციების გამოყენებით (Janjić, 2000).

გრძელტალღიანი რადიაციის ფიზიკა – GFDL მოდელის გრძელტალღიანი რადიაციის სქემა: მოიცავს ღრუბლების მიკროფიზიკასაც.

მოკლეტალღიანი რადიაციის ფიზიკა – GFDL მოდელის მოკლეტალღიანი რადიაციის სქემა: ორი სპექტრული, k-განაწილების სქემა, განიხილავს ოზონსა და წყლის ორთქლს, როგორც ძირითად მშთანთქმელ აირებს. მოიცავს ღრუბლების მიკროფიზიკასაც.

კვლევითი მოდელისათვის (WRF-ARW) გამოცდილი იქნა შემდეგი ფიზიკური სქემები:

„გროვა ღრუბლების“ პარამეტრიზაცია–კეინ ფრიჩის ახალი სქემა NAM მოდელიდან: აღნიშნული სქემა აღწერს ღრმა და არაღრმა კონვექციურ პროცესებს დაღმავალი მასური ნაკადების მიდგომით (Kain, 2004; 1992; 1993).

მიკროფიზიკური სქემა – ლინისა და სხვ. სქემა: ამ პროცესების აღსაწერად მოდელში გამოყენებულია მე-5 კლასის სიმულაციური სქემა, რომელიც ითვალისწინებს თოვლისა და ყინულის არსებობას და მოსახერხებელია რეალური მონაცემების მაღალი გარჩევისუნარიანობით (5 კმ-ზე ნაკლები) ამოხსნისას (Lin, 1983).

სასაზღვრო ფენის სქემა – იონსის უნივერსიტეტის სქემა: არალოკალური K-სქემა, არაცხადი გადატანითი ფენითა და არასტაბილურ შერეულ სქემაში K-პარაბოლური პროფილით (Skamarock et.al., 2005).

დედამიწის ზედაპირის ფიზიკა – NOAA-ს ხმელეთის ზედაპირის მოდელი: უნიფიცირებული NCEP/NCAR/AFWA-ს სქემა 4-ფენიანი ნიადაგის ტემპერატურისა და სინოტივის, ფრაგმენტული თოვლის საფარისა და ნიადაგის წაყინვის ფიზიკის გამოყენებით.

ზედაპირის ფენების ფიზიკა –მეზომასშტაბური მოდელის (MM5) მსგავსების სქემა: ეფუძნება მონინ-ობუხოვის სქემას კარლსონ-ბოლანდის ვისკოზური ქვე-ფენისა და მსგავსების სტანდარტულ ფუნქციებს (Skamarock et.al., 2005).

გრძელტალღიანი რადიაციის ფიზიკა – რადიაციის სწრაფი გადატანის (RRTM) სქემა: დაზუსტებული სქემა, ითვალისწინებს რთულ ნარევებს, მცირე გაზურ მინარევებს და ნაწილაკების მიკროფიზიკას, ასევე, ღრუბლებთან ურთიერთქმედებას.

მოკლეტალღიანი რადიაციის ფიზიკა – დუდიას სქემა: მარტივი დაღმავალი ინტეგრირების სქემა, რომელიც ითვალისწინებს ღრუბლებისა და მოწმენდილი ცის მიერ შთანთქმისა და გაბნევის პროცესებს, არ ითვალისწინებს აეროზოლებს.

იმის გათვალისწინებით, რომ ისეთი პარამეტრების შერჩევა, რომელთა კომბინაციაც ყველაზე კარგად აღწერს შესასწავლ რეგიონში დომინანტულ მეტეოროლოგიურ მოვლენებს ხშირად არ არის ადვილი. მრავალი შრომა მიემდგვნა ამ პრობლემის გადაწყვეტას, რაც გულისხმობს იმას, რომ WRF მოდელში შეირჩეს პარამეტრების საუკეთესო კომბინაცია, რომელიც ყველაზე კარგად წარმოაჩენს საკვლევი რეგიონის ატმოსფერული პროცესების ტიპსა და სიძლიერეს (Orlando, 2014; Segele et al., 2013; Silva et al., 2010; Yair, 2010; Kain, 2004; Gilliland, 2007; Wang, 1997; Ma, 2009; Hong, 2004; Ferrier, 2020; Lin et al., 1983; Janjić, 1994; 2000; Kain, 1992; 1993; Grell & Dévényi, 2002; Duda, 2011; Davitashvili et al., 2011). მაგალითად, როგორც კვლევამ აჩვენა მიკროფიზიკური პარამეტრიზაციის სქემების სამი ძირითადი კომბინაცია (WRF- მე-3 კლასის მარტივი სქემა (WSM3) (Hong, 2004), ეტა ფერიერის სქემა (Ferrier, 2020), პუნდუე ლინის სქემა (Lin et al., 1983) და ღრუბლების 3 სქემა: კაინ ფრიჩის სქემა (Kain, 2004), ბეტს-მილერ-ჯანჯიჩის სქემა (Janjić, 1994; 2000), გრელ-დევენჯის სქემა (Grell & Dévényi, 2002) ყველაზე კარგად აღწერს ატმოსფერულ პროცესებს ბრაზილიის სამხრეთ-

აღმოსავლეთ ნაწილში (Zepka et al., 2010). ასევე, რიცხვითი გათვლების ანალიზმა აჩვენა, რომ WSM3-ის ნაკრები კაინ-ფრიჩის და ეტა ფერარის სქემები ბეტს-მილერ-ჯანჯიჩის სქემასთან ერთად ყველაზე კარგად წარმოგვიდგენს ატმოსფეროს დაბალ და საშუალო დონეზე ტემპერატურისა და ქარის მნიშვნელობებს, ვიდრე პუნდუე ლინისა და გრელ დევენჯის სქემები. WRF მოდელის გამოყენებით ექვს სხვადასხვა კონვექტიური პარამეტრიზაციის სქემებში (CP's) შეისწავლებოდა ნალექების პროგნოზის ხარისხი ტანზანიისათვის წვიმის ორი სეზონისათვის. რიცხვითი გათვლების შედეგებმა აჩვენა, რომ ექსტრემალური ნალექების პროგნოზმა ბეტს-მილერ-ჯანჯიჩის (BMJ) და გრელ-დევენჯის (GD) სქემებით მოგვცა ყველაზე კარგი შედეგი ტანზანიის ზოგიერთი რაიონებისათვის (Orlando, 2014). რვა მიკროფიზიკური სქემა (Lin, WSM5, Eta, WSM6, Goddard, Thompson, WDM5, WDM6) და სამი მიღებული შედეგებიდან შეიძლება გამოითქვას აზრი, რომ ყველაზე ზუსტად ხორციელდება ტროპოსფეროს დონეზე ტენიანობის, ტემპერატურისა და ქარის პროფილის ველების მიღება (Segele et al., 2013). WRF საშუალებით დათვლილმა 24-საათიანმა პროგნოზის შედეგებმა აჩვენა, რომ კაინ-ფრიჩის, ბეტს-მილერ-ჯანჯიჩის (BMJ) და გრელის სქემებით მიღებული შედეგი არ იყო ზუსტი, ხოლო არაკავას ღრუბლების პარამეტრიზაციის სქემები შემდეგ მიკროფიზიკურ სქემებთან ერთად, RUC Land surface მოდელი, Asymmetric Convective მოდელი (ACM2), პლანეტარული სასაზღვრო ფენის ფიზიკა გვაძლევს უკეთეს შედეგებს, ვიდრე სხვა სქემები (Silva et al., 2010). ნალექების პროგნოზის რაოდენობრივი შედარება კაინ-ფრიჩის სქემის სხვადასხვა მოდიფიკაციისათვის შესწავლილია (Duda, 2011)-ში, სხვა სქემებს შორის კაინ-ფრიჩის სქემა (Kain, 2004; 1992; 1993) ხშირად გამოიყენება კონვექტიური პარამეტრიზაციის პროგნოზირებისათვის ბადის წერტილების 20 კმ-იანი ბიჯით, ამიტომ, როგორც ვაჩვენეთ კონვექტიური პარამეტრიზაციისათვის კაინ-ფრიჩის სქემა უკეთესია ვიდრე სხვა სქემები (Gilliland, 2007; Wang, 1997; Ma, 2009). ზემოთ ჩამოთვლილი შრომების ანალიზის შედეგად ჩვენს მიერ კავკასიის რეგიონში ატმოსფერული პროცესების გამოკვლევისათვის WRF მოდელის საშუალებით გამოიყენება შემდეგი ტიპის სქემები: WSM 3-კლასის მარტივი სქემა, RRTM, დუდიჩის

სქემა, გაერთიანებული ნოასა და ზედაპირის მოდელი, იონსის უნივერსიტეტის სქემა, კაინ-ფრიჩის სქემა და Noah land მოდელის სქემა (Davitashvili et al., 2009; 2011). ჩვენს კვლევაში WRF მოდელი გამოვიყენეთ რთული ოროგრაფიის პირობებში ძლიერი წვიმებისა და სეტყვის პროცესების პროგნოზირებისათვის ფიზიკური პარამეტრების სხვადასხვა კომბინაციის დროს. მეზომასშტაბური კონვექციური სისტემების (MCS) შესასწავლად გამოვიყენეთ რეალური მონაცემები და WRF სიმულაციებისათვის ბადის წერტილებს შორის ინტერვალი ვცვალეთ 2.2 კმ-დან 19.8 კმ-მდე, სადაც განსაკუთრებით აქცენტი გავაკეთეთ 2.2 კმ-იან ბადეზე. WRF მოდელის საშუალებით ნალექების პროგნოზის სქემებში სხვადასხვა მიკროფიზიკურ და კონვექტიურ სქემების კომპონენტებთან ერთად გათვალისწინებულია საქართველოს ტერიტორიის რთული ოროგრაფია ბადის განსხვავებული ინტერვალების სიზუსტით.

3.2 რიცხვითი გათვლები WRF მოდელის პარამეტრიზაციის სქემების საშუალებით.

ჰიდრომეტეოროლოგიური დაკვირვებები და გამოკვლევები საქართველოში დაიწყო 1887 წელს და 1974 წლისათვის საქართველოში არსებობდა 33 ჰიდრომეტეოროლოგიური სადგური, რომელიც განაწილებული იყო 11 რაიონში. საქართველოში 1940 წელს ყველაზე მეტი (160) მეტეოროლოგიური სადგური იყო. კლების ტენდენცია 1950-იანი წლებიდან დაიწყო (145). 1990 წლისთვის საქართველოში 105 მეტეოროლოგიური სადგური ფუნქციონირებდა, ხოლო შემდგომ წლებში მათი რაოდენობა მნიშვნელოვანი კლების ტენდენციით ხასიათდებოდა. 1992 წელს საქართველოში განვითარებული პოლიტიკური და ეკონომიური მდგომარეობის გამო შეფერხდა ჰიდრომეტეოროლოგიური სადგურების მუშაობა (<https://factcheck.ge/wp-content/uploads/2015/08/file0011.pdf>). სადგურების რაოდენობა შემცირდა და ზოგიერთი მწყობრიდან გამოვიდა. 2012 წლიდან მეტეოროლოგიური სადგურების რაოდენობა მცირედით, მაგრამ მაინც გაიზარდა (20-დან 29-მდე). რაც შეეხება მეტეოროლოგიურ საგუშაგოებს, ყველაზე მეტი საგუშაგო 1960 წელს იყო (100), შემდგომ წლებში მათი რაოდენობა შემცირდა (1970 წელი - 78, 2005 წელი -

24). 2010 წლიდან კი, მეტეოროლოგიური საგუშაგოების რაოდენობა მცირედით გაიზარდა და 2015 წლისთვის 51-ს მიაღწია. 2015 წლიდან დღემდე (2015 წლის 13 ივნისის ტრაგედიის შემდეგ) აღმოსავლეთ საქართველოში განსაკუთრებით გაიზარდა მეტეოროლოგიური სადგურების რაოდენობა.

რიცხვითი მოდელირებითა და სტატისტიკური მეთოდებით ჩვენ შევისწავლეთ და გავანალიზეთ 9 საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენა, რომლებსაც ადგილი ჰქონდათ 2015–2020 წლების განმავლობაში აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე. სადისერტაციო ნაშრომში კი წარმოდგენილია და შესწავლილია ორი საშიში ტიპური მეტეოროლოგიური მოვლენა თავისი მძიმე შედეგებით. ამკარაა, რომ მეტეოროლოგიური სადგურების ეს მცირე რაოდენობა არ არის საკმარისი საქართველოს ტერიტორიაზე ატმოსფეროს მდგომარეობის გამოსაკვლევად, რადგან რეალურად ჩვენ გვაქვს მეტეოროლოგიური ინფორმაცია მხოლოდ იმ ლოკალური ტერიტორიებისა, სადაც სადგურებია განლაგებული. ამიტომ ჩვენს მიერ მოპოვებული და გაანალიზებულია 2015 წლის 13 ივნისის (13 ივნისის ტრაგედია) და 20-21 აგვისტოს მწირი მეტეოროლოგიური მონაცემები (ჰაერის ტემპერატურა, ნალექების რაოდენობა, ჰაერის ტენიანობა, ქარი (სიჩქარე, მიმართულება). აღნიშნული მონაცემები იყო მოპოვებული საქართველოს ჰიდრომეტ. დეპარტამენტიდან და თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მეტეოროლოგიური სადგურიდან. აგრეთვე ჩვენ ვაწარმოეთ ღრუბლების სტრუქტურის ანალიზი, რომელიც მივიღეთ სიღნაღის მეტეოროლოგიური რადარიდან და მიღებული მონაცემები შევადარეთ WRF მოდელით მიღებულ შედეგებს.

თბილისში 2015 წლის 13-14 ივნისს იყო ძლიერი წვიმა, ელჭექით. საქართველოს ჰიდრომეტეოროლოგიის დეპარტამენტის მონაცემებით 13 ივნისს 1 სთ-ზე ჰაერის მაქსიმალურმა ტემპერატურამ თბილისში მიაღწია 29⁰C, სამხრეთიდან შემოსულმა თბილი ჰაერის მასებმა გამოიწვია ტემპერატურის მომატება და შესაბამისად აღმავალი ნაკადების გაძლიერება, რის შედეგადაც განვითარდა ელჭექური ხასიათის გროვა-საწვიმარი ღრუბლები. კერძოდ, 2015 წლის 13 ივნისს მოვიდა 1.5-2 საათიანი წვიმა, უხვი ნალექის შედეგად თბილისიდან დასავლეთით 20 კმ მანძილზე სოფელ

ახალდაბაში ჩამოწვა მეწყერი. 10⁶ მ3 მიწა, ტალახი და ხეები ჩაიტანა წყალმა ახალდაბიდან თბილისში, რამაც გზა გადაუკეტა მდ. ვერეს (მდ. ვერე მოედინება ახალდაბის მთიანი ტერიტორიიდან, გაივლის თბილისის ზოოპარკის მიმდებარე ტერიტორიას და გმირთა მოედანზე გვირაბის საშუალებით ჩაედინება მდ. მტკვარში). ადიდებულმა ტალღამ გმირთა მოედანმდე ჩაიტანა ყველაფერი რაც გზად დახვდა. წყალდიდობის შედეგად ძლიერ დაზარალდა თბილისის ზოოპარკი, გმირთა მოედანზე მდებარე ქუჩები და სახლები. სამწუხაროდ ამ პროცესის შედეგად 20 ადამიანი დაიღუპა, მათ შორის 3 ზოოპარკის თანამშრომელი. ზოოპარკში მოხინაძრე ცხოველთა ნახევარი ზოგი დაიკარგა, ნაწილი კი წყალში დამხრჩვალი იპოვნეს.

2015 წლის 19 აგვისტოს თბილისში დასავლეთიდან შემოვიდა ატმოსფერული ფრონტი, რასაც დაერთო შიდა მასიური პროცესი, რის შედეგადაც მოვიდა თბილისში ძლიერი წვიმა ელჭექით, საქართველოს ზოგიერთ რაიონში დაფიქსირდა ძლიერი სეტყვაც. მაქსიმალური ჰაერის ტემპერატურა თბილისში 20 აგვისტოს იყო 36 °C, ხოლო 21 აგვისტოს 31 °C. ძლიერმა წვიმამ, რომელსაც თან სეტყვა ახლდა დაანადგურა მოსავალი კახეთის ზოგიერთ რაიონში, თბილისის შემოგარენში კოჯორსა და კიკეთში საცხოვრებელი სახლები მთლიანად დაიტბორა, ნახევარსაათიანმა გადაუღებელმა წვიმამ და სეტყვამ კახეთის ზოგიერთ რაიონში (გურჯაანი, ყვარელი და ლაგოდეხი) საცხოვრებელი სახლები დააზიანა, განაგურდა ხეხილი და ნათესი კულტურები <http://eng.kavkaz-uzel.ru/articles/21952/>).

ყველაზე ძლიერი სეტყვა კახეთის რეგიონში დაფიქსირდა 2012 წლის ივლისში, რომელმაც კახეთის ზოგიერთ სოფელში ნათესების 100% გაანადგურა, დაზიანდა ასობით საცხოვრებელი სახლი და დაიღუპა ძალიან ბევრი შინაური ცხოველი. სეტყვისგან დაცვა ყოველთვის მნიშვნელოვანი იყო კახეთის რეგიონისთვის, რადგან იგი ყველაზე დიდ ზარალს აყენებს ამ რეგიონში ერთერთ წამყვან კულტურას ვაზს, ამიტომ საჭირო გახდა ამ პრობლემის მოგვარება. 2015 წელს სიღნაღის რაიონში სსსტც „დელტა“-ს მიერ დამონტაჟდა სარადარო სისტემა, რომლითაც ხორციელდება კონვექტიურ ღრუბლებზე დაკვირვება, კახეთის სხვადასხვა

რეგიონში კი დაიდგა 80-მდე საცეცხლე წერტილი, რისი საშუალებითაც ხორციელდება ღრუბლებზე ზემოქმედება.

ჩვენ WRF-ARW-ის 3.6 ვერსია გამოვიყენეთ 2015 წლის 13-14 ივნისისა და 19-20 აგვისტოს ნალექების სიმულაციისათვის. ჩვენს კვლევაში გამოვიყენეთ ცალმხრივად ჩადგმული ბადეები, რომელიც მორგებული იყო საქართველოს ტერიტორიისათვის. კერძოდ, სიმულაციისათვის გამოვიყენეთ 2 დონიანი რიგი ჰორიზონტალური ბადის წერტილებით 6,6 კმ და 2,2 კმ გაფართოებით. ერთ დონეზე გვაქვს ბადის წერტილები 94×102 , რომელიც ფარავს სამხრეთ კავკასიის ტერიტორიას და შიგნით ჩაწყობილია ბადე ზომით 70×70 , რომელიც მოიცავს მხოლოდ საქართველოს ტერიტორიას. ორივე გამოიყენება 54 ვერტიკალურ დონეზე, აქედან 8 დონე მოთავსებულია 2 კმ-ის ქვემოთ. ორმაგი ბადისათვის გამოიყენებულია 10 წამიანი დროითი ბიჯი. მოდელი მოიცავს რამდენიმე განსხვავებულ ფიზიკურ პარამეტრებს, როგორცაა, მიკროფიზიკა, ღრუბლების ფიზიკა, დედამიწის ზედაპირის ფიზიკა, პლანეტარული სასაზღვრო ფენის ფიზიკა. მიკროფიზიკა განსაზღვრავს წყლის ორთქლს, ღრუბლებს და ნალექებს. არსებობს მთელი რიგი მიკროფიზიკური სქემები, როგორცაა კესლერის სქემა, პუნდუე ლინის სქემა, მარტივი მე-3 კლასის სქემა (WSM3), WSM5 სქემა, WSM6 სქემა, Eta Grid-scale ღრუბლებისა და ნალექების სქემა, ტომსონის სქემა, გოდარდის ღრუბლების ანსამბლის სქემა, მორისონის სქემა. ჩვენს კვლევებში შევარჩიეთ WSM6, ტომსონის, პუნდუე ლინის, მორისონისა და გოდარდის სქემები. ღრუბლების პარამეტრიზაციის სქემა პასუხისმგებელია კონვექტიური ან ფენა ღრუბლების წარმოდგენაზე. ჩვენ ექსპერიმენტისთვის ავირჩიეთ კაინ-ფრიჩის, ბეტს-მილერ-ჯანჯიკისა და პლეიმ-ქსიუ (Pleim-Xiu) დედამიწის ზედაპირის მოდელი, ეს მოდელები არიან სპეციალურად შექმნილი დედამიწის ზედაპირისთვის. ჩვენ ავირჩიეთ NOAA დედამიწის ანსამბლის სქემები. პლანეტარული სასაზღვრო ფენა პასუხისმგებელია ქვეწყობილი ბადის ვერტიკალურ მაშტაბებში იმ დინებებზე, რაც შემოდის მთელს ატმოსფეროში. პლანეტარული სასაზღვრო ფენის პარამეტრიზაციას აქვს დიდი მნიშვნელობა როგორც ვერტიკალური ქარის მნიშვნელობაზე, ისე ნალექების ევოლუციაზე (Monin

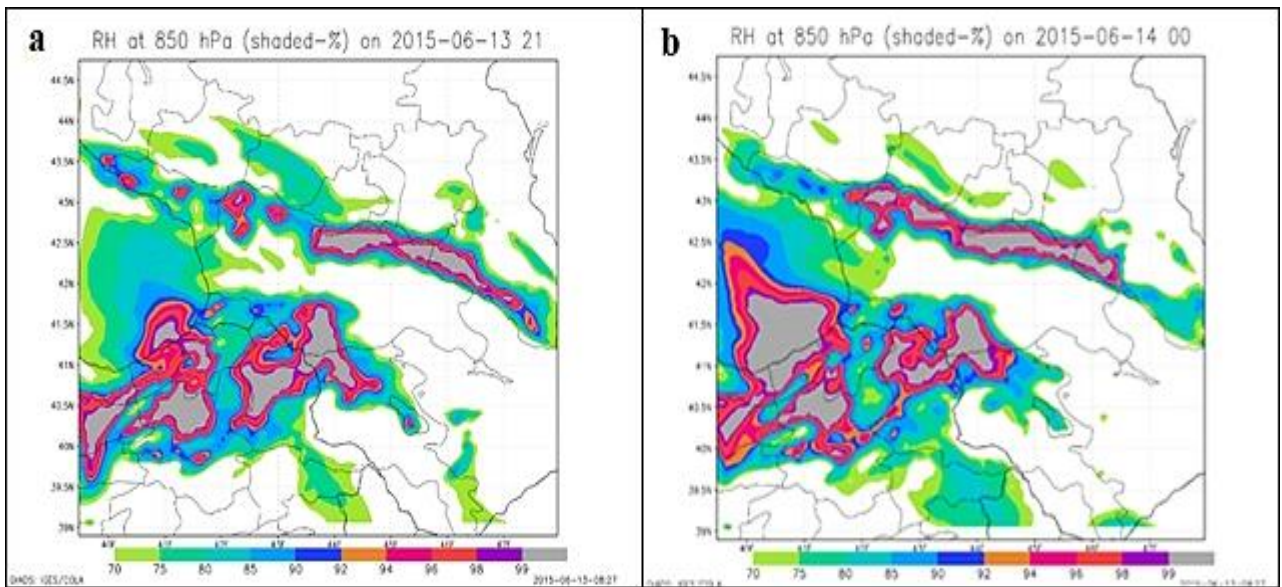
et al.,1954; Hong & Lim, 2006; Cohen et al., 2015). ამ შრომებში შეჯამებულია ძირითადი მახასიათებლები და ნაჩვენებია განსხვავება WRF-ის სხვადასხვა სქემებს შორის და აგრეთვე შესწავლილია, თუ როგორ განიცდის ევოლუციას პლანეტარული სასაზღვრო ფენა ARW-მიხედვით 4 კმ-იანი ზადის ინტერვალით. არსებობს PBL – ის მთელი რიგი სქემები, როგორცაა იონსის უნივერსიტეტის სქემა, Mellor-Yamada-Janjic სქემა, MRF სქემა, ასიმეტრიული კონვექტიური მოდელის სქემა, კვაზი-ნორმალური მასშტაბის Elimination and Mellor-Yamada Nakanishi და Niino სქემების სხვადასხვა ვარიანტები. (Cohen et al., 2015)-ის მიხედვით ჩვენ ავირჩიეთ იონსის უნივერსიტეტის და ACM2 PBL სქემები. მიწის ზედაპირზე მოდელები იყენებენ ატმოსფერულ ინფორმაციას ზედაპირის ფენების სქემიდან, რადიაციის მონაცემები აიღება რადიაციული სქემებიდან, ხოლო ნალექები მიკროფიზიკიდან და კონვექტიური სქემებიდან. შიდა ინფორმაციასთან ერთად მოცემული ადგილის ზედაპირის მიხედვით სითბოსა და ტენიანობის მნიშვნელობები განსხვავებულია ხმელეთისა და წყლის ზედაპირზე. 5 ფენიანი თერმული დიფუზიის მოდელი, Noah-ს დედამიწის ზედაპირის მოდელი, RUC დედამიწის ზედაპირის მოდელი და განვიხილეთ მიკროფიზიკის, ღრუბლების პარამეტრიზაციის სქემების, პლანეტარული სასაზღვრო ფენის ფიზიკის სხვადასხვა კომბინაციები, ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ცხრილ.3.2.1-ში.

ცხრ. 3.2.1. WRF-ARW-ის 3.6 მოდელის პარამეტრიზაციის ხუთი ნაკრები, რომლებიც გამოყენებულია კვლევებში.

WRF Physics	Set1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Micro physics	WSM6	Thompson	Purdue Lin	Morrison 2-Moment	Goddard
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch	Betts-MillerJanjic	Kain-Fritsch	Grell-Devenyi ensemble	Kain-Fritsch
Surface Layer	MM5 Simil.	MM5 Simil.	MM5 Simil	(PX) Similarity	MM5 Similarit
Planet. Boundary Layer	YSU PBL	YSU PBL	YSU PBL	ACM2 PBL	YSU PBL
Land-Surface	Noah LSM	Noah LSM	Noah LSM	Noah LSM	Noah LSM

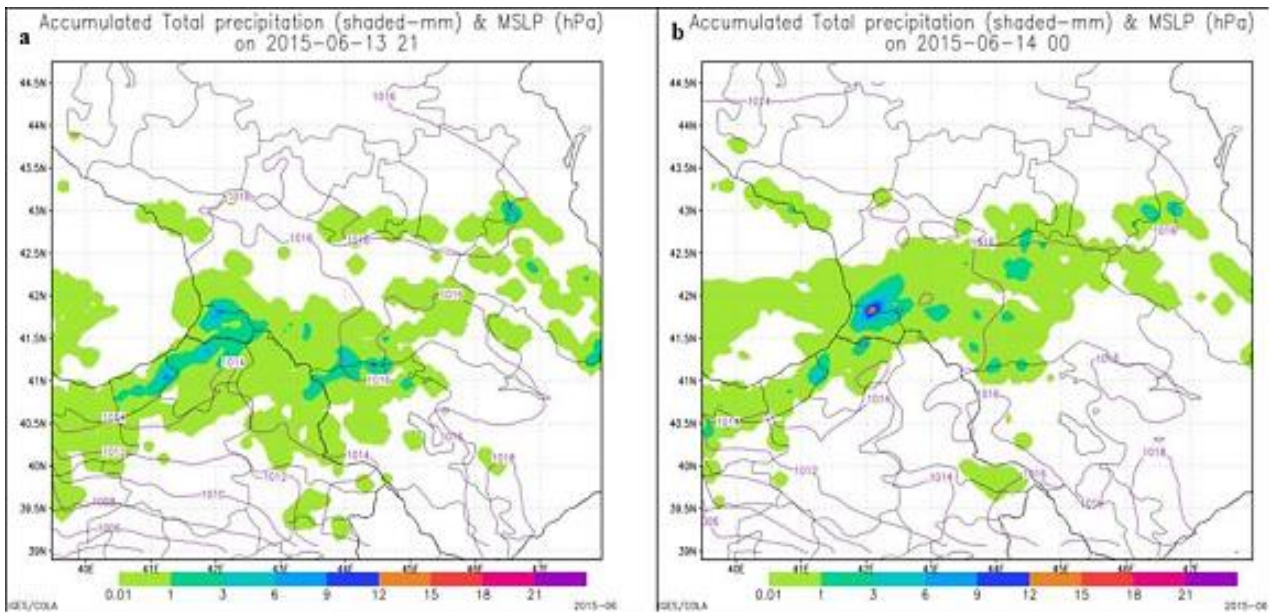
Atmospheric Radiat.	RRTM /Dudhia	RRTM /Dudhia	RRTM /Dudhia	RRTM/Dudhia	RRTM/Dudhia
---------------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------

საქართველოს ტერიტორიაზე 2015 წლის 13 ივნისისა და 19-20 აგვისტოს მომხდარი მეტეოროლოგიური პროცესების კვლევა განხორციელდა WRF-ARW მოდელის 5 სხვადასხვა ფიზიკური პარამეტრების კომბინაციის როგორცაა მიკროფიზიკა, ღრუბლების პარამეტრიზაციის ფიზიკა, რადიაციის ფიზიკა, დედამიწის ზედაპირის ფიზიკა და პლანეტარული სასაზღვრო ფენის ფიზიკა (ცხრ.3.2.1). რიცხვითი თვლის შედეგებმა აჩვენა, რომ ცხრ.3.2.1-ში ჩამოთვლილი პარამეტრების არცერთი კომბინაციის შედეგად არ დაფიქსირდა 13 ივნისის განვითარებული ატმოსფერული პროცესი. კერძოდ, რიცხვითი თვლის შედეგებმა აჩვენა, რომ 24 საათიანი პოგნოზულმა სქემებმა არ მოგვცეს დამაკმაყოფილებელი შედეგი, ე.ი ამ სქემების საშუალებით ვერ ხერხდება მცირე მასშტაბის, ლოკალური კონვექტიური პროცესების დაფიქსირება, თუმცა ამავე დროს შესაძლებელია ეს კონვექტიური პროცესები ძალიან ძლიერი იყოს. მაგალითად, ნახ.3.2.1-ზე მოცემულია 850 მბ-იან დონეზე 2015 წლის 13 ივნისის და 14 ივნისის ფარდობითი ტენიანობის რიცხვითი თვლის შედეგები, შესაბამისად, რომელთა მნიშვნელობები მიღებულია WRF-ARW-ის 3.6 ვერსიის ფიზიკური პარამეტრით მოცემული Set1 (ამ შემთხვევაში შედარებით უკეთესი შედეგი დაფიქსირდა). ნახ.3.2.1 (a.b)-ზე (ბადეები 6.6 კმ ბიჯით) წარმოდგენილი წყლის ორთქლის რაოდენობა არ იყო საკმარისი იმისთვის, რომ მოდელს დაეფიქსირებინა 13 ივნისის მეტეოროლოგიური პროცესი.



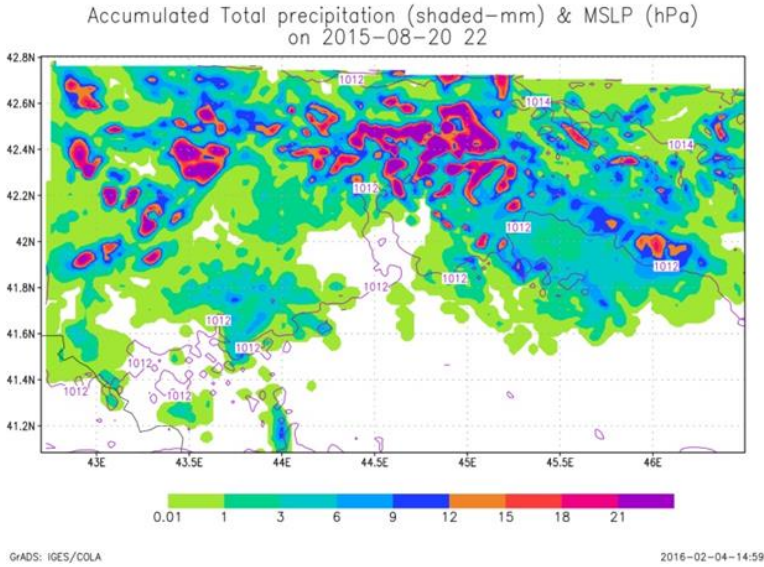
ნახ.3.2.1. 2015 წლის 13-14 ივნისის ფარდობითი ტენიანობა.

ნახ.3.2.2-ზე ნაჩვენებია WRF-ARW-ის 3.6 ვერსიით დათვლილი 24 საათიანი პროგნოზის შედეგები 850 მბ-იან ზედაპირზე 2015 წლის 13 (21 სთ) ივნისისა და 14 (00 სთ) ივნისისათვის შესაბამისად. ორივე სურათზე კარგად ჩანს WRF-ARW მოდელის წარუმატებლობა 24 საათიანი პროგნოზის შემთხვევაში, განსაკუთრებით საკვლევ ტერიტორიაზე ამ დროისთვის გვაქვს ნალექების მხოლოდ უმნიშვნელო რაოდენობა. კერძოდ ნახ.3.2.2a-სა და ნახ.3.2.2b-ს შედარება გვიჩვენებს, რომ ნალექები ძირითადად თავმოყრილია შავი ზღვის სანაპირო ტერიტორიაზე, მაგრამ ნახ.3.2.2a-ზე შედარებით მეტი ნალექებია თავმოყრილი საკვლევ ტერიტორიაზე, ვიდრე ნახ.3.2.2b-ზე. სამწუხაროდ, ამ საქმის შესწავლისათვის ნალექების ყველა სიმულაცია საინტერესო რეგიონში არ იყო კონვექტიური ბუნების, ამიტომ მხოლოდ ნალექების მცირე რაოდენობა დაფიქსირდა WRF-ARW მოდელის მიერ. როგორც ცნობილია GPSs არის ნალექწარმომქმნელი და არა მიკროფიზიკური სქემა, ეს ნიშნავს, რომ GPSs-ის არჩეული კომბინაცია არ არის ნალექწარმოებელი სქემა მეზომასტაბური შესწავლის დროს. მნიშვნელოვანია იმის გათვალისწინება, რომ ყველაზე მკაფიო შედეგების მიღება მოხერხდა ტროპოსფეროს ქვედა საზღვარზე ტემპერატურისა და ქარის ველისათვის. ჩვენი აზრით აუცილებელია დაზუსტდეს მონაცემების საწყისი და სასაზღვრო პირობები, რაც გააუმჯობესებს კავშირს სხვადასხვა ფიზიკურ პარამეტრებს შორის.

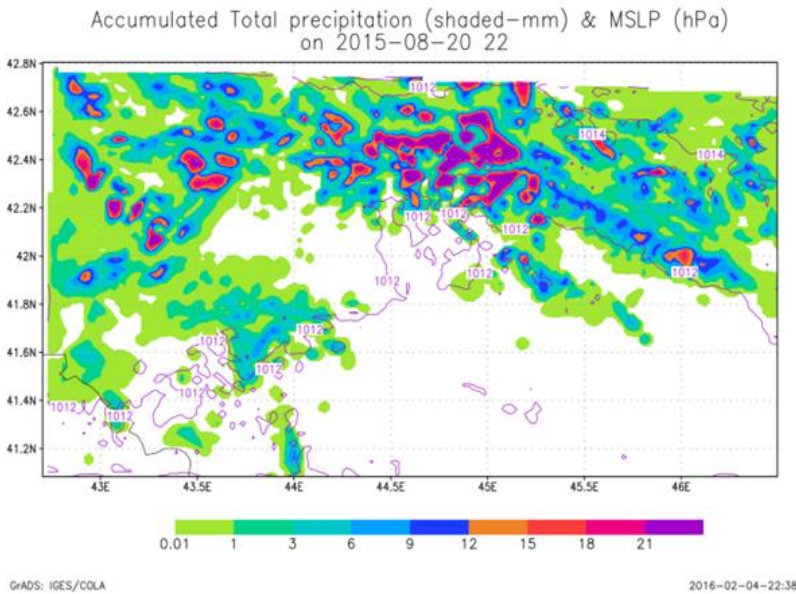


ნახ.3.2.2. 12 სთ-იანი ჯამური ნალექების პროგნოზი.

გარდა ამისა WRF-ARW მოდელის 3.6 ვერსია იყო გამოყენებული 20 აგვისტოს მეტეოროლოგიური პროცესების სიმულაციისათვის, ფიზიკური სქემების 5 სხვადასხვა კომბინაციის საშუალებით (ცხრ.3.2.1). რიცხვითი გათვლების შედეგებმა აჩვენა, რომ ოროგრაფია მნიშვნელოვან როლს თამაშობდა ნალექების ლოკალიზაციასა და ინტენსიობის გაძლიერებაში. წინა კონვექტიური გარემო, გამოწვეული მთა-ხეობის ფერდობებზე ჰაერის ნაკადების აღმასვლით, რაც წარმოქმნის დღის განმავლობაში მცირე მასშტაბიან ატმოსფერულ ცირკულაციებს, წარმოქმნილი მეზომასშტაბური გრიგალები, ისევე როგორც ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის ცვლილებები, გავლენას ახდენს მიმდინარე მეტეოროლოგიურ პროცესებზე. რიცხვითმა გათვლებმა აჩვენა, რომ პურდუე ლინის (Purdue Lin) სქემის კომბინაცია კაინ-ფრიჩის (Kain-Fritsch) სქემასთან და MM5 Similarity Surface Layer (Set 3) სქემასთან და გოდაედის სქემა კაინ-ფრიჩის სქემასთან და MM5 Similarity Surface Layer სქემასთან (Set 5) გვაძლევს უკეთეს შედეგს ვიდრე სხვა სქემები. არჩეული კონვექტიური შემთხვევები SET3-სა და SET5-სათვის ნაჩვენებია ნახ.3.2.3-3.2.4-ზე, შესაბამისად. რიცხვითმა გათვლებმა აჩვენა, რომ ნამდვილად არსებობს ისეთი ბუნებრივი მასშტაბები, რომელთა კონვექტიური პარამეტრიზაცია მოხდება WRF მოდელის საშუალებით.



ნახ.3.2.3. 12 სთ-იანი ჯამური ნალექების პროგნოზი ზადის წერტილების 2.2 კმ ბიჯით.



ნახ.3.2.4. 12 სთ-იანი ჯამური ნალექების პროგნოზი ზადის წერტილების 2.2 კმ ბიჯით.

ნახ.3.2.3-სა და ნახ.3.2.4-ს შედარება გვიჩვენებს, რომ ჯამური ნალექები პროგნოზი ორივე შემთხვევაში თითქმის ერთნაირია, მაგრამ მისი განვითარების დინამიკის შესწავლამ და მისმა შედარებამ დაკვირვებულ მონაცემებთან აჩვენა, რომ SET3-ზე დათვლილი მონაცემები უფრო ზუსტად აღწერს იმ ატმოსფერულ პროცესებს,

რომელსაც ადგილი ჰქონდა 2015 წლის 19-20 აგვისტოს. საერთო ჯამში შეიძლება ითქვას, რომ აღნიშნული მოდელი შეიძლება წარმატებით გამოვიყენოთ ლოკალური ატმოსფერული პროცესების პროგნოზირებისათვის, დასავლეთის ტიპის სინოპტიკური პროცესებისთვის, რომელსაც ადგილი ჰქონდა 2015 წლის 19-20 აგვისტოს საქართველოს ტერიტორიაზე.

3.3 Ready სისტემის მონაცემები და მეთოდები.

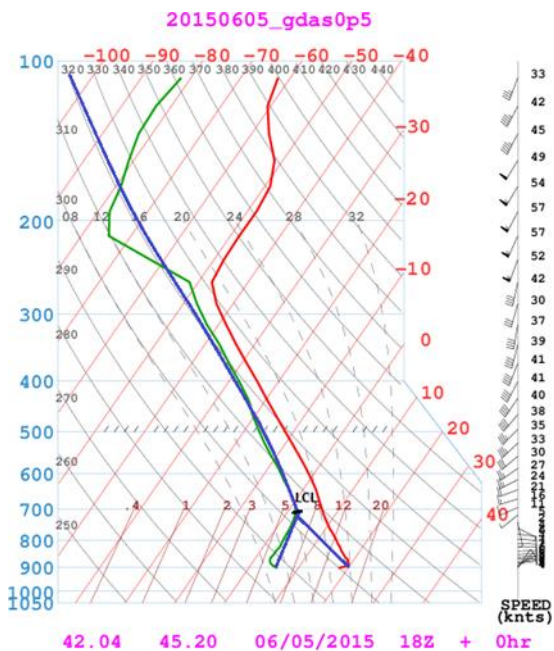
მთავორიან რეგიონებში ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ჩამოყალიბებაში მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს ჰაერის მასების ვერტიკალურ მოძრაობას. რთული ოროგრაფიის მქონე ტერიტორიებზე, რელიეფის გავლენით ძლიერდება ჰაერის მასების კონვექცია რაც იწვევს ძლიერი კონვექციური ღრუბლების ფორმირებას (Robert, 2011). ხშირ შემთხვევებში (როგორც წინა პარაგრაფში განხილული მაგალითებიდანაც ჩანს) მცირე დროში მიმდინარე, ლოკალური ხასიათის საშიში კონვექციური პროცესების პროგნოზი რიცხვითი მეთოდებით ყოველთვის ვერ იძლევა კარგ შედეგებს. ამიტომ ამინდის პროგნოზირების საყოველთაოდ გავრცელებულ რიცხვითი მეთოდებთან ერთად საჭიროა შემუშავებულ იქნას განსხვავებული მიდგომები და მეთოდები. კერძოდ მოსალოდნელი კონვექციური პროცესების ხარისხის შესაფასებლად საჭიროა შევისწავლილ იქნას ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა და დადგენილ იქნას ატმოსფეროს არამდგრადობის ხარისხი მოსალოდნელი ლოკალური ხასიათის საშიში კონვექციური პროცესების პროგნოზირებისთვის. ატმოსფეროს არამდგრადობის ხარისხის შესაფასებლად საჭიროა ატმოსფეროს ვერტიკალური სტრუქტურის შესწავლა. დღესდღეობით რადიოზონდის ფუნქციონირება გარკვეულ ფინანსურ ხარჯებთანაა დაკავშირებული და მისი გამოყენება ზოგიერთ განვითარებად ქვეყანებში თითქმის აღარ ხდება (მათ შორის საქართველოშიც). ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ეფექტური და დროული პროგნოზირებისათვის NOAA-ს ARL- ის მიერ შეიქმნა სისტემა READY ([http:// www.ready.noaa.gov](http://www.ready.noaa.gov)). იმისათვის, რომ მოგვეხდინა ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის შესწავლა განხილული

დღეებისათვის გამოვიყენეთ ARL-ის არქივის მონაცემები 0.5^o ჰორიზონტალური რეზოლუციით და თითოეული განხილული დღისათვის ავაგეთ ნაწილაკის მდგომარეობის მრუდი. არამდგრადობის ენერჯისა და კონვექტიური ჩახშობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობები აღებულია ასევე ARL-ის READY სისტემის არქივიდან ჰორიზონტალური რეზოლუციით 1.0^o (~111 კმ)) (Rolph et al., 2017; Stein et al., 2015).

NOAA-ს ARL-ი ატმოსფეროში მიმდინარე სხვადასხვა ტიპის დაკვირვების შედეგად მიღებულ მონაცემებს ამუშავებს და ანალიზებს. განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა რადიოზონდის მონაცემებს, სხვადასხვა მოდელების საშუალებით ამ მონაცემებით შესაძლებელია შეფასდეს გლობალური კლიმატური ცვლილებები. გარემოს პროგნოზირების ეროვნული ცენტრი (NCEP) უშვებს ამინდის პროგნოზირებისა და ანალიზის მთელ რიგ სერიებს. ერთერთი ოპერატიული სისტემა არის GDAS (გლობალურ მონაცემთა ასიმილაციური სისტემა). ჩვენს მიერ საწყისი მონაცემები გლობალური პროგნოზირებისათვის აღებულია GDAS-დან. GDAS იღებს ყველა არსებულ გლობალური დაკვირვების (სატელიტური, რადიოლოკაციური, რადარის მონაცემები) შედეგად მიღებულ მონაცემებს და უკეთებს ანალიზს (<https://www.ncdc.noaa.gov>). 3 საათიანი არქივის მონაცემები აღებულია NCER-ის GDAS სისტემიდან (GDAS უშვებს დღეში 4-ჯერ მონაცემებს: 00, 06, 12, 18 UTC). NCER-ის GDAS სისტემიდან გამოდის აგრეთვე ყოველი სამი საათის შემდეგ პროგნოზული მონაცემები (03, 06, 09 და ა.შ.). NOAA-ს ARL-ის READY სისტემა გვაძლევს საშუალებას გეოგრაფიული კოორდინატების მითითებით ნებისმიერ ტერიტორიაზე მივიღოთ ატმოსფეროს ვერტიკალური განაწილების სურათი, გავაკეთოთ ატმოსფეროს მდგომარეობის ანალიზი.

აეროლოგიურ დიაგრამაზე (ნახ.3.3.1) ვერტიკალურ ღერძზე გადაზომილია წნევა (მბ), ხოლო ჰორიზონტალურ ღერძზე ტემპერატურა. ჰორიზონტალური უწყვეტი შავი წირები წარმოადგებს სტანდარტულ იზობარულ ზედაპირებს (1000 მბ-დან 100 მბ-მდე). მარჯვნივ დახრილი წითელი ხაზები არის იზოთერმები, რომლებიც გავლებულია 10^oC-იანი ინტერვალით. მარცხნივ დახრილი უწყვეტი შავი ხაზები

არის მშრალი ადიაბატები, ხოლო წყვეტილი ხაზებით წარმოდგეილია ნოტიო ადიაბატები (Blanchard, 1998). იზოთერმების მიმართ დახრილი სწორი ხაზები არის იზოგრამები- ნაჯერობის მდგომარეობაში ნარევის ფარდობითი წირები (saturated mixing ratio line), გარდა ამ ძირითადი წირებისა დიაგრამაზე დატანილია აგრეთვე ორი ცვლადი გრაფიკი: რეალური ატმოსფეროს ტემპერატურის განაწილების მრუდი (უწყვეტი წითელი ხაზი) და ნამის წერტილის მრუდი (უწყვეტი მწვანე ხაზი). გარემომცველი ატმოსფეროს ტემპერატურის განაწილების მრუდი გვიჩვენებს ატმოსფეროს ტემპერატურის ცვლილებას სიმაღლის მიხედვით. ხოლო ნამის წერტილის მრუდზე მოცემულია სიმაღლის მიხედვით ნამის წერტილის მნიშვნელობები. მარჯვენა სკალა წარმოადგენს ქარის მნიშვნელობებს სიმაღლის მიხედვით. ქვემოთ (წითლად) მითითებულია ზონდირების ადგილი, თარიღი და დრო (ნახ.3.3.1).



ნახ.3.3.1. აეროლოგიური დიაგრამა (2015 წლის 5 ივნისის 18 UTC).

ატმოსფეროს მდგომარეობა სტრატეფიკაციის მიხედვით შეიძლება იყოს მდგრადი, არამდგრადი და განურჩეველი. სტაბილურ სტრატეფიკაციის შემთხვევაში ატმოსფეროს აქვს უნარი შეინარჩუნოს ან შეაჩეროს ვერტიკალური მოძრაობები. ატმოსფეროში კონვექციის ხარისხის შესაფასებლად ნაწილაკთა მეთოდი წარმოადგენს ერთ-ერთ ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს სადაც ვთვლით, რომ

დასაწყისში ნაწილაკს და გარემომცველ ატმოსფეროს ერთნაირი ტემპერატურები აქვთ და ნაწილაკის ზემოთ ასვლის დროს არ ხდება გარემოსთან სითბოცვლა, ანუ პროცესი მიმდინარეობს ადიაბატურად. რადგან თავდაპირველად ნაწილაკი არ არის გაჯერებული, ამიტომ კონდესაციის დონემდე იგი მოძრაობს მშრალადიაბატურად, ხოლო კონდესაციის დონეზე იგი ხდება ნაჯერი და კონდესაციის დონის ზემოთ აწევის შემდეგ იწყება კონდესაცია და გამოიყოფა კონდესაციის ფარული სითბო, რის გამოც ნაწილაკის ტემპერატურა უფრო ნელა ეცემა ვიდრე კონდესაციის დონემდე, ამის გამო ნაწილაკი განაგრძობს მოძრაობას ნოტიოადიაბატაზე (Blanchard, 1998). ნახ. 3.3.1-ზე ლურჯი უწყვეტი ხაზით წარმოდგენილია ნაწილაკის მდგომარეობის მრუდი. ნაწილაკის მდგომარეობის მრუდის ასაგებად დედამიწის ზედაპირზე ჰაერის ტემპერატურის მნიშვნელობიდან ვავლებთ მშრალადიაბატის პარალელურ წირს, ხოლო ნამის წერტილის შესაბამისი წერტილიდან ვავლებთ იზოგრამის პარალელურ წირს, მათი გადაკვეთის წერტილი იქნება ნაწილაკის კონდესაციის დონე, კონდესაციის დონიდან ვავლებთ ნოტიოადიაბატის პარალელურ წირს. მიღებული წირი არის ატმოსფერულ ჰაერში აღმავალი ნაწილაკის მდგომარეობის მრუდი, რომლის მდებარეობაც განსაზღვრავს ატმოსფეროს სტაბილურობის ხარისხს (თუ ჰაერის ინვერსიული ან იზოთერმული განაწილება გვაქვს, მაშინ მშრალი ადიაბატის პარალელური წირი გაივლება არა დედამიწის ზედაპირიდან, არამედ ინვესიის ზედა წერტილიდან).

ნახ.3.3.1-ზე აგებული მდგომარეობის მრუდი ახასიათებს ადიაბატურად აღმავალი ჰაერის ნაწილაკის ტემპერატურის ცვლილებას სადაც გათვალისწინებულ იქნა ის ფაქტი, რომ როგორც წესი ჰაერი შეიცავს გარკვეული რაოდენობის წყლის ორთქლს და ადიაბატურად აღმავალი ჰაერის ნაწილაკის ტემპერატურის ცვლილება კონდესაციის დონემდე (სადაც ჰაერის ნაწილაკი აღწევს ნაჯერ მდგომარეობას), მიმდინარეობს მშრალადიაბატური კანონის მიხედვით, ხოლო კონდესაციის დონის ზემოთ ნოტიოადიაბატური კანონის მიხედვით. საზოგადოდ ცნობილია, რომ როგორც წესი სტრატეფიკაციისა და მდგომარეობის მრუდები ერთმანეთს არ ემთხვევიან, ამის შედეგად ადიაბატურად აღმავალი ნაწილაკის ტემპერატურა და

სიმკვრივე განსხვავდება ატმოსფეროს ტემპერატურისა და სიმკვრივისაგან, იმ შემთხვევაში თუ ყველა დონეზე მდგომარეობის მრუდი სტრატოფიკაციის მრუდის მარჯვნივაა, მაშინ არამდგრადობის ენერგია დადებითია, ატმოსფეროში დიდი დადებითი ენერგია ხელს უწყობს კონვექტიური ღრუბლების განვითარებას, დადებითი არამდგრადობის ენერგიის შემთხვევაში ხდება მძლავრი კონვექციური მოძრაობები და ინტენსიური თავსხმა წვიმები (ATSC 3032).

ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგრადობის ანალიზისათვის გამოვიყენოთ ნაწილაკის მეთოდი, სადაც ატმოსფეროს მდგომარეობის მაჩვენებელს წარმოადგენს ჰაერის ინდივიდუალური ნაწილაკის ყოფაქცევა. ატმოსფეროში იმ დონეზე, რომლის მახლობლათაც ვატარებთ ატმოსფეროს მდგომარეობის ანალიზს, გამოვყოთ ჰაერის ნაწილაკი და ვაიძულოთ იგი გადაადგილდეს საწყისი დონიდან ზევით ან ქვევით, იმისათვის, რომ ჰაერის ნაწილაკმა არ შეიტანოს არავითარი ცვლილება გარემომცველი ჰაერის სითბურ მდგომარეობაში აუცილებელია იგი ადიაბატურად გადავაადგილოთ, ამ შემთხვევაში ნაწილაკის ცვლილების მახასიათებელია მშრალადიაბატური გრადიენტი $\gamma_a = -\left(\frac{dT_i}{dz}\right)$ (მახლოებით $\gamma_a = 1^\circ\text{C}/100$ მ), ხოლო გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურის განაწილება შეიძლება დავახასითოთ ტემპერატურის ვერტიკალური გრადიენტით: $\gamma = -\left(\frac{dT_l}{dz}\right)$.

ზოგადად ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა მშრალადიაბატური მოძრაობის მიმართ შეიძლება იყოს სამი სახის: $\gamma > \gamma_a$ - ატმოსფეროს ტემპერატურა უფრო სწრაფად ეცემა, ვიდრე $1^\circ/100$ მ-ზე. დაშვების თანახმად თავდაპირველად ატმოსფეროს და ნაწილაკს ერთიდაიგივე ტემპერატურები აქვთ ($T_{l0} = T_{i0}$, T_{l0} -არის გარემოს ტემპერატურა საწყის დონეზე, ხოლო T_{i0} ნაწილაკის ტემპერატურა, თუ ნაწილაკს მშრალადიაბატურად გადავაადგილებთ ზემოთ, რაღაც z_2 დონეზე, ნაწილაკისა და გარემოს ტემპერატურები გახდება შესაბამისად T_{i2} , T_{l2} , გარდა ამისა ამ დონეზე ნაწილაკის ტემპერატურა მეტია გარემოს ტემპერატურაზე ($T_{i2} > T_{l2}$). ხოლო $\rho_{i2} < \rho_{l2}$ რადგან $\rho_i = \rho_l$.

ყოველ დონეზე ერთეულოვანი მოცულობის ჰაერის ნაწილაკზე მოქმედებს ორი ძალა: სიმძიმის ძალა, რომელიც ქვემოთაა მიმართული $-g\rho_i$ და არქიმედეს ძალა

– $g\rho_l$, რომელიც მიმართულია ვერტიკალურად ზემოთ. ამ ორი ძალის ტოლქმედი არის მცურაობის ძალა, რომელიც მიმართულია ზემოთ, როცა $\rho_l > \rho_i$ და ქვემოთ, როცა $\rho_l < \rho_i$. მცურაობის ძალის გავლენით ნაწილაკი დებულობს აჩქარებას, რომელიც გამოისახება შემდეგი ცნობილი დამოკიდებულებით (ხვედელიძე, 2002; მატვეევი, 1987):

$$\frac{d^2z}{dt^2} = g \frac{\rho_l - \rho_i}{\rho_i} = g \frac{T_i - T_l}{T_l},$$

ამ შემთხვევაში ნაწილაკი შეიძენს დადებით აჩქარებას, ვინაიდან $T_{i2} > T_{l2}$. ამრიგად, ნაწილაკი თუ გადაადგილებულ იქნა რაგინდ მცირე მანძილზე იძენს აჩქარებასა და სიჩქარეს, რომელიც მიმართულია იმ მხარეს საითაც მან მიიღო მოძრაობა საწყის მომენტში. ნაწილაკის სიჩქარე მით უფრო იზრდება, რაც უფრო შორს გადაადგილდება იგი საწყისი დონიდან, ე.ი. ნაწილაკის წონასწორობა საწყის მდგომარეობაში არამდგრადია. ამიტომ ატმოსფეროს სტრატეფიკაცია, როცა $\gamma > \gamma_a$, ატარებს მშრალად არამდგრადი სტრატეფიკაციის სახელწოდებას.

იმ შემთხვევაში, როცა $\gamma = \gamma_a$, ატმოსფეროში სიმაღლის მიხედვით ტემპერატურა ეცემა $1^0/100$ მ-ზე. ამ შემთხვევაში სამივე დონეზე $T_{io} = T_{lo}$, $\rho_{io} = \rho_{lo}$.

ამრიგად რა დონეზეც არ უნდა მდებარეობდეს ჰაერის ნაწილაკი, მისი მოძრაობის აჩქარება ყოველთვის ნულია. ატმოსფეროს თერმული მდგომარეობა, როცა $\gamma = \gamma_a$ ატარებს მშრალად განურჩეველი სტრატეფიკაციის სახელწოდებას

როცა $\gamma < \gamma_a$, ატმოსფეროში სიმაღლის მიხედვით ტემპერატურა უფრო ნელა ეცემა ვიდრე $1^0/100$ მ-ზე, ამ შემთხვევაში $T_{io} < T_{lo}$, $\rho_{io} < \rho_{lo}$. ნაწილაკს აქვს უარყოფითი აჩქარება და დაიწყებს გადაადგილებას საწყისი დონისაკენ. ე.ი. ნაწილაკი, როცა $\gamma < \gamma_a$, ყოველთვის ბრუნდება საწყის მდგომარეობაში. ატმოსფეროს მდგომარეობას, როცა $\gamma < \gamma_a$ –ზე ატარებს მშრალად მდგრადი სტრატეფიკაციის სახელწოდებას.

კოდესაციის დონის ზემოთ ჰაერის ნაწილაკი უკვე გაჯერებულ მდგომარეობაში იმყოფება, ამიტომ ამ დონეებზე ატმოსფეროს სტრატეფიკაცია უნდა შეფასდეს ნოტიოადაბატური პროცესის მიმართ. ამ დროს ისევე როგორც მშრალადაბატური პროცესის დროს შესაძლებელია არსებობდეს ატმოსფეროს სტრატეფიკაციის სამი

სხვადასხვა სახე: 1. $\gamma > \gamma'_a$ - ნოტიოარამდგრადი. 2. $\gamma = \gamma'_a$ - ნოტიოგანურჩეველი. 3. $\gamma < \gamma'_a$ - ნოტიომდგრადი. ხოლო მშრალადიაბატური და ნოტიოადიაბატური მოძრაობის მიმართ შესაძლებელია არსებობდეს ატმოსფეროს სტრატოფიკაციის შემდეგი ხუთი სახე: 1. $\gamma > \gamma_a > \gamma'_a$ - მშრალი და ნოტიოარამდგრადი ანუ აბსოლუტურად არამდგრადი; 2. $\gamma_a = \gamma > \gamma'_a$ - მშრალადგანურჩეველი და ნოტიოარამდგრადი; 3. $\gamma_a > \gamma > \gamma'_a$ - მშრალმდგრადი და ნოტიოარამდგრადი, ანუ პირობითად მდგრადი. 4. $\gamma < \gamma'_a < \gamma_a$ - მშრალ და ნოტიომდგრადი, ანუ აბსოლუტურად მდგრადი სტრატოფიკაცია (ხვედელიძე, 2002; მატვევი, 1987):

ყოველ დონეზე გარემოს სიმკვრივისაგან განსხვავებული სიმკვრივის მქონე ნაწილაკზე მოქმედებს მცურავობის ძალა. მუშაობა, რომელსაც ეს ძალა ასრულებს, ერთეულოვანი მასის მქონე ნაწილაკის dz ელემენტალურ მანძილზე ვერტიკალური გადაადგილების დროს ტოლია:

$$dE_i = g \frac{T_i - T_l}{T_l} dz \quad (3.3.1)$$

ვისარგებლოთ სტატიკის ძირითადი განტოლებით და (3.3.1) ფორმულა გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$dE_i = -R(T_i - T_l) \frac{dp}{p},$$

$$E_i = -R \int_{LFC}^{EL} (T_i - T_l) \frac{dp}{p} \quad (3.3.2)$$

თავისუფალი კონვექციის დონიდან (LFC) ზედა საზღვრამდე (EL) ჰაერის ერთეულოვანი მასის ადიაბატურად ასვლის დროს ძალის მიერ შესრულებული E_i მუშაობა ატარებს ამ ფენის არამდგრადობის ენერჯის სახელწოდებას. LFC (Level of Free convection)- თავისუფალი კონვექციის დონე არის დონე, რომლის ზემოთაც გარემოს ტემპერატურა უფრო სწრაფად ეცემა, ვიდრე ნაწილაკის ტემპერატურა. EL (Equilibrium Level)-არის დონე, რომელზედაც გარემოს ტემპერატურა უტოლდება ნაწილაკის ტემპერატურას.

არამდგრადობის ენერჯის ნიშნის მიხედვით შესაძლოა არსებობდეს სამი სხვადასხვა შემთხვევა:

1. ყველა დონეზე მდგომარეობის მრუდი სტრატეფიკაციის მრუდის მარჯვნივაა. მაშინ ყველა დონეზე $T_i > T_l$ და (3.3.2) ფორმულის თანახმად $E_i > 0$, ე.ი არამდგრადობის ენერგია დადებითია. ამ დროს ატმოსფეროს ქვედა ფენებში სტრატეფიკაცია, როგორც წესი არამდგრადია ($\gamma > \gamma_a$), არამდგრადობის დიდი დადებითი ენერგია ხელს უწყობს ატმოსფეროში მძლავრი კონვექციური მოძრაობის განვითარებას.
2. მდგომარეობის მრუდი სტრატეფიკაციის მრუდის მარცხნივაა ყველა დონეზე. მაშინ ნებისმიერ დონეზე $T_i < T_l$ და არამდგრადობის ენერგია უარყოფითია, ე.ი. $E_i < 0$, ამ შემთხვევაში ნაწილაკის ზემოთ მოძრაობა გაძნელებულია ან მთლიანად გამორიცხული, ატმოსფეროში კონვექციური მოძრაობები არ დაიკვირვება.
3. მდგომარეობის მრუდი მდებარეობს სტრატეფიკაციის მრუდის მარჯვნივ ერთ ფენაში და მარცხნივ- მეორეში. ამ შემთხვევაში არამდგრადობის ენერგია დადებითია პირველსა და უარყოფითი მეორე ფენებში. არამდგრადობის ენერგიის საერთო მარაგი მოიძებნება, როგორც ცალკეული ფენების არამდგრადობის ენერგიათა ალგებრული ჯამი.

თუ ჰაერის ნაწილაკის მასა არის $\rho_{parcel} V$, მაშინ მისი აჩქარება გამოისახება ფორმულით (Blanchard, 1998; ATSC 3032):

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{g\Delta\rho V}{\rho_{parcel} V} = -\frac{g\Delta\rho}{\rho_{parcel}},$$

სადაც $\Delta\rho$ არის აირის ნაწილაკისა და გარემომცველი გარემოს სიმკვრივეთა სხვაობა, შესაბამისად. ეს უკანასკნელი ტოლობა გადაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{parcel}} = \frac{\rho_{parcel} - \rho_{env}}{\rho_{parcel}} = -\left(\frac{T_{v,parcel} - T_{v,env}}{T_{v,env}}\right) \quad (3.3.3)$$

სადაც T_v არის ჰაერის ვირტუალური ტემპერატურა.

როცა ჰაერის ნაწილაკი აიწევს თავისუფალი კონვექციის დონემდე (*LFC-მდე*), (3.3.3)–ის თანახმად ერთეულოვანი მასის აირის ნაწილაკის მიერ შესრულებული მუშაობა გამოითვლება შემდეგი (3.3.4) ფორმულით:

$$\frac{W}{m} = \int_{LFC}^{z_{max}} \frac{F}{m} dz = \int_{LFC}^{z_{max}} a dz = - \int_{LFC}^{z_{max}} g \frac{\Delta \rho}{\rho} dz = \int_{LFC}^{z_{max}} g \frac{T_{parcel} - T_{env}}{T_{env}} dz \equiv CAPE, \quad (3.3.4)$$

ეს ენერგია მოცემული (3.3.4)–ით ცნობილია, როგორც ატმოსფეროს არამდგრადობის ენერგია (*CAPE*). z_{max} ატმოსფეროს ფენა, რომლის ზემოთაც გარემოს ტემპერატურა მეტია ნაწილაკის ტემპერატურაზე. ძლიერი კონვექციის დროს იგი ახლოს არის ტროპოპაუზის სიმაღლესთან.

(3.3.4) ტოლობა შეიძლება ჩაიწეროს უფრო გამარტივებული სახით. თუ ჰაერის ნაწილაკს დასაწყისში აქვს ისეთი სიჩქარე, რომ იგი ადის თავისუფალი კონვექციის დონემდე *LFC*, ხოლო z_{max} სიმაღლეზე მისი სიჩქარე არის $w(z_{max})$, მაშინ შეიძლება დავწეროთ შემდეგი ტოლობა:

$$\frac{1}{2} m w^2(z_{LFC}) + W = \frac{1}{2} m w^2(z_{max})$$

თუ ვერტიკალური სიჩქარე *LFC*-დონეზე არის მცირე და იგი შეგვიძლია უგულებელვყოთ მაშინ:

$$W = \frac{1}{2} m w^2(z_{max}), \text{ ანუ } \frac{W}{m} = \frac{1}{2} w^2(z_{max}) = CAPE$$

შესაბამისად,

$$w(z_{max}) = \sqrt{2 CAPE}, \quad (3.3.5)$$

ფორმულა (3.3.5) შესძლებელია გამოყენებულ იქნას არამდგრადობის ენერგიისა და მაქსიმალურ სიმაღლეზე ქარის აღმავალი სიჩქარის ურთიერთდამოკიდებულების ანგარიშისთვის.

ამრიგად, *CAPE* შესაძლებელია გამოიყენებულ იქნას პროგნოზირებისათვის, დღის მეორე ნახევარში რა სიძლიერის კონვექცია არის მოსალოდნელი და დილის რადიოზონდის მონაცემების მიხედვით შეიძლება შეფასდეს *CAPE*–ს მნიშვნელობები (ცხრ.3.3.1.).

ცხრ.3.3.1. არამდგრადობის ენერჯის CAPE-ს და ჰაერის ვერტიკალური სიჩქარის (აღმავალი ნაკადის) რიცხვითი მნიშვნელობების შესაბამისად ატმოსფეროს მდგომარეობის კლასიფიკაცია.

CAPE value (J)	Updraft velocity (m/sec)	Convective potential
0	0	Stable
0-1000	0-43	Marginally Unstable
1000-2500	43-70	Moderately Unstable
2500-3600	70-84	Very Unstable
3600 +	>84	Extremely Unstable

ცხრილი 3.3.1–ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ აღმავალი დინებების 43-70მ/წმ ის შემთხვევაშიც კი ატმოსფეროს მდგომარეობა უკვე არამდგრადია, თუმცა პრაქტიკაში CAPE-ს უფრო მცირე მნიშვნელობებისთვისაც კი ხშირად ატმოსფეროს მდგომარეობა უკვე არამდგრადია რაც კარგად ჩანს აეროლოგიური დიაგრამებზე.

აეროლოგიური დიაგრამაზე თუ მდგომარეობის მრუდი სტრატეფიკაციის მრუდის მარცხნივაა, მაშინ არამდგრადობის ენერჯია უარყოფითია, ამ შემთხვევაში ნაწილაკის ზემოთ მოძრაობა გაძნელებულია და კონვექტიური მოძრაობებიც თითქმის არ დაიკვირვება. ხოლო იმ შემთხვევაში თუ მდგომარეობის მრუდის ნაწილი სტრატეფიკაციის მრუდის მარცხნივ დაიკვირვება, ხოლო ნაწილი მარჯვნივ, მაშინ არამდგრადობის ენერჯია იქნება მათი ალგებრული ჯამი.

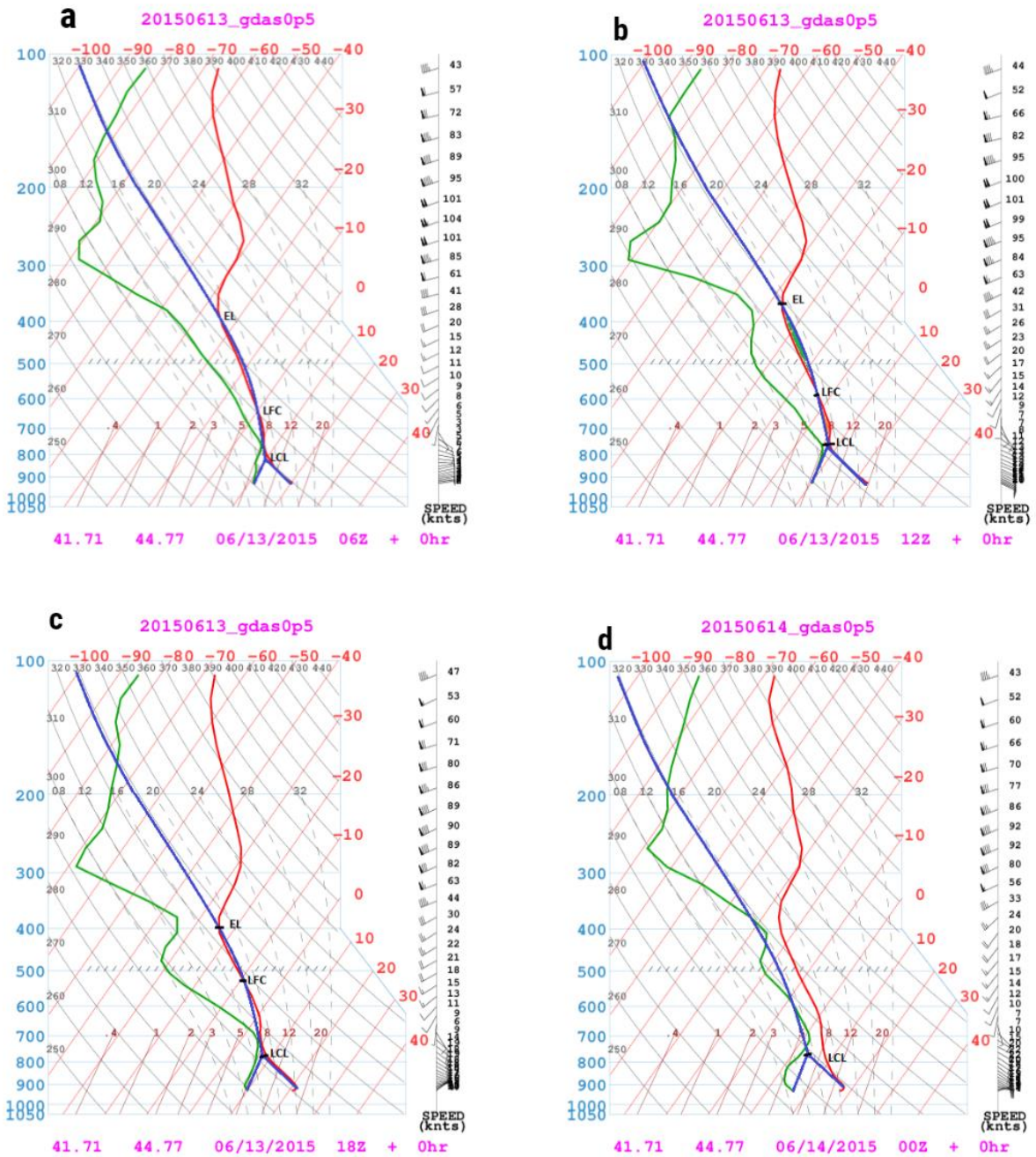
3.4 Ready სისტემის აეროლოგიური დიაგრამებით ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის შეწავლა.

Ready სისტემის აეროლოგიური დიაგრამებით შევაფასეთ რამოდენიმე დღის ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა (ძირითადად არამდგრადობის

ენერჯის CAPE საფუძველზე), არჩეულ დღეებში აღმოსავლეთ საქართველოს უმეტეს რაიონებში დაფიქსირებული იყო ძლიერი ნალექი (ძლიერი წვიმა და სეტყვა).

ნახ.3.4.1. –ზე წარმოდგენილია 2015 წლის 13 ივნისის (თბილისის დროით 10:00 სთ) აეროლოგიური დიაგრამები თბილისის ზოოპარკის ტერიტორიისათვის (გეოგრაფიული კოორდინატებით $41^{\circ}.71' N$, $44^{\circ}.77' E$) დროის სხვადასხვა მომენტისთვის (13 ივნისის a-06 UTC, b-12 UTC, c-18 UTC, d-14 ივნისის 00 UTC). ატმოსფეროს თერმული მდგომარეობის შესაფასებლად თითოეულ სურათზე, ლურჯი უწყვეტი წირით გამოსახულია ჩვენს მიერ აგებული მდგომარეობის მრუდები. როგორც ნახ.3.4.1(a) - დიაგრამიდან ჩანს 06 UTC დროის მომენტისათვის LFC- დონიდან EL- დონემდე არამდგრადობის ენერჯია (CAPE) მცირეა (Микашавидзе & Нозадзе.,1969). არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობა (ARL-ის READY სისტემის არქივიდან აღებული 1.0° ჰორიზონტალური რეზოლუციით) $CAPE=55.6$ ჯ/კგ მცირეა, რაც შეესაბამება სუსტი არამდგრადობის მდგომარეობას (ცხრ.3.3.1). როგორც ამ სურათიდან ჩანს, ატმოსფეროს ზედა ფენებში 100 მზ ზედაპირის სიმაღლემდე, ნაწილაკის მდგომარეობის მრუდი თითქმის მიჰყვება სტრატოფიკაციის მრუდს, რაც გვიჩვენებს რომ ატმოსფეროს მდგომარეობა ნაწილობრივ განურჩეველია, ხოლო ქვედა ფენებში გვაქვს სტაბილური მდგომარეობა, რაზეც მიუთითებს კონვექციური ჩახშობის ენერჯიაც $CINH=-9.4$ ჯ/კგ. ნახ.3.4.1(b)-ზე გამოსახულია აეროლოგიური დიაგრამა 13 ივნისის 12:00 UTC დროისათვის (თბილისის დროით 16:00 სთ) იგივე გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის. როგორც ამ სურათიდან ჩანს კონდესაციის დონის ზემოთ გარკვეულ სიმაღლემდე მდგომარეობის მრუდმა ოდნავ გადაინაცვლა სტრატოფიკაციის მრუდის მარჯვენა მხარეს, რაც გამოიხატა არამდგრადობის ენერჯის გაზრდაში $CAPE=109.6$ ჯ/კგ და ჩახშობის ენერჯის შემცირებაში $CINH=-7.9$ ჯ/კგ. ადგილობრივი დროით 10 საათისათვის (18 UTC) არამდგრადობის ენერჯის მნიშვნელობა მნიშვნელოვნად შემცირდა, ამ დროისათვის $CAPE=48$ ჯ/კგ (ნახ.3.4.1 (c)). თუ ამ მონაცემებს შევადარებთ 14 ივნისის დილის 4 საათის მონაცემებს (00 UTC) (ნახ.3.4.1(b)), ვნახავთ, რომ მდგომარეობის მრუდი ყველა დონეზე

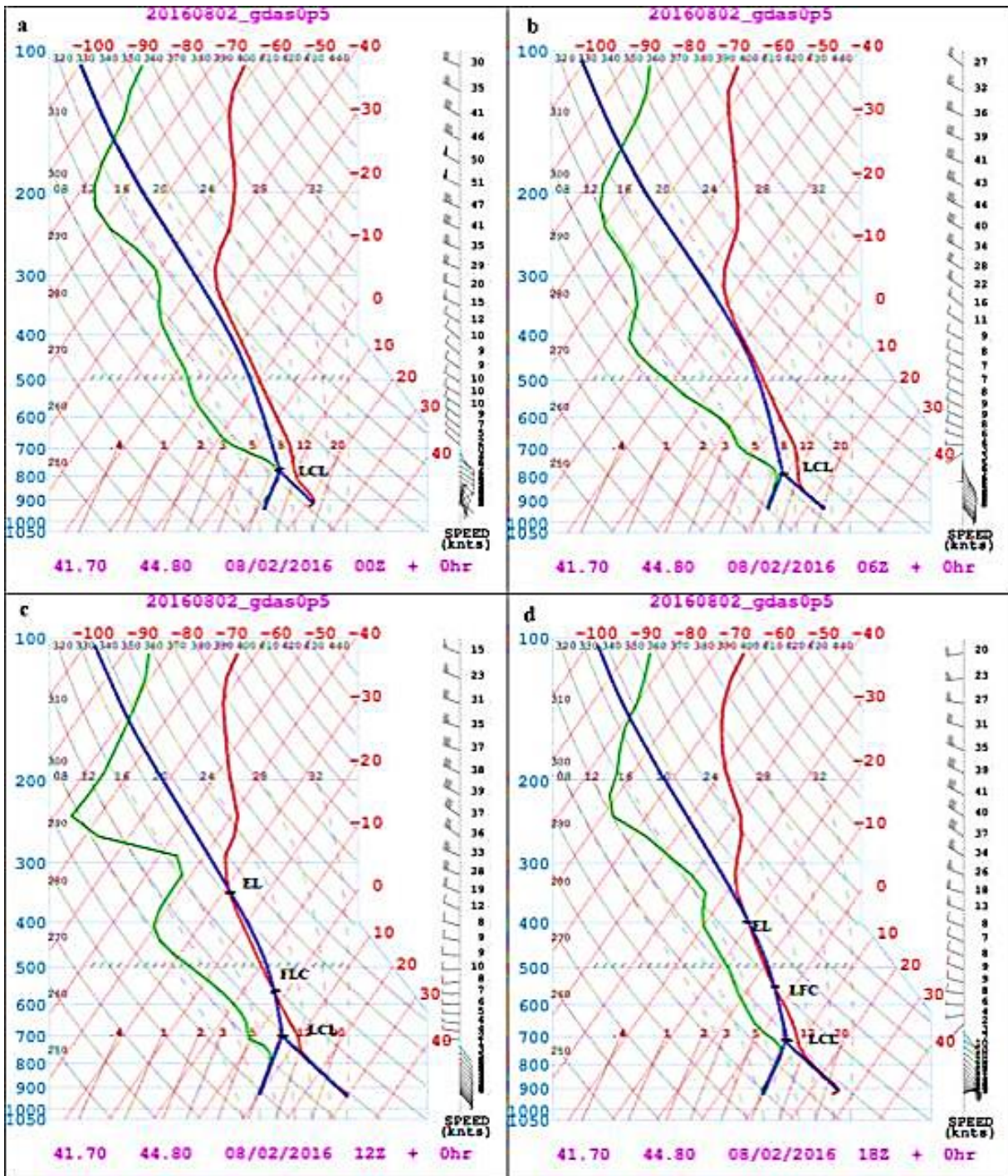
სტრატეგიკაციის მრუდის მარცხნივ მდებარეობს, რაც ნიშნავს, რომ ამ დროისთვის ატმოსფეროს მდგომარეობა აბსოლუტურად სტაბილურია, ხოლო ამ დროისათვის ენერგიების რიცხვითი მნიშვნელობები $CAPE=0$, $CINH=0$, რაც კარგად ემთხვევა ნახ.3.4.1დ-ზე მიღებულ მონაცემებს. ამგვარად, როგორც ცხრ.3.4.1-დან ჩანს 09-15 UTC დროის შუალედისთვის პროგნოზული ატმოსფეროს არამდგრადობის ენერგიის მნიშვნელობა (CAPE) აღმოჩნდა მაქსიმალური ხოლო კონვექციური ჩახშობის ენერგია (CINH) მინიმალური. რადარის მონაცემების მიხედვით კი ღრუბლის მაქსიმალური სიძლიერე დაფიქსირდა უფრო გვიან 18 UTC დროისათვის, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ 13 ივნისს განვითარებული ატმოსფერული პროცესი არ უკავშირდებოდა ფრონტის გავლას, ეს პროცესი იყო სუფთა ლოკალური ხასიათის, არამდგრადი სტრატეგიკაციის პირობებში მოხდა თბილი ჰაერის მასების ვერტიკალური აღმასვლა (კონვექცია), რის შედეგადაც განვითარდა ძლიერი კონვექციური ღრუბელი, რომელიც არსებობდა მხოლოდ რამდენიმე წუთის განმავლობაში. პროცესის სიძლიერიდან გამომდინარე შეიძლება ვთქვათ, რომ ამ დღის ატმოსფერული პროცესის სიძლიერის შეფასება ვერ მოხდა ვერც ARL- READY სისტემის მიერ მიღებული აეროლოგიური მონაცემების საფუძველზე, თუმცა, როგორც ცხრ.3.4.1-დან ჩანს ARL- READY სისტემამ მაინც გვიჩვენა სუსტი არამდგრადობა 09-15 UTC დროის შუალედისთვის.



ნახ.3.4.1 2015 წლის 13 ივნისის აეროლოგიური დიაგრამები.

ნახ.3.4.2.–ზე წარმოდგენილია თბილისისათვის (გეოგრაფიული კოორდინატებით $41^{\circ}70'N$, $44^{\circ}80'E$) 2016 წლის 2 აგვისტოს აეროლოგიური დიაგრამები დროის სხვადასხვა მომენტისათვის (a- 00 UTC, b - 06 UTC, c- 12 UTC, d- 18 UTC). როგორც ნახ.3.4.2–დან ჩანს, 00 UTC დროიდან მოყოლებული არამდგრადობის ენერჯია (CAPE) მთელი დღის განმავლობაში სწრაფად იზრდება და მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს 12 UTC დროისათვის (CAPE=378 ჯ/კგ). ხოლო CINH ენერჯია

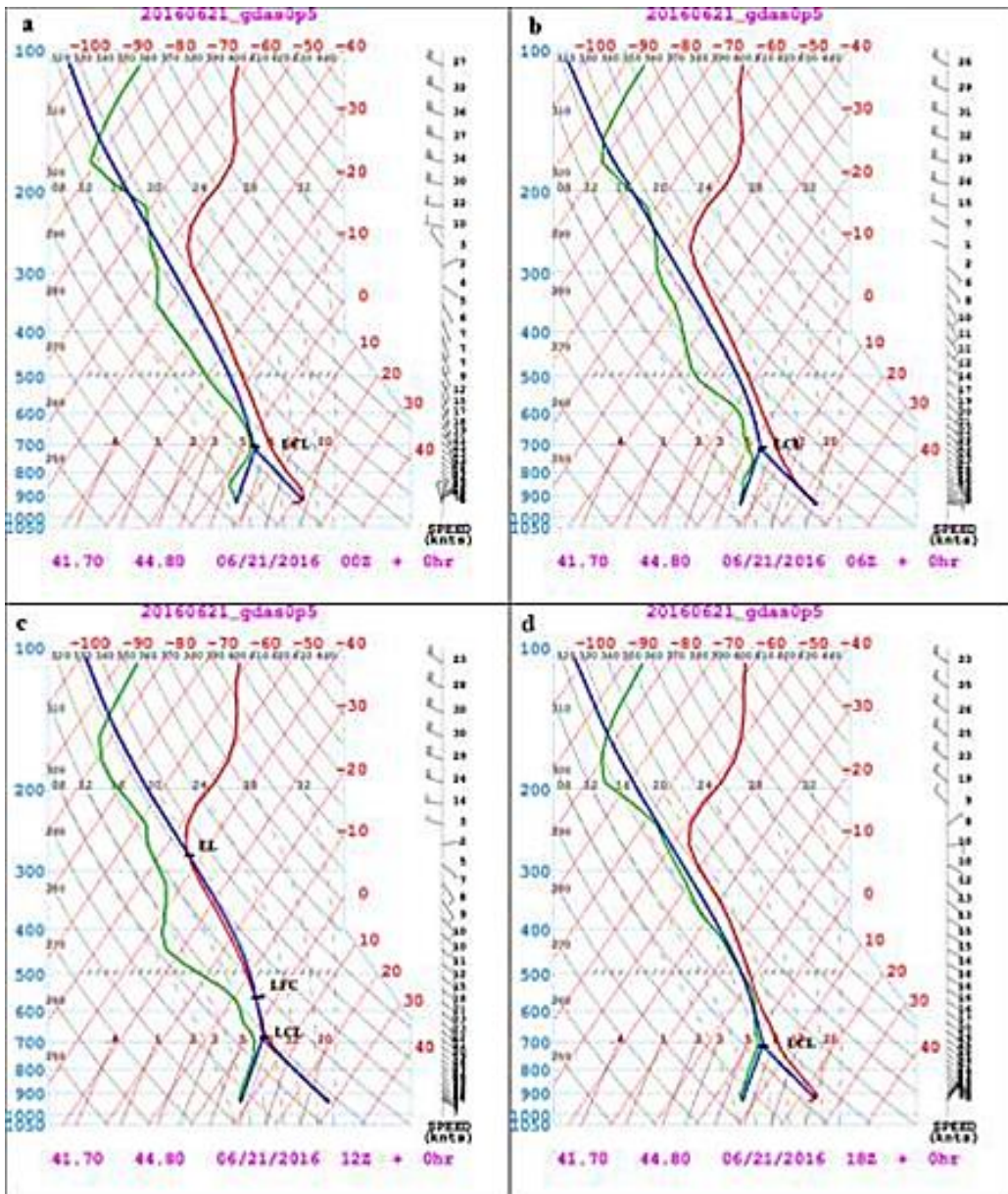
დღის განმავლობაში ნელა იცვლება და მინიმალურია 18 UTC (თბილისის დროით 22:00 საათისათვის) (ნახ.3.4.2). ნახ.3.4.2(b)-ზე წარმოდგენილია იგივე გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის 2 აგვისტოს 06 UTC აეროლოგიური დიაგრამა. როგორც სურათიდან ჩანს ატმოსფეროს ქვედა ფენებში მდგომარეობა სტაბილურია, ხოლო ზედა ფენებში გვაქვს განურჩეველი მდგომარეობა. ამ დროისათვის $CAPE=93$ ჯ/კგ, $CINH=-45$ ჯ/კგ. ნახ.3.4.2(c)-ზე წარმოდგენილია იგივე გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის 2 აგვისტოს აეროლოგიური დიაგრამა 12:00 UTC დროით (თბილისის დროით 16:00 სთ). როგორც სურათიდან ჩანს კონდესაციის დონის ზემოთ გარკვეულ სიმაღლემდე მდგომარეობის მრუდმა გადაინაცვლა სტრატოფიკაციის მრუდის მარჯვნივ, რაც ნიშნავს რომ გაიზარდა არამდგრადობის ენერგია $CAPE=378$ ჯ/კგ, ხოლო შემცირდა $CINH=-43$ ჯ/კგ ენერგია. ნახ.3.4.2(c)-ზე ადგილობრივი დროით 10 საათისათვის (18 UTC) არამდგრადობის ენერგიის მნიშვნელობა შემცირდა, ამ დროისათვის $CAPE=75$ ჯ/კგ, ამავე დროს ატმოსფეროს ქვედა ფენებში შემცირდა უარყოფითი ენერგიაც $CINH = -26$ ჯ/კგ. აეროლოგიური მონაცემების ანალიზმა და არამდგრადობის ენერგიის რიცხვითი მნიშვნელობების განხილვამ (ცხრ.3.4.1) გვიჩვენა, რომ ამ შემთხვევაში 09-15 UTC დროის შუალედისთვის ატმოსფეროს არამდგრადობის ენერგია (CAPE) მაქსიმალურია რაც ემთხვევა 2016 წლის 2 აგვისტოს მეტეოროლოგიური რადარის რეალურ მონაცემებს.



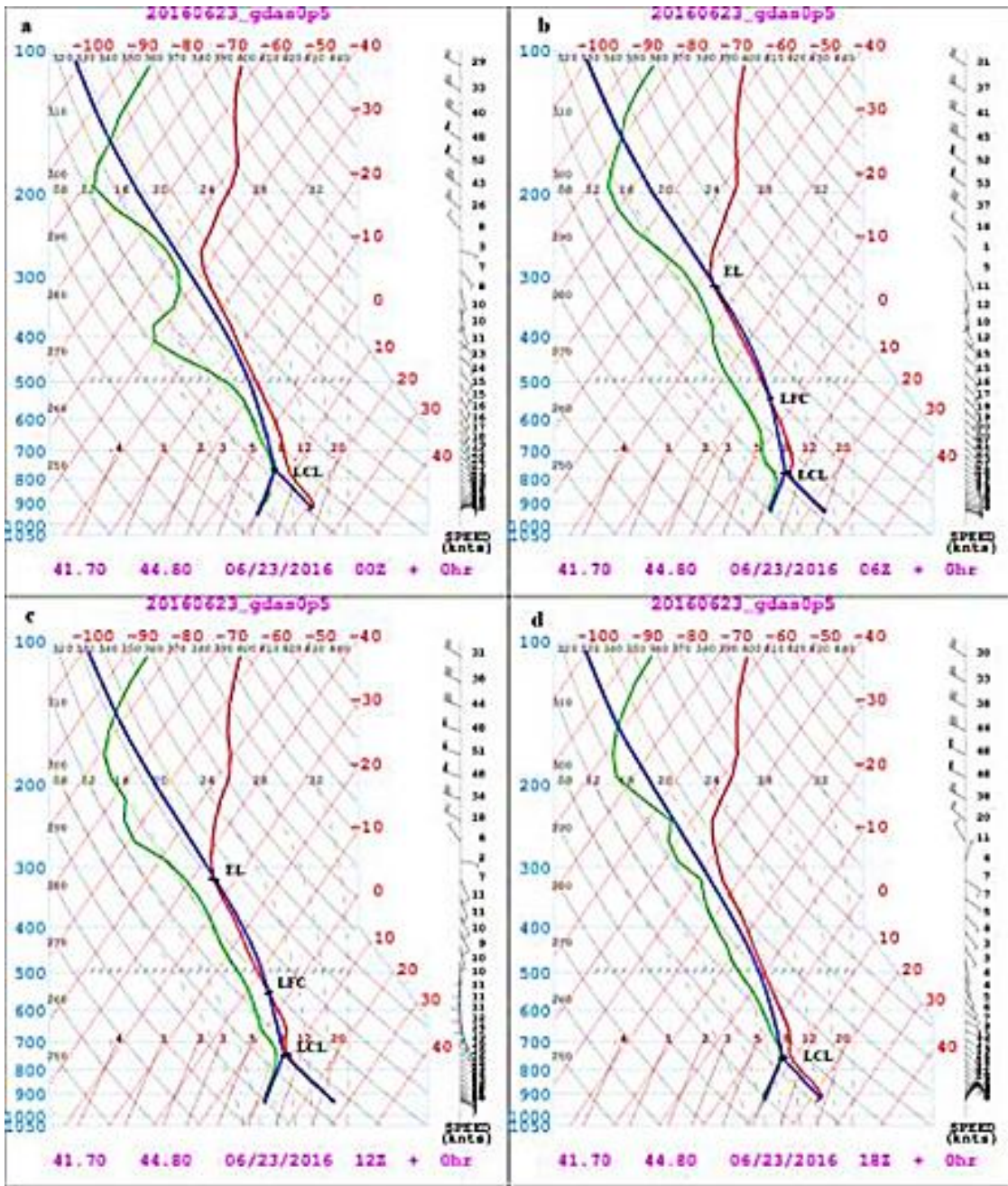
ნახ. 3.4.2. 2016 წლის 2 აგვისტოს აეროლოგიური დიაგრამები.

აეროლოგიური დიაგრამების მიხედვით 2016 წლის 21 ივნისს ატმოსფეროს არამდგრადობა დაფიქსირდა მხოლოდ 12 UTC დროისათვის. ხოლო დანარჩენ შემთხვევაში ატმოსფეროს მდგომარეობა აბსოლუტურად სტაბილურია. ნახ.3.4.3-ზე წარმოდგენილია 2016 წლის 21 ივნისის აეროლოგიური დიაგრამები თბილისისათვის (გეოგრაფიული კოორდინატებით 41^o.70’N, 44^o.80’E) სხვადასხვა დროით (a- 00 UTC,

b - 06 UTC, c- 12 UTC, d- 18 UTC). როგორც ნახ.3.4.3 (a,b,d)- დან ჩანს 00 UTC, 06 UTC, 18 UTC დროისათვის ატმოსფეროს მდგომარეობა აბსულუტურად სტაბილურია და ენერგიების რიცხვითი მნიშვნელობები ამ დროისათვის CAPE=CINH=0 ჯ/კგ. ხოლო 12 UTC დროისათვის არამდგრადობის ენერგია CAPE=349 ჯ/კგ, ხოლო კონვექციური ჩახშობის ენერგია CINH=-32 ჯ/კგ. ზემოთ განხილული შემთხვევების ანალოგიურად 2016 წლის 21 ივნისს ატმოსფეროში თერმოდინამიკური არამდგრადობა დაფიქსირდა 09-15 UTC დროის შუალედისათვის, რაც ზუსტად ემთხვევა რადარის მონაცემების მიხედვით ატმოსფერული პროცესის მიმდინარეობის დროს.



ნახ.3.4.3. 2016 წლის 21 ივნისის აეროლოგიური დიაგრამები.



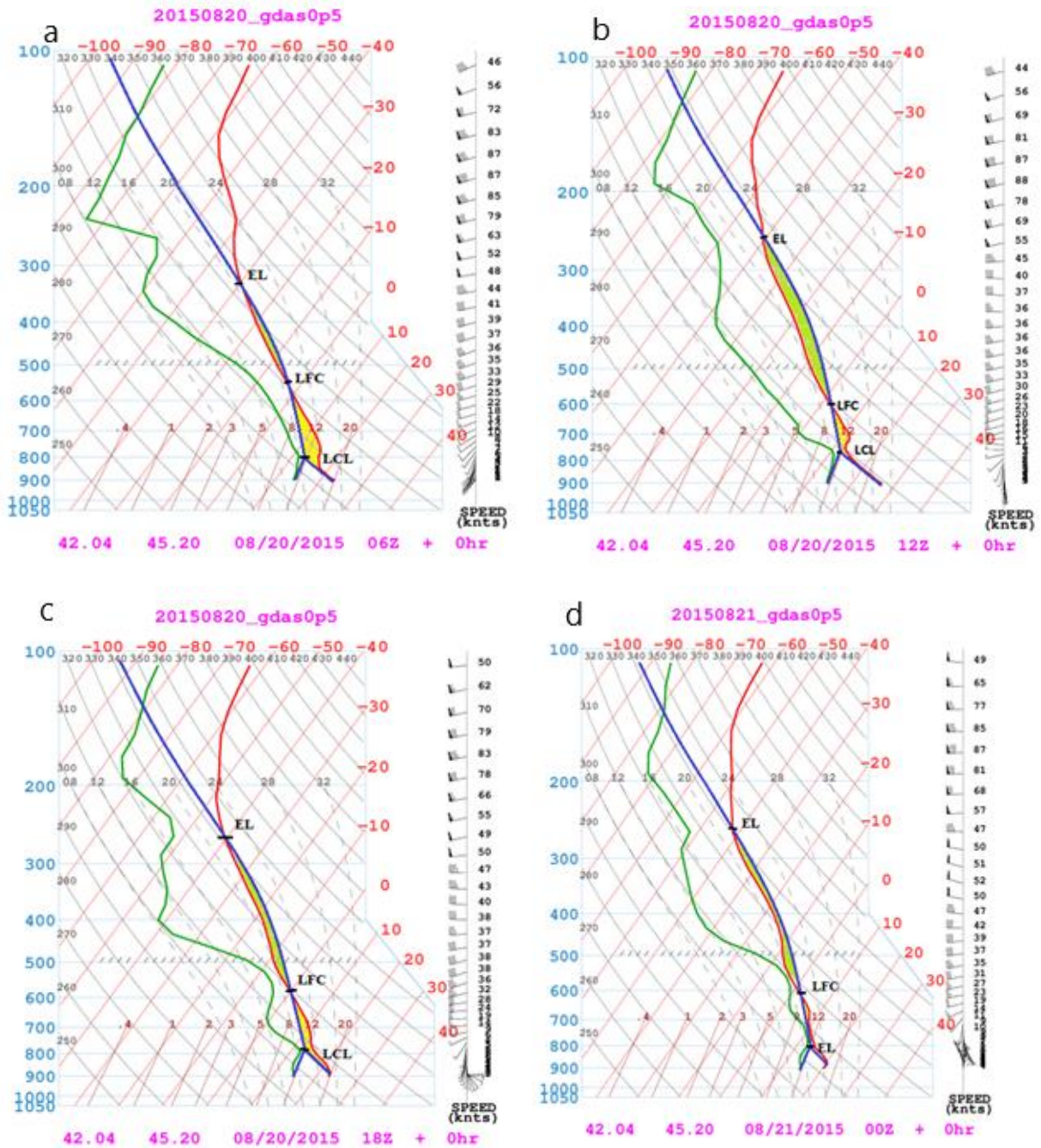
ნახ.3.4.4. 2016 წლის 23 ივნისის აეროლოგიური დიაგრამები.

დაახლოებით ანალოგიური ატმოსფეროს თერმოდინამიკური სიტუაცია განმეორდა 2016 წლის 23 ივნისს. მართლაც, აეროლოგიური დიაგრამების მიხედვით 00 UTC დროისათვის ატმოსფეროს მდგომარეობა აბსოლუტურად სტაბილურია (ნახ.3.4.4(a)), არამდგრადობის ენერჯისა და კონვექციური ჩახშობის ენერჯების რიცხვითი მნიშვნელობები $CAPE = CINH = 0$ ჯ/კგ, რაც აგრეთვე შეესაბამება მდგრადი

ატმოსფეროს მდგომარეობას. 06:00 UTC დროისათვის ატმოსფეროში გაიზარდა არამდგრადობის ენერგია (ნახ.3.4.4(b)), მისი რიცხვითი მნიშვნელობა $CAPE=60$ ჯ/კგ, ხოლო $CINH=-28$ ჯ/კგ. ატმოსფეროს არამდგრადობა დღის განმავლობაში იზრდება და მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს 12 UTC დროისათვის ნახ.3.4.4(c), ცხრ.3.4.1-დან ჩანს, რომ 09-15 UTC დროისთვის არამდგრადობის ენერგიის რიცხვითი მნიშვნელობა მაქსიმალურია. 18 UTC დროისათვის ატმოსფეროს მდგომარეობა აბსოლუტურად სტაბილურია $CAPE=0$ (ცხრ.3.4.1).

2015 წლის 20-21 აგვისტოს სინოპტიკური რუკების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ დასავლეთიდან შემოსული ატმოსფერული ფრონტი კიდევ უფრო გაძლიერდა საქართველოს ტერიტორიის ჩრდილო-აღმოსავლეთ საზღვარზე. რაც აიხსნება როგორც კავკასიონის არაერთგვაროვანი რელიეფის გავლენით, ასევე შიდა მასიური პროცესების განვითარებით, რის შედეგადაც აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონში (ახმეტა, ყვარელი, ლაგოდეხი) განვითარდა კონვექციური ღრუბლები. ამ რეგიონებში ძლიერი სეტყვისა და თავსხმა წვიმის შედეგად დაზარალდა სასოფლო სამეურნეო პროდუქტები. Noaa –ს ARL Ready სისტემის საშუალებით ჩვენ შევამოწმეთ 2015 წლის 20-21 აგვისტოს ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონისთვის (ახმეტა, ყვარელი, ლაგოდეხი), კერძოდ იმ გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის სადაც რადარის მონაცემების მიხედვით ადგილი ჰქონდა ფრონტალურ პროცესებს (ნახ.3.4.5(a-d)). ნახ.3.4.5b–ზე მოცემულია ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა 2015 წლის 20 აგვისტოს 12 UTC (თბილისის დროით 16:00 საათისათვის). როგორც სურათიდან ჩანს არამდგრადობის ენერგია 06 UTC დროსთან შედარებით გაზრდილია, ხოლო კონვექციური ჩახშობის ენერგია შემცირებულია. ნახ.3.4.5(c,d) გვიჩვენებს ატმოსფეროს თერმოდინამიკურ მდგომარეობას შესაბამისად 18:00 და 24:00 UTC დროისათვის. როგორც სურათებიდან ჩანს არამდგრადობის ენერგია $CAPE$ შემცირებულია ორივე შემთხვევაში, ხოლო კონვექციური ჩახშობის ენერგია $CINH$ კი გაზრდილია. ზოგადად შეიძლება ვთქვათ, რომ მთელი დღის განმავლობაში

(2015 წლის 20 აგვისტოს) გვაქვს სუსტი არამდგრადობა, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ არამდგრადობის ენერგია CAPE ყველაზე დიდია 12 UTC დროისათვის.



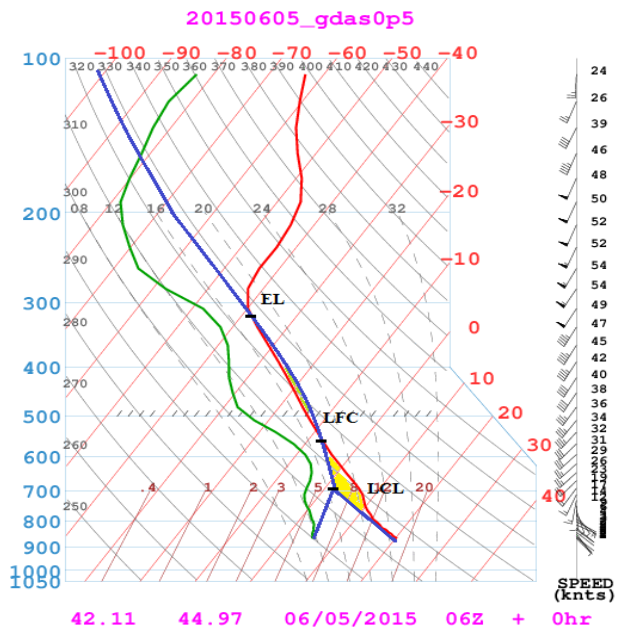
ნახ.3.4.5. 2015 წლის 20 აგვისტოს აეროლოგიური დიაგრამები.

ნახ.3.4.6.-ზე წარმოდგენილია აეროლოგიური დიაგრამა, რომელიც ასახავს 2015 წლის 5 ივნისის 10:00 საათისათვის (თბილისის დროით) $42^{\circ}.11' N$, $44^{\circ}.97' E$ გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის (თიანეთი) ატმოსფეროს თერმოდინამიკურ მდგომარეობას. როგორც ნახ.3.4.6-დან ჩანს, ატმოსფეროს მდგომარეობა ამ

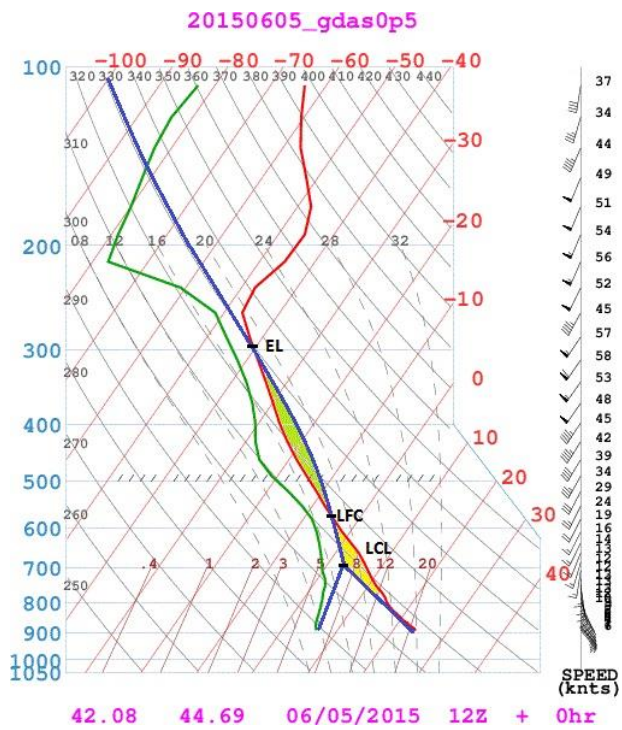
დროისათვის სუსტად არამდგრადია. ნახ.3.4.7-ზე წარმოდგენილია 16:00 საათისთვის ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა 2015 წლის 5 ივნისის 16:00 საათისათვის (თბილისის დროით) $42^{\circ}.08' N$, $44^{\circ}.69' E$ გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის (დუშეთი). როგორც ჩანს 16:00 (თბილისის დროით) საათისათვის აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით გვაქვს ძლიერი არამდგრადობა განსაკუთრებით დუშეთის რაიონში, ამავე დროს რადარის მონაცემების მიხედვით 16:56 სთ-სათვის დუშეთისა და თიანეთის რაიონის ტერიტორიაზე ყველაზე ძლიერია ღრუბელთა სისტემა.

19:03 საათისათვის კი ღრუბელთა სისტემა სუსტდება, თუმცა დუშეთისა და თიანეთის რაიონებში რადარის მონაცემების მიხედვით ამ დროს ნალექი მოდის თქეში წვიმის სახით. ხოლო აეროლოგიური საპროგნოზო მონაცემების მიხედვით ამ დროისათვის დუშეთის რაიონის ტერიტორიაზე გვაქვს სუსტი არამდგრადობა რაც ემთხვევა რადარის სურათებიდან მიღებულ ანალიზის შედეგებს. ხოლო 22:00 საათისათვის რადარის მონაცემების მიხედვით კონვექციური ღრუბლები არ დაიკვირვება, ხოლო აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით ამ დროისათვის ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა აბსოლუტურად მდგრადია (ნახ.3.4.9).

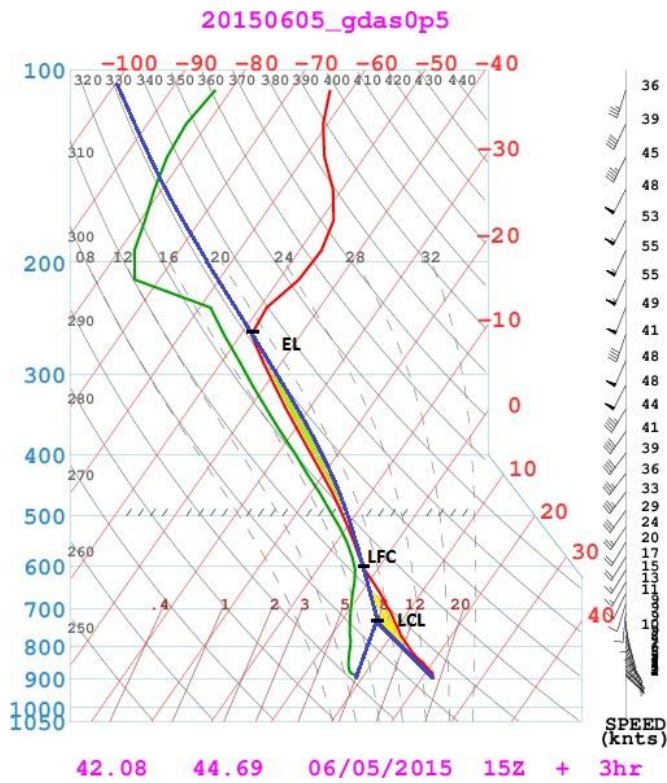
ზოგადად შეიძლება ვთქვათ, რომ 2015 წლის 5 ივნისს დაიკვირვებოდა ძლიერი ფრონტალური პროცესები (განსხვავებით 22 ივლისისაგან). სწორედ ამიტომ აეროლოგიურმა დიაგრამამ ზუსტად დააფიქსირა მთელი დღის განმავლობაში ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა.



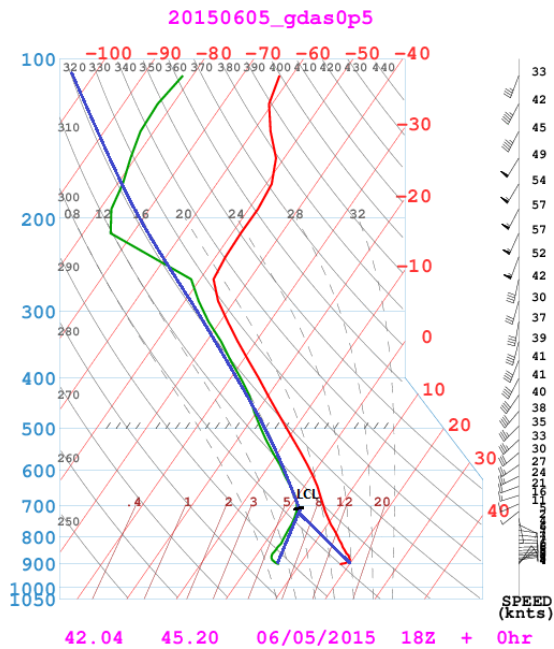
ნახ.3.4.6. აეროლოგიური დიაგრამა (2015 წლის 5 ივნისის 06 UTC).



ნახ.3.4.7. აეროლოგიური დიაგრამა (2015 წლის 5 ივნისის 12 UTC).



ნახ.3.4.8. აეროლოგიური დიაგრამა (2015 წლის 5 ივნისის 15 UTC).



ნახ.3.4.9. აეროლოგიური დიაგრამა (2015 წლის 5 ივნისის 18 UTC).

მიღებული შედეგების შესამოწმებლად ზემოთ განხილული შემთხვევების გარდა მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემებით დამატებით შევარჩიეთ 2015-2019

წლებში აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონში განვითარებული საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების რამოდენიმე შემთხვევა. შერჩეული პროცესების დროს აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონში ძლიერი წვიმისა და სეტყვისაგან მნიშვნელოვნად დაზარალდა საქართველოს მოსახლეობა, დაიტბორა სახლები, განადგურდა სასოფლო-სამეურნეო პროდუქტები. აქ განხილულია მხოლოდ ლოკალური ხასიათის ატმოსფერული პროცესების არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობები დროის 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC მომენტებისთვის (ცხრ.3.4.1-3.4.4). CAPE-ს ცვლილების მეტი თვალსაჩინოებისათვის 5 წლიანი მნიშვნელობები დაყვავით 3 ნაწილად 1. არამდგრადობის ენერჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა (დღის განმავლობაში) ნაკლებია 300 ჯ/კგ. 2. არამდგრადობის ენერჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა იცვლება 300-დან 800 ჯ/კგ-მდე. 3. არამდგრადობის ენერჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა მეტია 800 ჯ/კგ. ცხრ. 3.4.1-3.4.4 გვიჩვენებს, რომ CAPE რიცხვითი მნიშვნელობები, ყველა განხილული დღეებისათვის განსხვავებულია, თუმცა ყველა განხილული შემთხვევისათვის არამდგრადობის ენერჯის მაქსიმალური მნიშვნელობები დაფიქსირდა 09UTC – 15UTC დროის შუალედში, განხილული დღეებისათვის სწორედ დროის ამ შუალედში მოიმატა მიწის ზედაპირზე ტემპერატურამ (ადგილობრივი დროით 13 სთ-დან 19 სთ-მდე) და ხელსაყრელი თერმოდინამიკური არამდგრადობის პირობებში ადგილი ჰქონდა ჰაერის მასების ვერტიკალურ აღმასვლას და ლოკალურ ტერიტორიაზე კონვექციური დრუბლების ჩამოყალიბებას. რადარის მონაცემების მიხედვით კი ლოკალური კონვექციური პროცესების ჩამოყალიბება ხდება ძირითადად იგივე დროის შუალედისთვის, თუმცა უნდა აღინიშნოს რომ განხილული 24 დღიდან იყო 3 გამონაკლისი (13.06.15, 02.08.16, 16.05.18) შემთხვევა, როდესაც რადარის მონაცემების მიხედვით კონვექციური პროცესები დაფიქსირდა შედარებით გვიან 18-20 UTC დროისათვის, თუმცა არამდგრადობის ენერჯის მნიშვნელობა მაღალი იყო 09UTC – 15UTC დროის შუალედში. ზოგადად კონვექციის ჩამოყალიბების ხარისხი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ადგილობრივ ოროგრაფიულ თავისებურებებზე და დიდ როლს თამაშობს კონვექციური

დრუბლების ფორმირებაში, ამიტომ გასაგებია რომ საქართველოს არაერთგვაროვანი რელიეფის არსებობაც ნაწილობრივ განსაზღვრავს ლოკალური კონვექციის ჩამოყალიბებას და მის შემდგომ განვითარების ხარისხს, ამიტომ განხილულ შემთხვევებში გამონაკლისის არსებობა სწორედ ოროგრაფიული არაერთგვაროვნებით აიხსნება. დღის განმავლობაში (3 საათიანი ინტერვალით) არამდგრადობის ენერჯის ცვლილების ტენდენცია წარმოდგენილია ნახ.3.4.10-3.4.12.

ნახ.3.4.10-ზე წარმოდგენილია არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობების განაწილება დროის მიხედვით მხოლოდ იმ დღეებისათვის, როდესაც $CAPE(max) < 300$, შერჩეული დღეებიდან CAPE-ს ასეთი მნიშვნელობა დაფიქსირდა მხოლოდ 9 დღეს. სურათის მარჯვენა მხარეს ლეგენდაზე სხვადასხვა ფერით სწორედ ეს დღეებია წარმოდგენილი და შესაბამისი ფერები სურათზე გვიჩვენებს მოცემული დღის CAPE-ს რიცხვით მნიშვნელობას. დღის განმავლობაში არამდგრადობის ენერჯის 3 საათიანი ცვლილების უკეთ წარმოსაჩენად ნახ.3.4.13-ზე უწყვეტი წირით წარმოდგენილია CAPE-ს საშუალო ცვლილების ტრენდი დროების მიხედვით. როგორც ნახ.3.4.10-დან ჩანს მიუხედავად CAPE-ს მცირე მნიშვნელობებისა ყველა განხილული დღეებისათვის მისი რიცხვითი მნიშვნელობები მაქსიმალურია 09-15 UTC დროის შუალედში, რაც ემთხვევა განხილული დღეებისათვის რეალური ატმოსფერული პროცესების მიმდინარეობის დროს.

ანალოგიურად ნახ.3.4.11-ზე წარმოდგენილია CAPE-ს მაქსიმალური რიცხვითი მნიშვნელობის განაწილება მხოლოდ იმ დღეებისათვის, როდესაც $300 \text{ ჯ/კგ} < CAPE < 800 \text{ ჯ/კგ}$. განხილული დღეებიდან არამდგრადობის ენერჯის ცვლილების აღნიშნული შუალედი დაფიქსირდა მხოლოდ 10 დღისათვის, შესაბამისად ნახ.3.4.11-ზე ლეგენდაზე გამოსახული ფერებით აღნიშნულია შესაბამისი დღის CAPE-ს რიცხვითი მნიშვნელობები 3 საათიანი ინტერვალით, ხოლო უწყვეტი წირით წარმოდგენილია CAPE-ს საშუალო ცვლილების ტრენდი დროების მიხედვით. როგორც ნახ.3.4.11-დან ჩანს CAPE-ს რიცხვითი მნიშვნელობები მაქსიმალურია 09-15

UTC დროის შუალედში, რაც აგრეთვე ემთხვევა განხილული დღეებისათვის რეალური ატმოსფერული პროცესების მიმდინარეობის დროს.

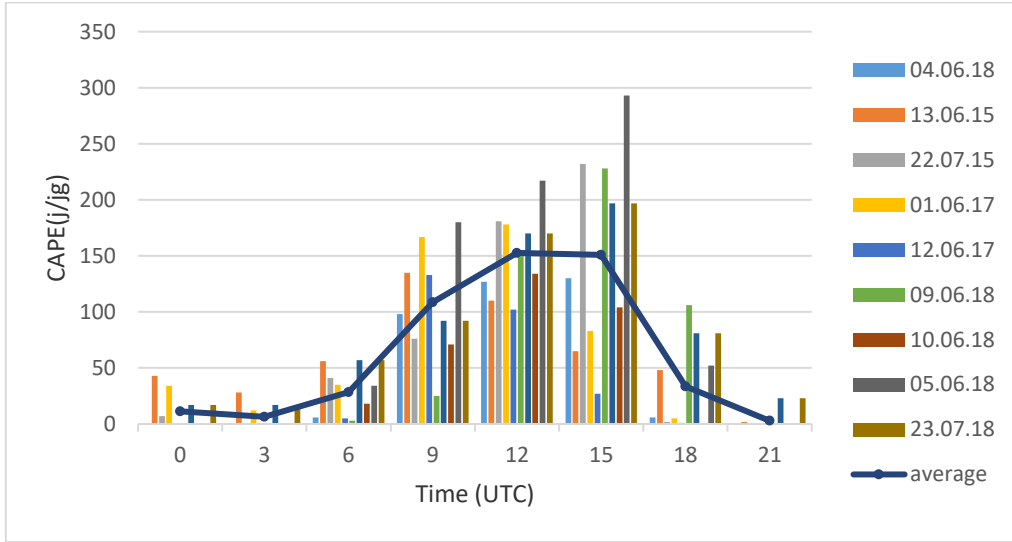
ნახ.3.4.12-ზე წარმოდგენილია CAPE-ს ცვლილება მხოლოდ იმ დღეებისათვის, როცა CAPE>800 ჯ/კგ. როგორც ნახ.3.4.12-დან ჩანს, CAPE-ს რიცხვითი მნიშვნელობები ამ შემთვევაშიც მაქსიმალურია 09-15 UTC დროის შუალედში.

ცხრ.3.4.1 აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რეგიონში 2015-2016 წლებში განვითარებული საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების დროს არამდგრადობის ენერჯის (CAPE), კონვექტიური ჩახშობის ენერჯის (CINH) მნიშვნელობები.

Time/ Date	13.06.15 Lat 41°.71' N, Lon 44°.77' E		21.06.16 Lat 41°.70' N, Lon 44°.80' E		23.06.16 Lat 41°.70' N, Lon 44°.80' E		02.08.16 Lat 41°.70' N, Lon 44°.80' E	
Time (UTC)	CAPE (J/kg)	CINH (J/kg)	CAPE (J/kg)	CINH (J/kg)	CAPE (J/kg)	CINH (J/kg)	CAPE (J/kg)	CINH (J/kg)
00:00	42.9	-9.4	0	0	0	0	50	-47
03:00	28.5	-5.3	0	0	0	0	23	-56
06:00	55.6	0	0	0	60	-28	93	-45
09:00	135	-17	69	-17	290	-30	307	-52
12:00	110	-7.9	349	-32	330	-55	378	-43
15:00	65	-21	96	-24	155	-126	207	-85
18:00	48	-48	0	0	0	-7	75	-26
21:00	2	-8.5	0	0	0	0	0	0

ცხრ.3.4.2 აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რეგიონში 2015-2018 წლებში განვითარებული საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების დროს არამდგრადობის ენერჯის (CAPE (max)<300 ჯ/კგ) რიცხვითი მნიშვნელობები.

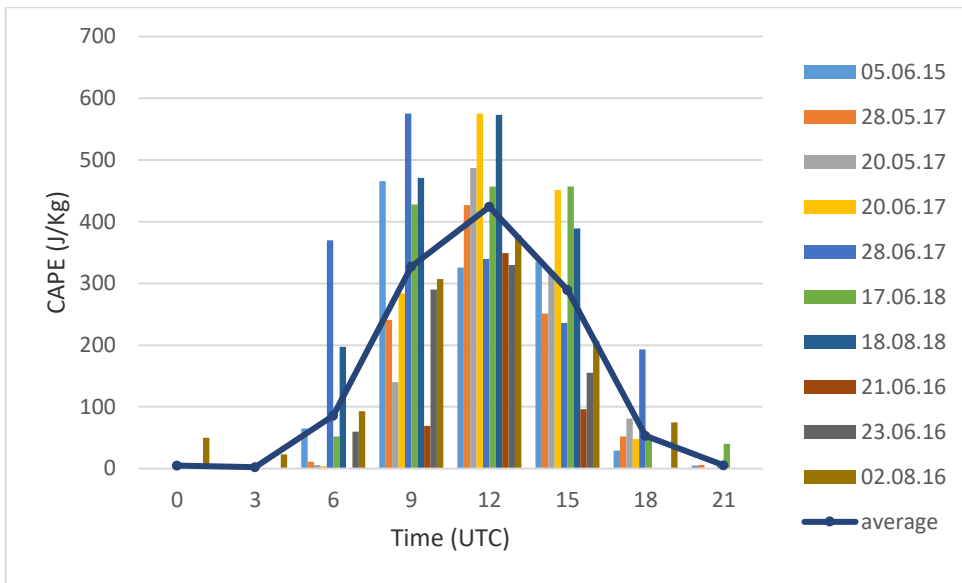
Time/ Date	22.07.15 Lon42°03' N, Lat 45°22' E	01.06.17 Lon41°73' N,La t 45°33' E	12.06.17 Lon42°03' N, Lat 45°22' E	09.06.18 Lon42°03' N, Lat 45°22' E	04.06.18 Lon42°03' N, Lat 45°22' E	10.06.18 Lon42°03' N , Lat 45°22' E.	05.06.18 Lon41°73' N,Lat 45°33' E.	23.07.18 Lon41°73' N,Lat 45°33' E.
Time UTC	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)
00:00	7	34	0	0	0	0	0	17
03:00	0	12	0	0	0	0	0	17
06:00	41	35	5	3,4	6	18	34,7	57
09:00	76	167	133	25	98	71	180	98
12:00	181	178	102	155	127	134	217	170
15:00	232	83	27	228	130	104	293	197
18:00	2	5	1	106	6	0	52	81
21:00	0	0	0	0,7	0	0	0	23



ნახ.3.4.10. განხილული დღეებისათვის არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობების ცვლილება დროის მიხედვით (CAPE (max)<300 ჯ/კგ).

ცხრ.3.4.3 აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რეგიონში 2015-2018 წლებში განვითარებული საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების დროს არამდგრადობის ენერჯის (300<CAPE(max)<800ჯ/კგ) რიცხვითი მნიშვნელობები.

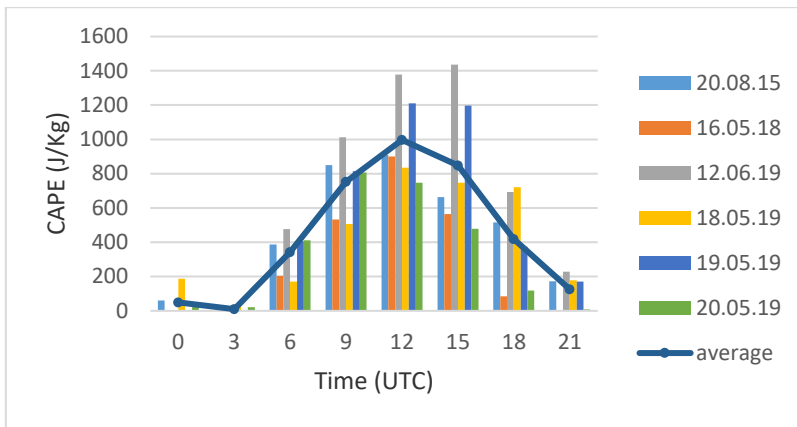
Time / Date	05.06.15 Lon42 ⁰ .08'N, Lat 44 ⁰ .69'E.	28.05.17 7 Lon41 ⁰ .73'N,Lat 45 ⁰ .33'E.	20.05.17 Lon41 ⁰ .73'N,Lat 45 ⁰ .33'E.	20.06.17 Lon41 ⁰ .73'N,Lat 45 ⁰ .33'E.	28.06.17 Lon42 ⁰ .03'N,Lat 45 ⁰ .22'E.	17.06.18 Lon42 ⁰ .03'N,Lat 45 ⁰ .22'E.	18.08.18 Lon42 ⁰ .03'N,Lat 45 ⁰ .22'E.
Time UTC	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)
00:00	0	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0	0
06:00	65	11	6	4	370	52	197
09:00	466	241	140	284	575	428	471
12:00	326	427	487	575	340	457	573
15:00	335	251	320	451	236	451	389
18:00	29	52	81	48	193	55	0
21:00	5	6	0	0	5	40	0



ნახ.3.4.11. არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობების ცვლილება დროის მიხედვით ($300 < CAPE(max) < 800$ ჯ/კგ).

ცხრ.3.4.2 აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რეგიონში 2015-2019 წლებში განვითარებული საშიში მეტეოროლოგიური პროცესების დროს არამდგრადობის ენერჯის ($CAPE(max) > 800$ ჯ/კგ) რიცხვითი მნიშვნელობები.

Time/ Date	20.08.15 Lon42 ⁰ .04' N Lat45 ⁰ .20'E.	16.05.18 Lon41 ⁰ .97'N , Lat45 ⁰ .83'E.	12.06.19 Lon41 ⁰ .73'N , Lat45 ⁰ .33'E	18.05.19 Lon42 ⁰ .03'N , Lat 45 ⁰ .22'E.	19.05.19 Lon42 ⁰ .04'N , Lat 45 ⁰ .20'E.	20.05.19 Lon41 ⁰ .97'N , Lat 45 ⁰ .83'E.
Time (UTC)	CAPE(J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)	CAPE (J/kg)
00:00	61	0	0	187	2	44
03:00	0	0	0	38	0	22
06:00	388	204	477	170	405	412
09:00	850	532	1012	506	814	807
12:00	909	900	1378	836	1211	748
15:00	663	564	1436	747	1197	478
18:00	516	84	694	722	375	119
21:00	172	0	229	178	170	8



ნახ.3.4.12. არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობების ცვლილება დროის მიხედვით (CAPE (max)>800 ჯ/კგ).

3.5 საქართველოში მიმდინარე ზოგიერთი ექსტრემალური კონვექციური პროცესების განხილვა მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების საფუძველზე.

მეტეოროლოგიური რადიოლოკატორები ფართოდ გამოიყენება სეტყვის და სეტყვასაშიში ღრუბლების ამოცნობისა და მათი დამუშავებისათვის. სეტყვასაშიში ღრუბლების მახასიათებელი პარამეტრებია: რადიოექოს ამრეკლადობა, ღრუბლის სიმაღლე, მაქსიმალური ამრეკლადობის სიმაღლე, სეტყვის ალბათობა, სეტყვის მარცვლის ზომა, ღრუბლის წყლიანობა ანუ ნალექების შემცველობა ღრუბელში და ა.შ.

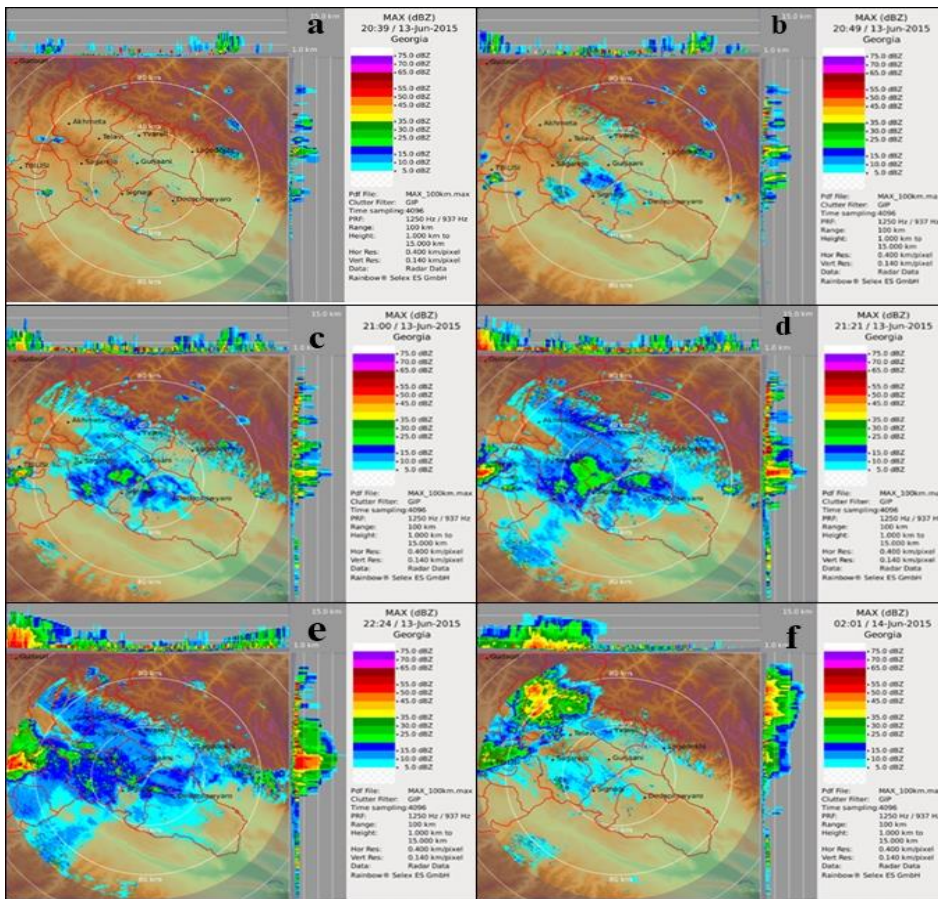
ლოკატორების ყველა პროდუქტი მუშაობს თავისი ალგორითმით. მეტეორადიოლოკატორის სამუშაო მანძილია 100 კმ რადიუსი რადარის ადგილმდებარეობიდან (Selex ES GmbH).

მეტეორადიოლოკაციური რადარის - METEOR 735 CDP 10 - Doppler Weather Radar პროდუქტები მეტად მრავალფეროვანია. უმთავრესი და სამუშაო პროდუქტია MAX dBZ – Maximum Display, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ ღრუბლების სიღრმისეული სტრუქტურის ანალიზი, სურათის ცენტრალურ ნაწილი გვიჩვენებს ღრუბლების ჰორიზონტალურ განლაგებას, ხოლო პერიფერიებში (ცენტრალური ნაწილის ზემოთ და მარჯვნივ) ნაჩვენებია ღრუბლის როგორც ჰორიზონტალური, ასევე ვერტიკალური ჭრილი ზღვის დონიდან 20 კმ სიმაღლემდე. ღრუბლის

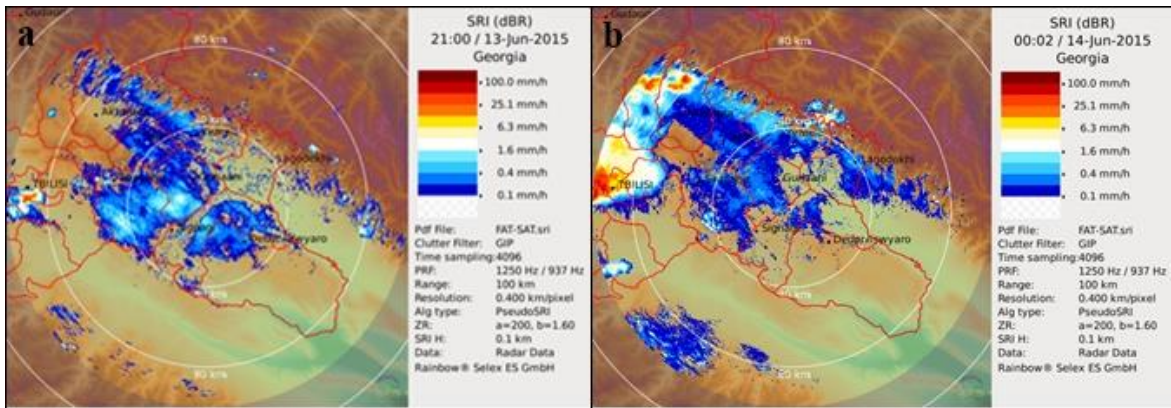
ჰორიზონტალური ჭრილიდან, რომელიც აღებულია ყველა ელევაციის სურათის ჯამიდან, შეგვიძლია გავაკეთოთ მისი ვერტიკალური ჭრა ელევაციით დედამიწის ზედაპირიდან 2 კმ სიმაღლეზე. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ დედამიწის ზედაპირიდან 2 კმ სიმაღლემდე ყველგან არის ე.წ. „მკვდარი ზონა“. აღნიშნული პროდუქტის ეფექტური სამუშაო ზონის რადიუსი რადარის ადგილმდებარეობიდან 120 კმ მანძილზეა შესაძლებელი. პროდუქტი გვიჩვენებს რადიოქოს ამრეკლადობას 5,0-75,0 dBZ დიაპაზონში. მეტეოროლოგიური რადარი Meteor 735CDP 10-Doppler Wether Radar რომლის მონიტორინგს ახორციელებს სამეცნიერო სამხედრო ტექნიკური ცენტრი „დელტა“, განთავსებულია კახეთში, სიღნაღის მუნიციპალიტეტის სოფ. ჭოტორთან, რომლის მეშვეობით ხორციელდება კახეთის მთელ რეგიონში ღრუბლებზე დაკვირვება, სეტყვის საშიშროების შემთხვევაში საცეცხლე წერტილებიდან ავტომატურ რეჟიმში ხორციელდება ღრუბლებზე აქტიური ზემოქმედება და ჩვენს მიერ გამოყენებულია მონაცემები რადარიდან 120კმ რადიუსის ტერიტორიაზე (Selex ES GmbH).

რადარის მონაცემების მიხედვით 13 ივნისს 20:30 საათზე (13 ივნისის ტრაგედია) წყნეთის მიდამოებში განვითარდა შიდამასიური პროცესი, რომელმაც თანდათან იწყო გაძლიერება. 20:49 საათისათვის პარალელურად თბილისის მიდამოებში ვითარდება შიდამასიური პროცესი, ორივე ღრუბელთა სისტემა ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად იწყებს გაძლიერებას და 22:00 საათისათვის მათი შეერთებით წარმოიქმნება გაძლიერებული ღრუბელი რომლის მაქსიმალური ამრეკლადობაა 65 დბ, ღრუბლის ზედა საზღვარი 15 კმ-მდეა, ნალექენის ინტენსივობა 100 მმ-ზე მეტია საათში. ერთი საათის განმავლობაში ღრუბლის სიძლიერე მატულობს, (განსაკუთრებით წყნეთის მიდამოებში), 23:51 საათისათვის ღრუბელი თანდაანობით სუსტდება. ამ დროის განმავლობაში აღმოსავლეთ საქართველოს მთელ ტერიტორიაზე აღინიშნება ჩრდილო დასავლეთის ქარი, თბილისში მისი მნიშვნელობა 2 კმ სიმაღლეზე არის 15 მ/წმ, ხოლო ახმეტის მოდამოებში 25-30 მ/წმ–ს აღწევს (ნახ.3.5.1).

ნახ.3.5.1-ზე მოცემულია რადარის მონაცემები აღმოსავლეთ საქართველოში 13-14 ივნისს ღრუბლის ინტენსივობის შესახებ, ლეგენდა გვიჩვენებს ღრუბლის ამრეკლადობას, ხოლო სურათის მარჯვენა და ზედა ნაწილი გვიჩვენებს ღრუბლის სიმაღლეს კმ-ებში. როგორც ნახ.3.5.1-დან ჩანს 13 ივნისს 20:39 საათზე მთელს აღმოსავლეთ საქართველოში ცა მოწმენდილია, ზუსტად 10 წუთში 20:49 საათზე თბილისის მიდამოებში შიდა მასიური პროცესის შედეგად წარმოიქმნება 45 მაქსიმალური ამრეკლადობის ელქეჟური ხასიათის ღრუბელი, რომლის ზედა ზღვარი 15 კმ-მდეა (ნახ.3.5.1b) ნახევარ საათში ღრუბლის ინტენსიობა მატულობს იზრდება კონვექტიური უჯრედის სიძლიერე (ნახ.3.5.1 c,d,e,f) და შესაბამისად მატულობს ნალექების ინტენსიობაც (ნახ.3.5.2). 22:24 საათისათვის ღრუბლების სიძლიერე და შესაბამისად ნალექების ინტენსიობაც მაქსიმალურია. 02:00 საათისთვის თბილისის მიდამოებში ღრუბლის ინტენსიობა შემცირებულია (ნახ.3.5.1 f). ანალოგიურად ნახ.3.5.2 გვაძლევს ნალექების განაწილებას აღმოსავლეთ საქართველოში. ნახ.3.5.2 სურათებზე ლეგენდა გვიჩვენებს ნალექების ინტენსიობას მმ/სთ-ში. როგორც სურათებიდან ჩანს ნალექების ინტენსიობა 13 ივნისის 21:00 საათიდან იზრდება და მაქსიმალური მნიშვნელობას (100 მმ/სთ) ღებულობს 22:00 საათისათვის, თუმცა მისი ინტენსიობა არ მცირდება 14 ივნისის 00:00 საათამდე.



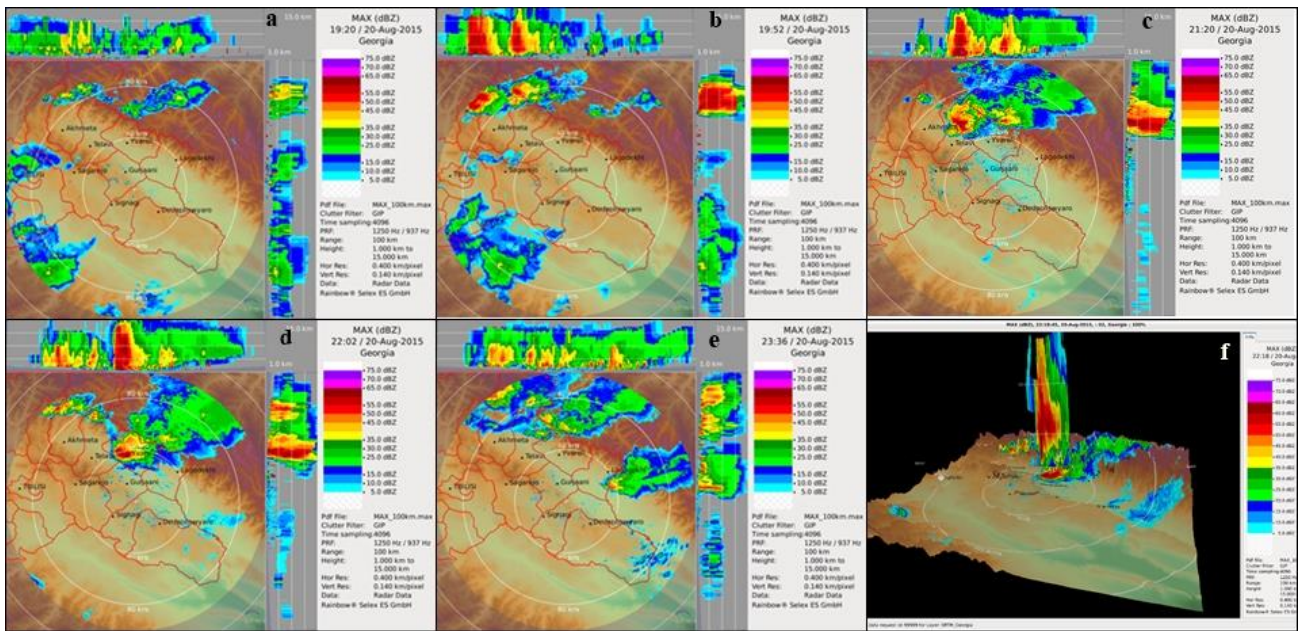
ნახ.3.5.1. აღმოსავლეთ საქართველოში ღრუბლების ინტენსივობა (სიმაღლე, ამრეკლადობა) რადარის მონაცემების მიხედვით.



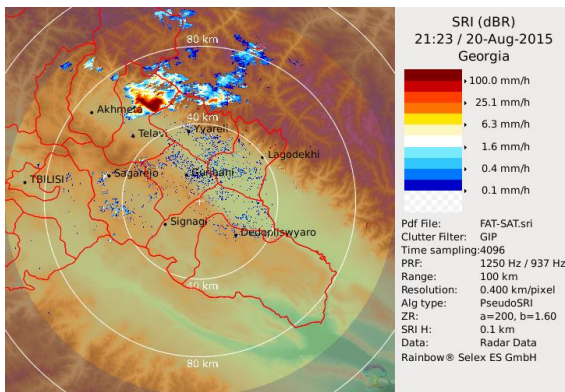
ნახ.3.5.2. აღმოსავლეთ საქართველოში დედამიწის ზედაპირზე მოსული ნალექების ინტენსივობა (მმ/სთ) რადარის მონაცემების მიხედვით.

მეტეოროლოგიური რადარიდან მიღებული სურათების ანალიზის მიხედვით, 19:20 საათისათვის დასავლეთის მხრიდან ახმეტის რაიონის ტერიტორიაზე შემოვიდა ღრუბელთა სისტემა. 19:49 საათისათვის ღრუბლის ზედა ზღვარი იყო 15

კმ, მაქსიმალური ამრეკლადობა 60 დბ, ხოლო ნალექების ინტენსივობა შეადგენდა 25 მმ/სთ. 20:18 საათისათვის ღრუბლის სიმაღლე და ინტენსივობამ მოიმატა და ღრუბელი გადაადგილდა ყვარლისა და შემდეგ ლაგოდეხის მიმართულებით. აღნიშნული ღრუბელთა სისტემის ინტენსივობა 23:30 საათიდან შემცირდა (ნახ.3.5.3). როგორც ნახ.3.5.3(a) გვიჩვენებს 2015 წლის 20 აგვისტოს 19:20 საათისათვის გროვა-საწვიმარი ღრუბლები განაწილებულია მხოლოდ აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონში, რაც განპირობებულია დასავლეთიდან შემოსული ფრონტის გადაადგილებით. ნახ.3.5.3(b)-3.5.3(f)-ზე წარმოდგენილია 21:20 საათისათვის ახმეტისა და ნაწილობრივ თელავის ტერიტორიაზე სეტყვის ღრუბლები, რომელთა მაქსიმალური ამრეკლადობა შეადგენს 65 დბ. დასავლეთიდან შემოსულ ატმოსფერულ ფრონტს აღმოსავლეთ საქართველოში დაემატა შიდა მასიური პროცესები, რამაც გამოიწვია მძლავრი კონვექციური ღრუბლების წარმოშობა. ნახ.3.5.3(a)-3.5.3(f) –ზე მოცემულია რადარის მონაცემები კახეთის რეგიონში 20 აგვისტოს ღრუბლის ინტენსივობის შესახებ. როგორც ნახ.3.5.3(a)-3.5.3(e) გვიჩვენებს 19:20 საათისათვის ახმეტის თავზე მთებში გვაქვს სუსტი ინტენსივობის ღრუბელთა სისტემა, რომელიც ნახევარი საათის განმავლობაში მთებზე ასვლის დროს ძლიერდება, მისი სიმაღლე და ამრეკლადობა იზრდება და წარმოიქმნება ძლიერი კონვექციური ღრუბელთა სისტემა, გამლიერებული ღრუბელი მთებიდან იწყებს ჩამოსვლას თელავის, ყვარლისა და ლაგოდეხის ტერიტორიაზე, რასაც თან ახლავს ძლიერი სეტყვა და თქეში წვიმა. ღრუბელი საბოლოოდ სუსტდება ლაგოდეხის ტერიტორიაზე (ნახ.3.5.3(e)). ნალექების ინტენსივობაც შესაბამისადაა განაწილებული. ნახ.3.5.4-ზე მოცემულია ნალექების ინტენსივობა მმ/სთ კახეთის რეგიონში. როგორც სურათიდან ჩანს ყველაზე ძლიერი ნალექი 21:23 საათისათვის გვაქვს ახმეტის რაიონში (100 მმ/სთ).



ნახ.3.5.3. აღმოსავლეთ საქართველოში ღრუბლების ინტენსივობა (სიმაღლე, ამრეკლადობა) რადარის მონაცემების მიხედვით (20 აგვისტო).



ნახ.3.5.4. აღმოსავლეთ საქართველოში დედამიწის ზედაპირზე მოსული ნალექების ინტენსივობა (მმ/სთ) რადარის მონაცემების მიხედვით (20 აგვისტო, 21:23 სთ).

2015 წლის 5 ივნისს ძლიერი წვიმა მოვიდა აღმოსავლეთ საქართველოს ზოგიერთ რაიონში (გორი, თბილისი, დუშეთი, თიანეთი, ახმეტა), რის შედეგადაც დაიტბორა ქუჩები, დაზიანდა სასოფლო სამეურნეო პროდუქტები.

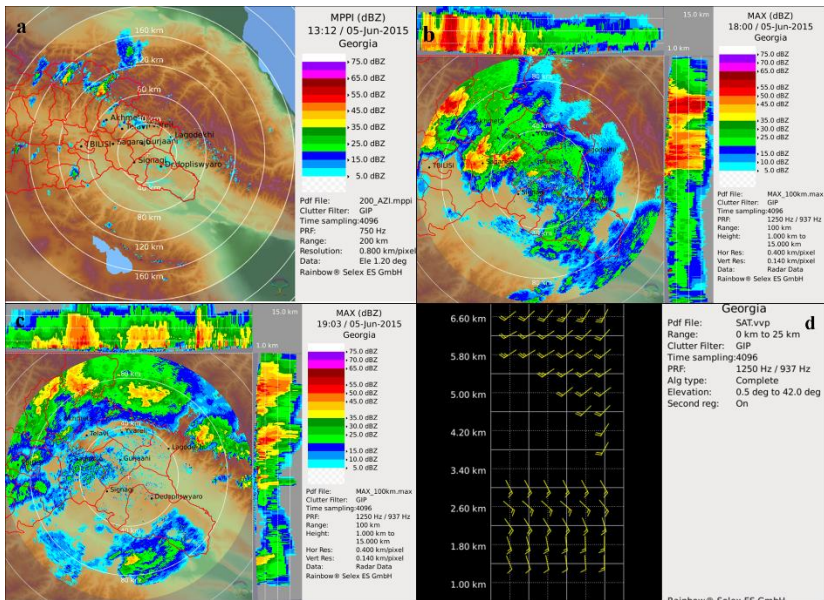
მეტეოროლოგიური რადარიდან მიღებული სურათების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ 13:12 სთ-ზე საქართველოს ტერიტორიაზე სამხრეთ-დასავლეთის მხრიდან ჩრდილო-აღმოსავლეთის მიმართულებით შემოვიდა ღრუბელთა სისტემა ატმოსფერული ფრონტის სახით (ნახ.3.5.5). ნახ.3.5.5(a)-ზე მოცემულია მეტეოროლოგიური რადარიდან მიღებული მონაცემები ღრუბლების ინტენსივობის

შესახებ რადარიდან 200 კმ რადიუსის მანძილზე. როგორც ნახ.3.5.5 (a)-დან ჩანს საქართველოს ტერიტორიაზე სამხრეთ-დასავლეთის მხრიდან ჩრდილო-აღმოსავლეთის მიმართულებით შემოვიდა ღრუბელთა სისტემა, რომელიც ამ დროისთვის ლოკალიზებული იყო დუშეთისა და ნაწილობრივ თიანეთის რაიონის ტერიტორიაზე, თუმცა ღრუბელმა ვერ მოასწრო გაძლიერება და გადაადგილდა ჩრდილოეთის მიმართულებით მთებისკენ. 16:56 საათიდან ღრუბელთა სისტემა განსაკუთრებით გაძლიერდა დუშეთისა და ახალგორის რაიონის ტერიტორიაზე. 17:30 სთ ღრუბლის მაქსიმალური ამრეკლადობა შეადგენდა 65 დბ, ღრუბლის ზედა ზღვარი იყო 16 კმ. პარალელურად 17:35 საათისათვის თბილისის ტერიტორიაზე განვითარდა მეორე ღრუბელთა სისტემა 65 მაქსიმალური ამრეკლადობითა და 16 კმ სიმაღლით. 18:00 საათისათვის ორივე ღრუბელთა სისტემა გადაადგილდა ჩრდილო-აღმოსავლეთის მიმართულებით და მთლიანად მოიცვა ერთი მხრივ თიანეთისა და დუშეთის, მეორეს მხრივ ახმეტისა და თელავის რაიონის ტერიტორიები (ნახ.3.5.5 b). ნახ.3.5.5 (b)-ზე წარმოდგენილია მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემები აღმოსავლეთ საქართველოში ღრუბლების ინტენსივობის შესახებ 18:00 საათისათვის (თბილისის დროით). როგორც ნახ.3.5.5(b)-დან ჩანს, ამ დროისათვის ღრუბლები მთლიანად მოიცავს ერთი მხრივ თიანეთისა და დუშეთის, მეორეს მხრივ ახმეტის, თელავისა და საგარეჯოს რაიონებს.

აღსანიშნავია რომ მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით 17:35 საათიდან ატმოსფეროს ზედა ფენებში განსაკუთრებით გაძლიერდა ჩრდილო-დასავლეთის მიმართულების ქარი, რომლის სიდიდე ამ დროისათვის შეადგენდა 10-15 მ/წმ (ნახ.3.5.5 (d)). ხოლო 3 კმ სიმაღლეზე დაიკვირვებოდა სამხრეთ-აღმოსავლეთის მიმართულების ქარი, მისი მნიშვნელობა ამ დროისთვის იყო 7,5-10 მ/წმ, გარკვეულ სიმაღლეზე ქარი არ დაფიქსირებულა. სიმაღლეების მიხედვით ასეთი განსხვავება ქარის სიდიდესა და მიმართულებებს შორის იწვევს გრიგალური მოძრაობების გაძლიერებას.

მეტეოროლოგიური რადარიდან მიღებული სურათების მიხედვით 18:30 საათისათვის ღრუბელთა სისტემა გადაადგილდა ჩრდილო-აღმოსავლეთის

მიმართულებით მთებისკენ და იმის გამო რომ ნალექი უკვე მოვიდა წვიმის სახით , იგი თანდათანობით შესუსტდა. 19:00 საათიდან ღრუბელთა სისტემამ დაიწყო დაშლა (ნახ.3.5.5 c).



ნახ.3.5.5. ღრუბლების ინტენსივობა აღმოსავლეთ საქართველოსათვის მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით (2015 წლის 5 ივნისი).

3.6. WRF მოდელისა და Ready სისტემის მიღებული შედეგების შედარება რადარის რეალურ მონაცემებთან.

თუ შევადარებთ აეროლოგიურ მონაცემებს მეტეოროლოგიური რადარის სურათებიდან მიღებულ მონაცემებს ვნახავთ, რომ 20 აგვისტოს 16:00 სთ-სთვის აგებულმა აეროლოგიურმა დიაგრამამ ატმოსფეროში გვიჩვენა ძლიერი არამდგრადობა (ნახ.4.4.5b), მეტეოროლოგიური რადარიდან მიღებული რეალური მონაცემების მიხედვით კი მთელი დღის განმავლობაში საქართველოს ტერიტორიაზე ადგილი ჰქონდა დასავლეთის მხრიდან შემოსული ჰაერის მასების გადაადგილებას აღმოსავლეთის მიმართულებით, თუმცა ძლიერი კონვექციური ნაკადები დაფიქსირდა მხოლოდ 19:29 საათისათვის (ნახ. 3.5.3). აღნიშნული ფრონტალური სისტემა რადარის მონაცემების მიხედვით სუსტდება 23:00 საათისათვის, რაც ემთხვევა მოდელის შედეგად მიღებულ აეროლოგიურ მონაცემებს, რომლის თანახმადაც არამდგრადობის ენერგია ატმოსფეროში

შემცირებულია. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ შიდამასიური (ადგილობრივი) კონვექციური პროცესის დროს, როდესაც ძირითადად დედამიწის ზედაპირის გათბობის გამო ადგილი აქვს ჰაერის მასების ვერტიკალურ მოძრაობას, მოდელის მიერ მიღებული აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით ატმოსფეროს არამდგრადობა დაფიქსირებულია მხოლოდ იმ ტერიტორიაზე სადაც რეალურად ადგილი ჰქონდა ძლიერ მეტეოროლოგიურ მოვლენებს (თავსხმა წვიმა, სეტყვა), სხვა რეგიონებში კი აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით ატმოსფეროს მდგომარეობა სტაბილურია. ხოლო ფრონტალური პროცესების დროს, რომლის დროსაც ძირითადად ადგილი აქვს ჰაერის მასების ჰორიზონტალურ გადაადგილებას აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით ატმოსფეროს თერმოდინამიკური არამდგრადობა აღინიშნება არამარტო კონკრეტულ რეგიონში არამედ თითქმის საქართველოს მთელ ტერიტორიაზე. კერძოდ, 2015 წლის 13 ივნისს განვითარებული პროცესების დროს მიღებული ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის მრუდები გვიჩვენებს ატმოსფეროს არამდგრადობას მხოლოდ თბილისისათვის, ხოლო კახეთის რეგიონში ატმოსფეროს მდგომარეობა სტაბილურია. ხოლო 2015 წლის 20 აგვისტოსა და 5 ივნისის აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით ატმოსფერო არამდგრადია არამარტო ახმეტის რაიონის ტერიტორიაზე, სადაც უშალოდ დაფიქსირებულია ძლიერი მეტეოროლოგიური მოვლენები, არამედ აღმოსავლეთ საქართველოს თითქმის მთელ ტერიტორიაზე.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ 13 ივნისს განვითარებული ატმოსფერული პროცესი არ უკავშირდებოდა ფრონტის გავლას, ეს პროცესი იყო სუფთა ლოკალური ხასიათის, არამდგრადი სტრატეფიკაციის პირობებში მოხდა თბილი ჰაერის მასების ვერტიკალური აღმასვლა (კონვექცია), რის შედეგადაც განვითარდა ძლიერი კონვექციური ღრუბელი, რომელიც არსებობდა მხოლოდ რამდენიმე წუთის განმავლობაში. პროცესის სიძლიერიდან გამომდინარე შეიძლება ვთქვათ, რომ ამ დღის ატმოსფერული პროცესის სიძლიერის შეფასება ვერ მოხდა ვერც ARL-ის READY სისტემის მიერ მიღებული აეროლოგიური მონაცემების საფუძველზე, თუმცა, როგორც

ცხრ.3.4.1-დან ჩანს ARL-ის READY სისტემამ მაინც გვიჩვენა სუსტი არამდგრადობა 09-15 UTC დროის შუალედისთვის.

თუ შევადარებთ 2015 წლის 5 ივნისის აეროლოგიური დიაგრამის მონაცემებს რადარის რეალურ მონაცემებთან, ვნახავთ, რომ 10:00 საათისათვის რადარის მონაცემების მიხედვით ატმოსფეროში შეიმჩნევა სუსტი ტალღური მოძრაობები დასავლეთიდან აღმოსავლეთის მიმართულებით, თუმცა ძლიერი კონვექციური მოძრაობები ამ დროისათვის დაფიქსირებულა (ნახ. 3.5.5). ამავე დროს აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით გვაქვს სუსტი არამდგრადობა, თუმცა უარყოფითი არამდგრადობის ენერჯია (CAPE) გაცილებით მეტია დადებით ენერჯიაზე (CIN), ამიტომ შეიძლება ვთქვათ რომ 540 მბ-დან 300 მბ დონემდე ატმოსფეროში უკვე არის სუსტი არამდგრადობა (ნახ.3.4.6). ნახ.3.4.6-ზე წარმოდგენილია აეროლოგიური დიაგრამა, რომელიც ასახავს 2015 წლის 5 ივნისის 10:00 საათისათვის (თბილისის დროით) 42.11, 44.97 გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის (თიანეთი) ატმოსფეროს თერმოდინამიკურ მდგომარეობას. როგორც ნახ.3.4.6-დან ჩანს, ატმოსფეროს მდგომარეობა ამ დროისათვის სუსტად არამდგრადია. ნახ.3.4.7-ზე წარმოდგენილია ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა 2015 წლის 5 ივნისის 16:00 საათისათვის (თბილისის დროით) 42.08, 44.69 გეოგრაფიული კოორდინატებისათვის (დუშეთი). როგორც ნახ.3.4.7-დან ჩანს 16:00 (თბილისის დროით) საათისათვის აეროლოგიური მონაცემების მიხედვით გვაქვს ძლიერი არამდგრადობა განსაკუთრებით დუშეთის რაიონში, ამავე დროს რადარის მონაცემების მიხედვით 16:56 სთ-სათვის დუშეთისა და თიანეთის რაიონის ტერიტორიაზე ყველაზე ძლიერია ღრუბელთა სისტემა.

19:03 საათისათვის კი ღრუბელთა სისტემა სუსტდება, თუმცა დუშეთისა და თიანეთის რაიონებში რადარი მონაცემების მიხედვით ამ დროს ნალექი მოდის თქვენი წვიმის სახით. ხოლო აეროლოგიური საპროგნოზო მონაცემების მიხედვით ამ დროისათვის დუშეთის რაიონის ტერიტორიაზე გვაქვს სუსტი არამდგრადობა რაც ემთხვევა რადარის სურათებიდან მიღებული ანალიზი შედეგებს. ხოლო 22:00 საათისათვის რადარის მონაცემების მიხედვით კონვექციური ღრუბლები არ

დაიკვირვება, ხოლო აეროლოგიური დიაგრამების მონაცემების მიხედვით ამ დროისათვის ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა აბსოლუტურად მდგრადია.

ზოგადად შეიძლება ვთქვათ, რომ 2015 წლის 5 ივნისს დაიკვირვებოდა ძლიერი ფრონტალური პროცესები (განსხვავებით 22 ივლისისაგან). სწორედ ამიტომ აეროლოგიურმა დიაგრამამ ზუსტად დააფიქსირა მთელი დღის განმავლობაში ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა.

რეალურად მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით ყველა განხილულ შემთხვევაში ადგილი ჰქონდა ძლიერი კონვექციური ღრუბლების ჩამოყალიბებას, ამიტომ ამ პროცესების სიძლიერის კლასიფიცირება მხოლოდ ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მახასიათებლების მიხედვით (CAPE, CINH, Updraft velocity) ვერ მოხდება, რადგან ეს მონაცემები არ არის სრულად საკმარისი კონვექციის ხარისხის შესაფასებლად. თუმცა სხვა საპროგნოზო მოდელებთან ერთად, რომლებიც ძირითადად გვაძლევს ინფორმაციას უფრო ფართომასშტაბიანი ატმოსფერული პროცესების (ფრონტების) შესახებ სასურველია მოხდეს არამდგრადობის ენერჯის შეფასება სწორედ ამ დროის შუალედისთვის, რადგან ცივი ან ოკლუზიის ფრონტის შემოსვლას ძლიერი არამდგრადობის პირობებში შესაძლებელია მოჰყვეს ლოკალურად ძლიერი კონვექციური ღრუბლების განვითარება. საქართველოს არაერთგვაროვანი რელიეფის გამო ადგილობრივი პროცესების ჩამოყალიბება და მისი შემდგომი განვითარების ხარისხი დამოკიდებულია ლოკალური რელიეფის თავისებურებებზე, რის გამოც საქართველოში ადგილობრივი ატმოსფერული პროცესების პროგნოზი საკმაოდ რთულია, ამას ემატება ისიც, რომ საქართველოში არ არის გამართული არცერთი რეგიონალური მოდელი, რომელშიდაც გათვალისწინებული იქნება რთული ოროგრაფია. ამიტომ გლობალურ საპროგნოზო მოდელებთან ერთად, რომლებიც ძირითადად ფრონტალური მეტეოროლოგიური პროცესების წინასწარმეტყველებას გვაძლევს, აუცილებელია შეფასდეს კონკრეტულ რეგიონში ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის ხარისხიც, ეს განსაკუთრებით აუცილებელია

სეტყვის პროგნოზის დროს, რაც დაეხმარება შესაბამის სამსახურებს სამუშაოების დაგეგმვაში და სეტყვის თავიდან აცილებაში.

ამავე დროს აღსანიშნავია, რომ განხილული ლოკალური მეტეოროლოგიური პროცესებისათვის არამდგრადობის ენერჯის (CAPE) ყველაზე კარგი ინდიკატორი არის 09-15 UTC დროის შუალედისათვის (როდესაც არამდგრადობის ენერჯის მნიშვნელობა ყველაზე დიდია). რადგან ამ დროს დედამიწის ზედაპირის ტემპერატურა მაქსიმალურია და ყველაზე ხელსაყრელი დროა ლოკალური კონვექციური პროცესების განვითარებისათვის. შესაბამისად როდესაც ვაკეთებთ ლოკალური კონვექციური პროცესების პროგნოზს ARL-ის READY სისტემის აეროლოგიური დიაგრამების საფუძველზე ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობა უნდა შევისწავლოთ 12-15 UTC დროის შუალედისთვის საპროგნოზო აეროლოგიური დიაგრამების ანალიზის მიხედვით და შესაბამისად ამ დროს მიღებული საპროგნოზო არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობის საფუძველზე. ამგვარად, როდესაც შეუძლებელია ამინდის საპროგნოზო რიცხვითი მოდელით (WRF), ლოკალური ხასიათის საშიში მეტეოროლოგიური კონვექციური პროცესის წინასწარმეტყველება, მაშინ ARL-ის READY სისტემის საშუალებით არამდგრადობის ენერჯის რიცხვითი მნიშვნელობის (CAPE) ანალიზით შესაძლებელია ლოკალურ ტერიტორიაზე ლოკალური ხასიათის მოსალოდნელი საშიში მეტეოროლოგიური კონვექციური პროცესის ხარისხის წინასწარმეტყველება მოცემული დღის 12-15 UTC დროის შუალედში საპროგნოზო აეროლოგიური მონაცემების საფუძველზე.

3.7. მესამე თავის დასკვნა:

საქართველოს ტერიტორიაზე მიმდინარე ძლიერი, საშიში მეტეოროლოგიური პროცესები ხშირად ლოკალური ხასიათისაა და ხშირ შემთხვევაში გამოწვეულია (პროვოცირებულია) საქართველოს რთული რელიეფის არაერთგვაროვანი განაწილებით. ასეთი მეტეოროლოგიური პროცესების წინასწარმეტყველება

რეგიონალური საპროგნოზო რიცხვითი მოდელებითაც კი ძალიან რთულია და ხშირ შემთხვევებში არ არის ზუსტი. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ამინდის საპროგნოზო რეგიონალურმა (WRF) მოდელმაც კი, რომელიც კარგად ითვალისწინებდა კავკასიის რელიეფის არაერთგვაროვნებას ერთმანეთში ჩადგმული ბადეებით (16 კმ და 2.2 კმ) ვერ დააფიქსირა 2015 წლის 13 ივნისის, 2016 წლის 21, 23 ივნისს და 2 აგვისტოს განვითარებული ძლიერი კონვექციური მოვლენები ჩვენს მიერ WRF მოდელში მოსინჯული ვერც ერთი ატმოსფეროს პარამეტრიზაციის სქემების საშუალებით. ასევე ნაშრომში ჩვენს მიერ შესწავლილია აღმოსავლეთ საქართველოში განვითარებული ძლიერი მეტეოროლოგიური პროცესების რამოდენიმე შემთხვევა. განხილული შემთხვევებისათვის აეროლოგიურმა დიაგრამებმა კვლავ ზუსტად აჩვენეს ატმოსფეროს არამდგრადობა ლოკალურ ტერიტორიაზე, მიუხედავად იმისა, რომ არამდგრადობის ხარისხი ოთხივე შემთხვევაში იყო განსხვავებული, ეს განსხვავება ზუსტად შეესაბამებოდა კონკრეტული დღის რეალურ მეტეოროლოგიურ მდგომარეობას (მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით). მიღებული შედეგების საფუძველზე შეიძლება ვთქვათ, რომ NOAA-ას ARL -ის READY სისტემის საშუალებით კონკრეტული რეგიონისთვის მიღებული საპროგნოზო აეროლოგიური მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მოვახდინოთ ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის პროგნოზი და შევაფასოთ ლოკალურ ტერიტორიაზე კონვექციური პროცესების შესაძლო განვითარების ხარისხი, რომლის გამოყენება საქართველოს ამინდის საპროგნოზო ოპერატიულ სამსახურში არსებულ საპროგნოზო მეთოდებთან ერთად გააუმჯობესებს ამინდის წინასწარმეტყველების ხარისხს.

თავი 4. საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ნაწილაკების მიგრაციის შესწავლა.

4.1. საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ნაწილაკების მიგრაციის შესწავლა WRF-Chem მოდელით.

უდაბნოდან საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის შემცველი ჰაერის მასების გადაადგილების შესწავლისათვის წარმოდგენილ ნაშრომში პირველად გამოიყენება რიცხვითი მოდელური გათვლები, დისტანციური ზონდირების პროდუქტებთან ერთად. კერძოდ, ამინდის კვლევისა და პროგნოზირების WRF-Chem მოდელის მიერ ჩვენს მიერ ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ 2017 წლის ნოემბრიდან 2018 წლის დეკემბრამდე საქართველოს ტერიტორიაზე დაფიქსირდა მტვრის გადატანის 9 შემთხვევა. ამ თავში ჩვენს მიერ განხილულია და შესწავლილია მხოლოდ ორი ტიპური შემთხვევა, რომლებსაც ადგილი ჰქონდათ 2018 წლის 22-24 მარტს და 25-26 ივლისს. ვალიდაციის მიზნით WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგების შედარებამ Cloud Aerosol Lidar, Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO), the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) და PM10 გაზომილ მონაცემებთან აჩვენა, რომ ჩვენს მიერ კავკასიის ტერიტორიისთვის ადაპტირებული WRF-Chem მოდელი კარგად აღწერდა უდაბნოდან მტვრის შემცველი ჰაერის მასების ტრანსპორტირებას საქართველოს ტერიტორიაზე კავკასიის რთულ ოროგრაფიის პირობებში. გარდა ამისა, უდაბნოდან წამოსულმა მტვერი გავლენას ახდენდა საქართველოს კლიმატური პარამეტრებზე. მართლაც, WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგებმა აჩვენა, რომ შესწავლილი პერიოდის განმავლობაში, მტვრის შემოტანას ადგილი ქონდა საქართველოს ტერიტორიაზე თანაბრად აფრიკის, შუა აღმოსავლეთისა და ცენტრალური (დასავლეთი) აზიის უდაბნოებიდან. უნდა აღინიშნოს, რომ ყარაყუმისა და ყიზილყუმის უდაბნოებიდან მტვრის გადატანა დაფიქსირდა ორჯერ, რომლის კვალი ჯერ არ იყო დაფიქსირებული კავკასიის მყინვარებზეც კი (ელბრუსი და ყაზბეგი).

როგორც ცნობილია ეილერის არასტაციონარული, არაჰიდროსტატიკური, მეზომასშტაბური WRF-Chem მოდელი ფართოდ გამოიყენება რეგიონალური ამინდის,

ჰაერის ხარისხისა და მტვრის დისპერსიის პროგნოზირებისა და მოდელირებისთვის (Grell et al., 2005). ამიტომ უდაბნოებიდან საქართველოს ტერიტორიაზე ჰაერში მტვრის გადატანის შესასწავლად გამოყენებული იქნა WRF-Chem v.3.6.1 რიცხვითი მოდელი ორი ერთმანეთში ჩასმული დომენის (ბადის) გამოყენებით (ნახ.4.1.1(ბ)) კავკასიის რთული ოროგრაფიული თავისებურებების უკეთ წარმოჩენის მიზნით. გარე ბადის წერტილებში სასაზღვრო და საწყისი პირობებისთვის მონაცემები მოიპოვებოდა ECMWF ERA-ს ბაზური შუალედური მონაცემებიდან (0,75 გრადუსიანი რეზოლუციით, რომელიც ხელმისაწვდომია ყოველ 6 საათში ერთხელ). გარე ჰორიზონტალური ბადური ქსელი, რომელიც შედგება 128x128 უჯრისგან, რეზოლუციით 37,2 კმ, მოიცავს ყველა რეგიონს, რომლებიც მონაწილეობენ კავკასიის ატმოსფერული პროცესების ფორმირებაში (სამხრეთ და აღმოსავლეთ ევროპის უმეტესი ნაწილი, ურალ-ციმბირის რეგიონი, შუა აღმოსავლეთი და შუა აზია). მასში ჩასმული ბადე, 81x81 უჯრედის ზომით და 12,4 კმ რეზოლუციით (ცენტრით თბილისში), მოიცავს ჩრდილოეთ აფრიკის, შუა აღმოსავლეთის და დასავლეთ აზიის ტერიტორიებს (ნახ.4.1.1(ბ)). WRF მოდელის ვერტიკალური სტრუქტურა (ორივე რეგიონისთვის) 32 ვერტიკალური დონის გამოყენებით მოიცავს მთელ ტროპოსფეროს. ყველა რიცხვითი გათვლები (უხეშ ბადეზე დროითი ბიჯით 60 წმ. და ჩასმულ შიდა ბადეზე დროითი ბიჯით 10 წმ.) WRF მოდელით შესრულდა საქართველოს სამეცნიერო-საგანმანათლებლო კომპიუტერული ქსელების ასოციაცია GRENA-ს კლასტერის გამოყენებით. ზოგადად, WRF-Chem v.3.6.1 მოდელი მოიცავს მინერალური მტვრის ემისიის შემდეგ მოდულებს: DUST-GOCART, DUSTGOCART/AFWA და DUSTUOC. DUST-GOCART/AFWA და DUSTUOC. ამ მოდულების რიცხვითი სქემების ურთირთ შედარებამ აჩვენა, რომ GOCART/AFWA ემისიის სქემა იძლეოდა ზედმეტად პროგნოზირებულ მტვრის კონცენტრაციას, ხოლო DUSTUOC სქემა ოდნავ ამცირებდა მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობებს (Rizza et al., 2016). ამიტომ, ჩვენს მიერ WRF-Chem მოდელში შეირჩა DRS-GOCART სქემა, რომელიც უზრუნველყოფდა შვიდი ტიპის აეროზოლების გამოყოფას, რაც სავსებით მისაღებია მეცნიერულ გათვლებში (Chin et al., 2000).



ნახ. 4.1.1. კავკასიის რეგიონის ფიზიკური რუკა- (a), WRF Chem მოდელის ბადის გადაფარვის ლოკაცია-(b).

WRF-Chem მოდელის დომენის (ბადის) გამოყენებით ყველა გაანგარიშებისას, შესრულებული WRF v.3.6.1 მოდელით (ქიმიისა და მტვრის მოდულებთან ერთად), გამოიყენებოდა იდენტური ფიზიკური პარამეტრიზაციის სქემები. როგორც ცხრ.4.1.1-ში ჩანს, მტვრის ექსპერიმენტებისთვის შეირჩა შემდეგი ფიზიკური სქემები: მიკროფიზიკური პროცესების ინტერპრეტაციისთვის გამოიყენება პუნდუე ლინის სქემა (Lin et al., 1983), პარამეტრიზაციის ინტენსივობისა და ყინულის დალექვის გათვალისწინებით (Chen & Sun, 2002). გრელი და დემენჯის 3D ანსამბლის სქემა გამოიყენება ხმელეთზე და ოკეანეზე კონვექციური ღრუბლებისათვის (Grell et al., 2005); მტვრის პირდაპირი რადიაციული ეფექტისთვის გამოიყენება სწრაფი რადიაციული გადაცემის მოდელი (RRTMG) როგორც მოკლე ტალღოვანი, ისე გრძელი ტალღოვანი გამოსხივებისთვის (Iacono et al., 2008). MYNN-ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯის პარამეტრიზაცია გამოიყენება პლანეტარული სასაზღვრო ფენის აღსაწერად (Nakanishi & Niino, 2009); ჯანჯიკ-ეტა მსგავსების ზედაპირული ფენის სქემა (Janjic, 2002) და RUC- მიწის ზედაპირის მოდელი (Benjamin et al., 2004) არჩეულია ზედაპირული ფენის ფიზიკისა და მიწის ზედაპირის ურთიერთქმედების გამოსახატავად. მხოლოდ მტვრის შემცველ ექსპერიმენტებში - მტვრის მხოლოდ 4 სქემა აქტიურდება და განიხილება აეროზოლური პირდაპირი ზემოქმედება რადიაციულ და ატმოსფერულ დინამიკაზე.

ცხრ.4.1.1 WRF-Chem-ში გამოყენებული ფიზიკური პარამეტრების ჩამონათვალი.

ფიზიკ.პარამეტრები	პარამეტრის ნომერი	ცვლადის სახელი	მოდელი

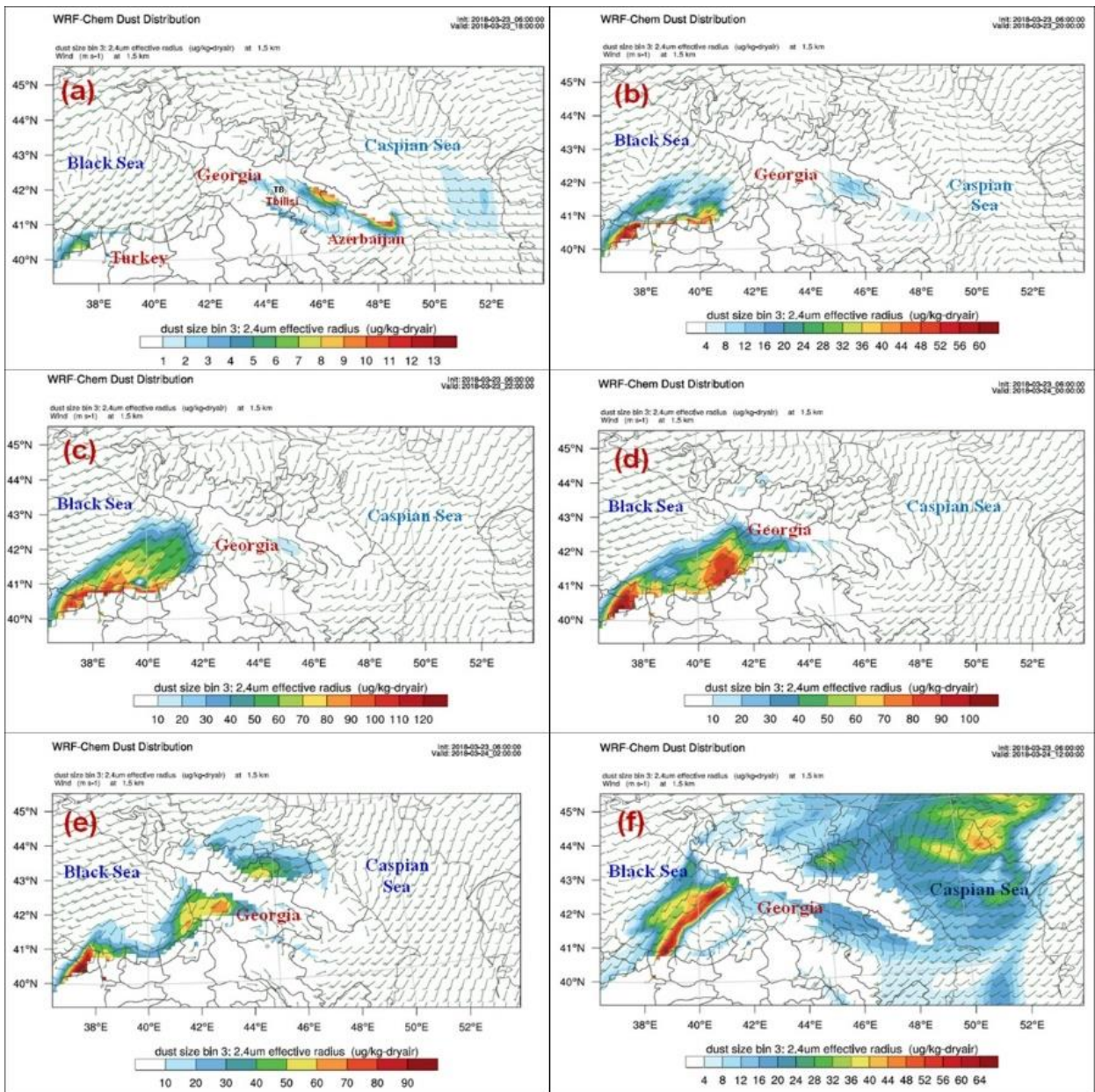
Microphysics	2	mp_physics	Purdue Lin
PBL model	2	bl_pbl_physics	MYNN level 2.5
Cumulus convection	5	Grell 3D Ensemble Scheme	Tiedtke Grell 3D Ensemble Scheme
Land surface	3	sf_surface_physics	RUC model
Surface similarity	1	sf_sfclay_physics	MM5 similarity scheme
Shortwave radiation	4	ra_sw_physics	RRTMG
Long-wave radiation	4	ra_lw_physics	RRTMG
Dust only dust tracers	1	dust_opt/	DODT
Aerosol mixing rules	2	aer_op_opt	Maxwell–Garnett
Chem	401	chem_opt	

WRF-Chem v.3.6.1 მოდელის თვის შედეგად მიღებული რეზულტატების შესაფასებლად, მიღებული შედეგები შევადარეთ სატელიტიდან მიღებულ MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>), CALIPSO (<http://eosweb.larc.nasa.gov/>) მონაცემებსა და აგრეთვე ადგილზე ჩატარებულ და გაზომვებით საქართველოს გარემოს ეროვნული სააგენტოსგან (NEA) მიღებულ მონაცემებს. ასევე გამოვიყენეთ ლაგრანჟის ცვლადებზე დაფუძნებული HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) მოდელი, რომელიც გამოიყენება ჰაერის მასების (დამაბინძურებლების) დისპერსიის, ტრექტორიებისა და ადგილობრივი ან გლობალური მასშტაბებში დამაბინძურებლების დეპოზირების გამოსათვლელად.

საქართველოს გარემოს ეროვნული სააგენტოს საქმიანობის ერთ-ერთი სფეროა მოსახლეობის უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის უზრუნველსაყოფად მოსალოდნელი საშიში ბუნებრივი მოვლენების (ჰიდრომეტეოროლოგიური კატასტროფები, გვერდითი მოვლენები და გარემოს დაბინძურება) შესახებ ინფორმაციის პროგნოზირება და გავრცელება. ამ მიზნის მისაღწევად, საქართველოში, ჰაერის მონიტორინგის ცხრა ავტომატური სადგური მუშაობს,

რომელთაგან ოთხი მდებარეობს საქართველოს დედაქალაქ თბილისში (<http://nea.gov.ge/en/about/about-us/2>). ნაშრომში გამოყენებულია PM10-ის მონაცემები მიღებული ბათუმისა და ქუთაისის ავტომატური სადგურებიდან (დასავლეთ საქართველო) და თბილისის სხვადასხვა რაიონის 4 ავტომატური სადგურების მონაცემები (აღმოსავლეთ საქართველო).

WRF-Chem v.3.6.მოდელის გამოთვლების შედეგები წარმოდგენილია ნახ.4.1.2-ზე. ნახ.4.1.2 გვიჩვენებს, რომ შავ ზღვაზე დაფიქსირებულია ძლიერი ქარი, რასაც სამხრეთიდან შავი ზღვის სამხრეთ-აღმოსავლეთ ზონაში გადააქვს მტვრის მასები, გარდა ამისა, დამატებით 2018 წლის 23 მარტის 18:00 საათზე აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე (აშკარად სამხრეთიდან შემოსული) შეინიშნება მტვრის ღრუბელი(Davitashvili, 2019). ამრიგად, საქართველოს ტერიტორიაზე მოხდა ჰაერის მასების ორმხრივი შემოჭრა, რაც საქართველოში განვითარებული ძირითადი სინოპტიკური პროცესების მხოლოდ 1.1%-ს შეადგენს. ნახ.4.1.2(b) გვიჩვენებს, რომ საკმაოდ ძლიერი ატმოსფერული პროცესების დროს მტვრის ღრუბლები შემოდის თურქეთიდან საქართველოს სამხრეთ-დასავლეთ სანაპიროზე და 23 მარტის 20:00 სთ-ზე აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ღრუბელი ქრება (ნახ.4.1.2(ბ)), მომდევნო 2 საათის განმავლობაში მტვრის ღრუბელმა საქართველოს დასავლეთ სანაპიროს მიაღწია (ნახ.4.1.2(გ)) და ნახ.4.1.2(დ)-დან ჩანს, რომ მტვრის ღრუბელმა აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე გადმოინაცვლა. მომდევნო 2 საათის განმავლობაში მტვრის ღრუბლებმა გადაკვეთა დიდი კავკასიონის ქედი და გავრცელდა რუსეთის სამხრეთ ტერიტორიაზე (ნახ.4.1.2 (ე)). ნახ.4.1.2(ფ)-ზე. ცხადია, რომ შუადღის 12 საათზე მტვრის ღრუბლების ახალი ნაწილი ჩნდება შავი ზღვაზე (გადაჭიმულია თურქეთიდან აფხაზეთამდე), რომელიც მოძრაობს რუსეთის მიმართულებით (სოჭის მთები და მთავარი კავკასიის ქედი). შემდგომმა გამოანგარიშებებმა აჩვენა, რომ მტვრის ღრუბლები შავი ზღვის და საქართველოს ტერიტორიის წყლებიდან გადის 2018 წლის 24 მარტის 22:00 საათზე.

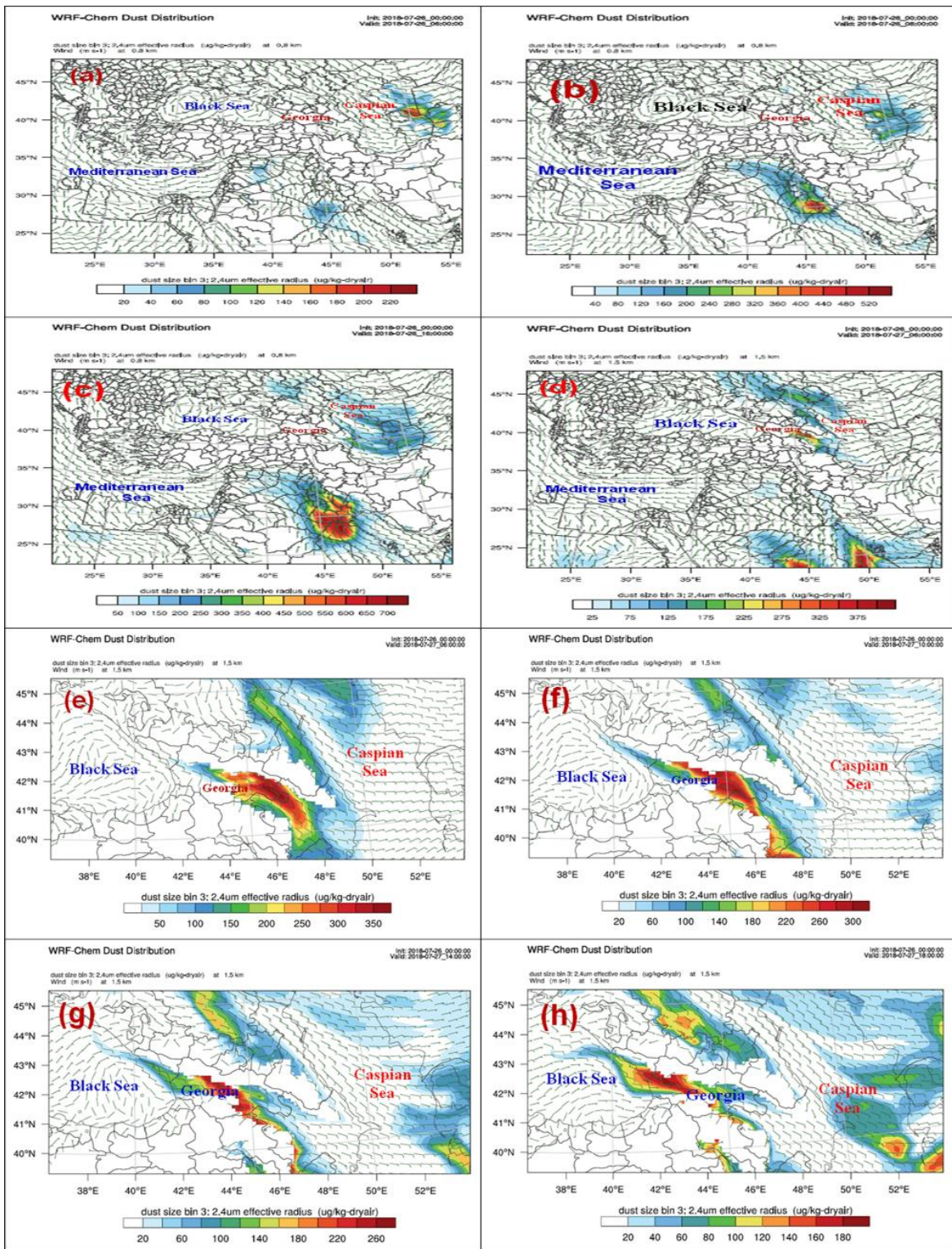


ნახ.4.1.2 WRF-Chem v.3.6.1 მოდელის რიცხვითი გაანგარიშების შედეგები, შესრულებული ჩასმულ დომენში, 12,4 კმ რეზოლუციის ბადით, მიღებული დროის სხვადასხვა მომენტებისთვის.

2018 წლის 26 ივლისს აზერბაიჯანის დედაქალაქ ბაქოში დაფიქსირდა უჩვეულოდ ძლიერი მტვრის ნისლის (ყვითელი ფერის, თამბაქოს კვამლის მსგავსი) შეჭრა, რამაც შეამცირა ხილვადობა, გაიზარდა ტენიანობა, ტემპერატურა და შეიქმნა ჯანმრთელობისთვის საშიში პირობები. ოფიციალურმა წარმომადგენლებმა (აზერბაიჯანის ეკოლოგიისა და ბუნებრივი რესურსების მინისტრმა) პრესასა და ტელევიზიაში განაცხადეს, რომ ჩრდილო-დასავლეთის ქარმა მტვერი მოიტანა

მეზობელი თურქმენეთიდან კასპიის ზღვის გადაღმა და მტვრის ქარიშხალმა მთლიანად დაიპყრო აზერბაიჯანის ნახევარკუნძული. 2018 წლის 27 ივლისს თბილისში და მის შემოგარენშიც უჩვეულო ნისლი დააფიქსირეს. თავდაპირველად, საქართველოს NEA დაიბნა და განაცხადა, რომ ეს ჩვეულებრივი ნისლია, მაგრამ მოგვიანებით განმარტა, რომ აზერბაიჯანიდან მტვრის ძლიერი ღრუბელი გავრცელდა საქართველოს ტერიტორიაზე.

WRF-Chem მოდელის გაანგარიშების შედეგები მსხვილ ქსელზე შესრულებული მტვრის მოდულთან ერთად (ნახ.4.1.3(დ)) აჩვენებს, რომ 800 მ სიმაღლის ყარაყუმის უდაბნოს თავზე ორი დიდი მტვრის ღრუბელია. 2018 წლის 26 ივლისს 06:00 საათზე სირიასა და ერაყში ორი პატარა მტვრის ღრუბელი შეინიშნება (ნახ.4.1.3(ა)). ნახ.4.1.3(ბ)-დან ჩანს, რომ ყარაყუმის მტვრის ღრუბელი მოძრაობს დასავლეთით კასპიის ზღვისკენ, ხოლო არაბეთის ნახევარკუნძულზე მტვრის უფრო დიდი ღრუბელი ინდოეთის ოკეანისკენ ინაცვლებს 26 ივლისს 08:00 საათზე. ნახ.4.1.3(გ) გვიჩვენებს, რომ ყარაყუმის მტვრის ღრუბელმა მიაღწია აზერბაიჯანის ტერიტორიას, შემდეგ კი ის 26 ივლისს 16:00 საათზე გადავიდა დასავლეთით საქართველოს ტერიტორიისკენ. მართლაც, ნახ 4.1.3 (დ) –დან კარგად ჩანს, რომ ყარაყუმის მტვრის ღრუბელმა საქართველოს ტერიტორიას მიაღწია და ჩრდილოეთ-დასავლეთით რუსეთისკენ გადაინაცვლა. უნდა აღინიშნოს, რომ გარდა ამისა, მტვრის ღრუბლების დიდი სისტემა რუსეთისკენ ჩრდილო-დასავლეთით მოძრაობს 27 ივლისის 06:00 საათზე (ნახ.4.1.3(დ)).



ნახ.4.1.3. WRF-Chem v.3.6.1 მოდელით რიცხვითი გამოთვლების შედეგები, შესრულებული უხეშ (a) - (d) და მეხეზრ (e) - (h) ზადებზე.

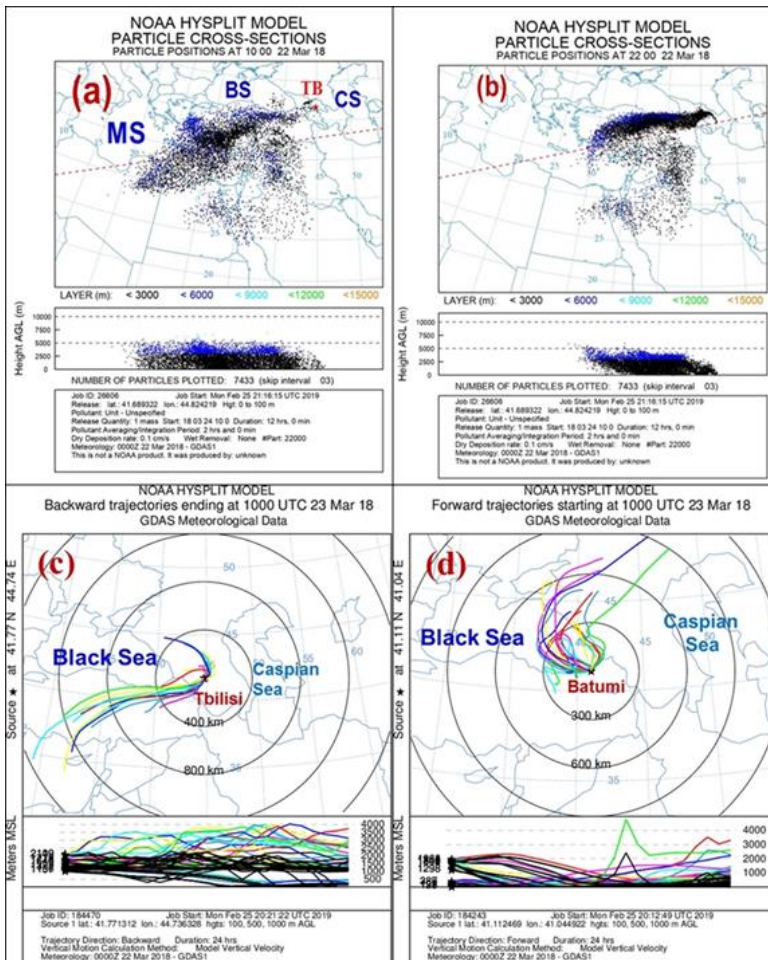
WRF-Chem-ის მიერ 1500 მ სიმაღლეზე შესრულებული გაანგარიშების შედეგები ნაჩვენებია ნახ.4.1.3(ე)-ზე (სთ). ნახ.4.1.3(დ)-გან განსხვავებით, რომელიც

შესრულებულია უხეშ ბადეზე, ნახ.4.1.3(ე) შესრულებულია მაღალი რეზოლუციის ქსელზე, ნათლად გვიჩვენებს, რომ თურქმენეთის უდაბნოში წარმოშობილი მტვრის ქარიშხალი აფხაზეთში მოვიდა 2018 წლის 27 ივლისის 06:00 საათზე. ნახ.4.1.3(ვ)-ზე ჩანს, რომ მტვრის ღრუბელმა შავი ზღვის სანაპირო ზოლს მიაღწია 27 ივლისს 10:00 საათზე და შემდეგ ნახ.4.1.3(გ)-ზე ჩანს, რომ მტვრის ღრუბელი გადაჭიმული იყო საქართველოს თითქმის მთელ ტერიტორიაზე (ზღვის დონიდან 1,5 კმ სიმაღლეზე) და მან 27 ივლისის 14:00 საათზე მიაღწია კავკასიის მთავარ ქედს. ნახ.4.1.3(თ)-ზე კარგად ჩანს, რომ მტვრის ნაკადის ძირითადმა ნაწილმა (ძირითადად კასპიის ზღვიდან შავი ზღვისკენ საქართველოს სატრანსპორტო დერეფნის გავლით), 27 ივლისის 18:00 საათზე გადალახა ლიხის ქედი და დაიკავა როგორც დასავლეთ საქართველოს, ისე ჩრდილოეთით - შავი ზღვის აღმოსავლეთ სანაპირო ზონა. უნდა აღინიშნოს, რომ მტვრის ღრუბლები, რომლებიც ჩანს (გამოჩნდა) რუსეთის ტერიტორიაზე (ნახ.4.1.3(თ)) აშკარად იქნა გავრცელებული კასპიის ზღვიდან საჰაერო დინების მიერ (Davitashvili, 2019).

4.2 საქართველოში მტვრის ნაწილაკების გადატანის შესწავლა Hysplit მოდელით.

HYSPLIT მოდელი, წარმოადგენს ერთ–ერთ ყველაზე ხშირად გამოყენებულ ატმოსფერული ტრანსპორტირებისა და დისპერსიის მოდელს, რომელიც ემყარება ლაგრანჟის მიდგომას, რათა დაადგინოს ჰაერის ნაწილაკების გავრცელების ტრაექტორიები და ასევე ეილერის მეთოდოლოგიას ჰაერში ნივთიერებების კონცენტრაციის გამოსათვლელად (Draxler & Hess, 1998). HYSPLIT მოდელით შესაძლებელია რიჩხვითი თვლის შედეგების როგორც ნორმალური (normal), ასევე მატრიცული (matrix) და ანსამბლური (ensemble) ტრაექტორიების ტიპებით წარმოჩენა და მისი გაშვება შესაძლებელია „forward“ და „backward“ ტრაექტორიის დასადგენად. ამ ნაშრომში გამოყენებული იქნა HYSPLIT მოდელის პროდუქტების მატრიცული და ანსამბლური ტიპის ტრაექტორიები პოტენციური მტვრის წყაროების, მათი

ტრანსპორტირების მარშრუტების შესასწავლად და WRF Chem მოდელის თვლის შედეგების შესაფასებლად. ამრიგად, HYSPLIT მოდელი გამოიყენება საქართველოში (თბილისი (41°72 'N, 44°78'E) და ბათუმი (41 ° 38 ') N, 41 ° 38 'E)), მინერალური მტვრის ტრანსპორტირების შესასწავლად 2018 წლის 22-მარტიდან 24 მარტამდე.



ნახ.4.2.1 HYSPLIT მოდელის გამოთვლების შედეგები.

უდაბნოებიდან ტრანსპორტირებული მტვრის წყაროების დასადგენად და მათი გავრცელების ტრაექტორიის შესასწავლად, HYSPLIT მოდელის გამოყენებით ჩატარდა „forward“ და „backward“ ტრაექტორიების ორდღიანი ანალიზი. ნახ. 4.2.1(a),(b)-ში ნაჩვენებია HYSPLIT მოდელის განივი ჭრილები, შესაბამისად, 2018 წლის 22 მარტის 10:00 და 22:00 საათზე. ნახ.4.2.1(a)–ს ანალიზი აჩვენებს, რომ მტვრის ქარიშხალი ჩამოყალიბდა ლიბიის უდაბნოში, მტვრის აეროზოლის მაქსიმალური კონცენტრაცია აღინიშნება ხმელთაშუა ზღვის თავზე და მტვრის ღრუბელი მთლიანად მოიცავს 5

კილომეტრიან ვერტიკალური ფენას, ხოლო მტვრის აეროზოლების დიდი ნაწილი ვრცელდება მხოლოდ 2,5 კმ სიმაღლემდე. ნახ.4.2.1(a),(b)-ს შედარებითი კვლევა (მიღებული 12 საათის შემდეგ) აჩვენებს, რომ მტვრის ნაწილაკების დიდი ნაწილი ხმელთაშუა ზღვიდან თურქეთის მიმართულებით გადაადგილდა და შემდეგ შავი ზღვიდან შემოვიდა საქართველოში. ნახ.4.2.1(c)-ზე ნაჩვენებია HYSPLIT მოდელის „backward” ტრაექტორია, რომელიც მთავრდება 2018 წლის 23 მარტს (10:00 UTC), ნახ.4.2.1(c)-ზე (საწყისი წერტილი იყო თბილისში, ზღვის დონიდან 100, 500, 1000 მ სიმაღლეზე, გაანგარიშების ხანგრძლივობა იყო 24 საათი) ტრაექტორიის გავრცელების მიმართულება გვიჩვენებს, რომ მტვრის ნაკადი გაივლის საქართველოს, შავიზღვის, თურქეთისა და ხმელთაშუაზღვის გავლით. ხოლო ნახ. 4.2.1(დ)-ზე ჩანს HYSPLIT მოდელის „forward” ტრაექტორია, დაწყებული 10:00 UTC-დროს მომენტიდან. ნახ.4.2.1(დ)-დან ჩანს, რომ „forward” ტრაექტორია (ბათუმი ავირჩიეთ საწყის წერტილად) საქართველოს ტერიტორიიდან მიდის ჩრდილო-დასავლეთით შავიზღვისკენ და შემდგომ გადადის რუსეთში (სოჭი, კრასნოდარისმხარე). ამრიგად, HYSPLIT მოდელის გათვლებით, ხმელთაშუაზღვის სამხრეთ სანაპიროზე წარმოშობილმა მტვრის ქარიშხალმა რუსეთის (კრასნოდარისმხარე) და საქართველოს ტერიტორიებამდე მიაღწია.

4.3 WRF-Chem v.3.6.1 და HYSPLIT მოდელის თვლით მიღებული

შედეგების შედარება სატელიტურ CALIPSO და MODIS მონაცემებთან.

2006 წლის 28 აპრილიდან მზის სინქრონული სატელიტი A-Train-CALIPSO-ს იძლევა უამრავ მონაცემებს რეგიონში დედამიწის რადიაციულ ბალანსზე და კლიმატზე ღრუბლებისა და აეროზოლების ზემოქმედების შესასწავლად. CALIPSO სატელიტი შეიცავს 3 ინსტრუმენტს: Cloud-Aerosol Lidar ორთოგონალური პოლარიზაციით (CALIOP), ვიზუალიზაციის ინფრაწითელი რადიომეტრი (IIR) და Wide Field კამერა (WFC). CALIOP არის მთავარი ინსტრუმენტი CALIPSO სატელიტზე, რადგან ის იძლევა მნიშვნელოვან ინფორმაციას ღრუბლებისა და აეროზოლების ვერტიკალური და ჰორიზონტალური განაწილების შესახებ (Winker at al., 2007). CALIOP ინსტრუმენტი

ორბიტის 705 კმ სიმაღლეზე იღებს დღის და ღამის ფაზებში ელასტიური უკუქცევის ვერტიკალურ პროფილებს ორ ტალღის სიგრძეზე (532 ნმ და 1064 ნმ) და ასევე უზრუნველყოფს ხაზოვან დეპოლარიზაციის პროფილებს 532 ნმ-ზე, რაც საშუალებას იძლევა განვასხვავოთ ყინულისა და წყლის ღრუბლები, აგრეთვე ახდენს არასფერული აეროზოლური ნაწილაკების იდენტიფიცირებს საშუალებას (Winker et al., 2007). CALIPSO აფიქსირებს მტვრის აეროზოლების მოცულობის დეპოლარიზაციის მაჩვენებელს (მიღებული ლადარული სიგნალების პარალელური კომპონენტის პერპენდიკულარულად) 532 ნმ-ზე (Omar et al., 2009).

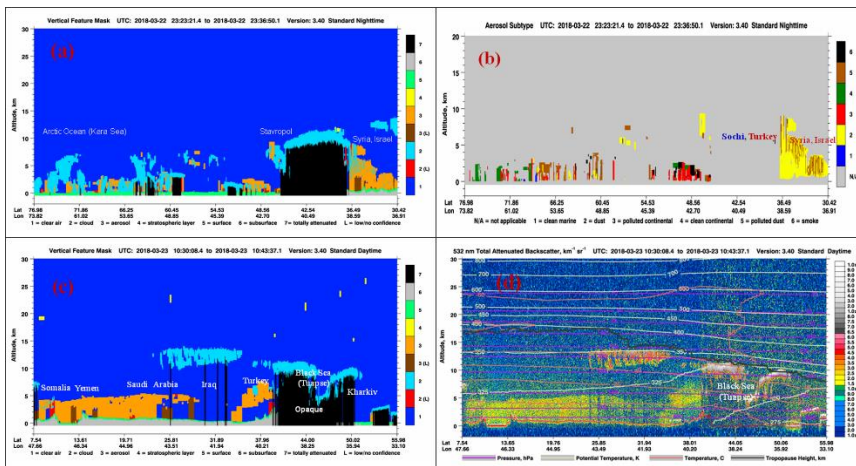
MODIS-ი არის მთავარი ინსტრუმენტი NASA-ს ბორტზე როგორც Terra (2000 წლის თებერვლიდან), ასევე Aqua (2002 წლის ივნისიდან) სატელიტებზე, რომლებიც ყოველდღიურად აკონტროლებენ დედამიწას ფართო სპექტრის დიაპაზონში. MODIS მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დედამიწის სისტემის ისეთი მოდელების შემუშავებაში, რომელსაც შეუძლია ზუსტად გაითვალისწინოს გარემოში გლობალური ცვლილებები (Li & Sokolik, 2018). MODIS-ი Terra და Aqua ორბიტებზე, 705 კმ სიმაღლით, საშუალებას იძლევა დაფაროს სიგანე 2,330 კმ, მონაცემების მიღება 36 სპექტრალური ტალღის სიგრძისთვის 0,41-დან 14 მკმ-მდე და ეს გაზომვები გამოიყენება აეროზოლების სპექტრალური ოპტიკური სისქის პარამეტრების და აეროზოლის ზომის პარამეტრების მისაღებად ყოველ მეორე დღეს (Remer et al., 2005). ამ ნაშრომში გამოყენებული იქნა MODIS-ის მონაცემები (RGB 500 მ და 0,55 მკმ AOD მიღებული MOD04 2 -დან) მტვრის ღრუბლების შესაფასებლად და მტვრის ღრუბლების გამონაბოლქვის დიდი წყაროების დასადგენად. პოტენციური მტვრის უჯრედები განისაზღვრება MODIS სენსორის მიერ მოპოვებული აეროზოლების ოპტიკური სიღრმის (AOD) სიდიდეების საფუძველზე.

უპირველეს ყოვლისა, ორივე რიცხვითი მოდელის თვლის შედეგები შეფასდა მიწისზედა PM10 სიდიდეების გაზომვების (მიღებული NEA-დან) საშუალებით. ცხრ.4.3.1 გვიჩვენებს, რომ 2018 წლის 23 მარტს PM10 კონცენტრაციამ (საშუალოდ 24 საათის განმავლობაში) გადააჭარბა შესაბამის ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციის (ზღვ) (50 მკგ/მ^3) მნიშვნელობებს თბილისის ყველა რაიონში.

ცხრ. 4.3.1. 24-საათის განმავლობაში PM10–ის კონცენტრაციების საშუალო მნიშვნელობათა განაწილება თბილისის სხვადასხვა რაიონში (წითელი ფერით აღნიშნულია კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები).

PM ₁₀ (mkg/m ³)	Tsereteli Avenue	Kazbegi Avenue	Varketili District	Vashlidjvari District	Average	BE	RMS
22/3/2018	49.0	57.0	42.0	41.0	47.25	-	-
23/3/2018	238.0	229.0	181.0	246.0	223.5	31.0 1	44.79
24/3/2018	178.0	174.0	126.0	195.0	168.25	37.2 3	52.67
25/3/2018	75.0	69.0	58.0	84.0	71.5	-	-

ცხრ.4.3.1 გვიჩვენებს, რომ PM10–ის კონცენტრაციების საშუალო მნიშვნელობა წერეთლის გამზირზე გაიზარდა 4,76- ჯერ, ყაზბეგის გამზირზე 4,58- ჯერ, ვარკეთილში- 3,62 ჯერ და მაქსიმალური მნიშვნელობა დაფიქსირდა ვაშლიჯვრის რეგიონში (გაიზარდა 4,92-ჯერ), რომელიც არის თბილისის ყველაზე დასავლეთი უბანი (ცხრ. 4.3.1-ში წითელი ფერით აღნიშნულია კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები). ცხრ.4.3.1 გვიჩვენებს, რომ 2018 წლის 23 მარტს თბილისში PM10–ის კონცენტრაცია, საშუალოდ 4,46 – ჯერ მეტი იყო, ვიდრე შესაბამისი ზღვ. ცხრ.4.3.1სევე გვიჩვენებს, რომ ნაწილაკების აღნიშნული კონცენტრაცია შენარჩუნებულია 2018 წლის 25 მარტსაც.



ნახ.4.3.1 CALIOP ვერსიის 3.40-ით შესრულებული გაზომვები: (a) ვერტიკალური მახასიათებლის სახე და (b) -აეროზოლის ქვეტიპი.

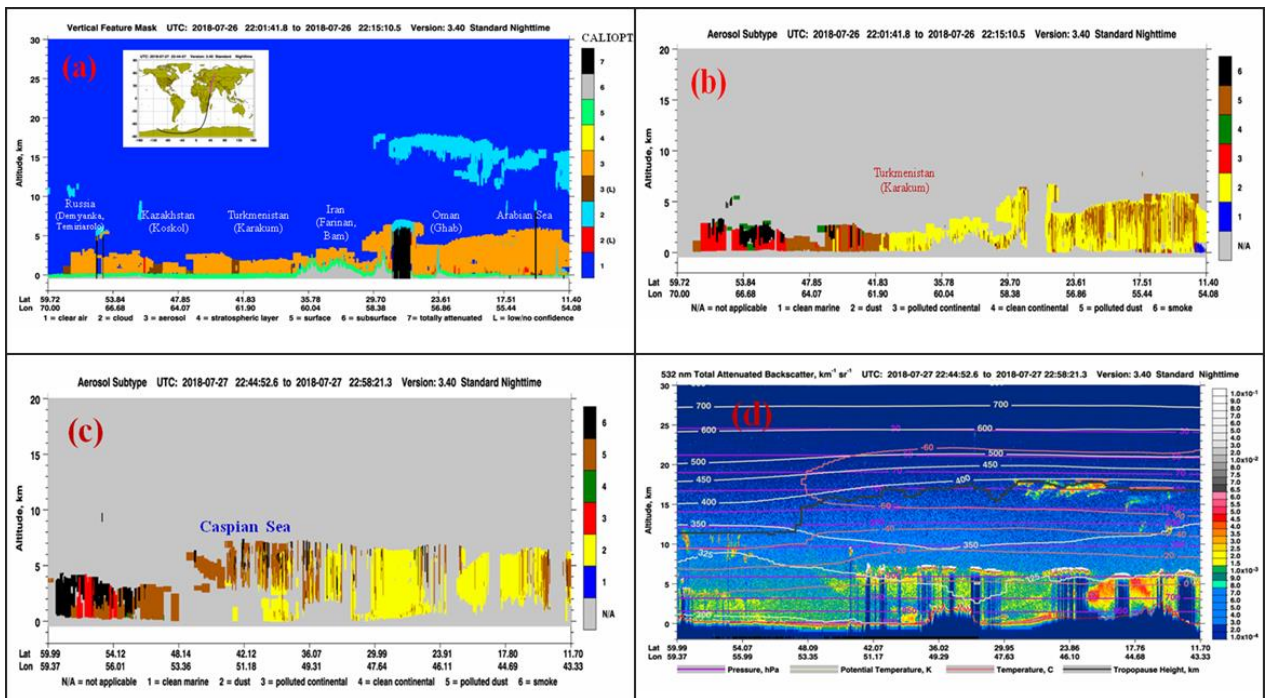
ნახ.4.3.1(ა) გვიჩვენებს ყველა აეროზოლური ფენის მდებარეობას ჩრდილოეთ ყინულოვან ოკეანედან (კარა ზღვა: გრძედი - 71⁰,86', განედი: 61⁰,02') ისრაელამდე (გრძედი- 30⁰,42', განედი-36⁰,91'), ნახ.4.3.1(a)-დან ჩანს, რომ აეროზოლები (ნარინჯისფერი) ვერტიკალურ შრეებში ძირითადად კონცენტრირებულია 5 კმ-ზე ქვემოთ. გარდა ამისა, ნახ.3.4.1(a)-ის მარჯვენა მხარეს აღინიშნება აეროზოლური ნაწილაკების რაოდენობის ზრდა (ისრაელისა და სირიის ტერიტორიებზე), ისევე როგორც უზარმაზარი ღრუბლები 10 კმ სიმაღლეზე აჩენს სრულად შესუსტებულ ადგილებს ქალაქ აინ ისასთან (Ain Issa) (გრძედი-36⁰,49', განედი- 38⁰,59' ჩრდილოეთ სირიაში) სტავროპოლთან (გრძედი- 46⁰.06 ' , განედი- 42⁰.22', რუსეთი). ნახ.4.3.1(b) გვიჩვენებს აეროზოლის ქვეტიპებს, სადაც ყვითელი, წითელი და ყავისფერი წარმოადგენს მტვერს, დაბინძურებულ კონტინენტურ მტვერს და დაბინძურებულ მტვრის აეროზოლებს, შესაბამისად. ნახ.4.3.1(b) გვიჩვენებს, რომ ისრაელისა და სირიის ტერიტორიები დაფარულია ძლიერი მტვრის ღრუბლებით, მაგრამ ჩვენი ინტერესის ადგილები, როგორცაა კრეტა, როდოსი და თურქეთი, მიუწვდომელია CALIOP დაკვირვებისთვის. ნახ.4.3.1-ზე (c) და (d) (მიღებული დღისით - 2018 წლის 23 მარტის 10:30 საათიდან 10:43 საათამდე) CALIOP 3.40 –ის მიხედვით ძირითადად ასახავს სომალის, იემენის, საუდის არაბეთის, ერაყის, თურქეთის, შავი ზღვის წყლების (ტუაფსე), რუსეთის (კრასნოდარის მხარე) და უკრაინის (ხარკოვი) აეროზოლურ ღრუბლებს. ნახ.4.3.1- ზე (c)-(d) ნახაზების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ თურქეთის

ტერიტორია აეროზოლური ღრუბლებით არის დაფარული, მაგრამ შავი ზღვის, საქართველოს სანაპირო რაიონებისა და კრასნოდარის ტერიტორიის (სოჭის) წყლები არ იყო ხელსაყრელი რათა CALIOP მოწყობილობას ეწარმოებინა გაზომვები.

ცხრ.4.3.2. PM10-ის 24-საათიანი საშუალო კონცენტრაციების განაწილება თბილისის სხვადასხვა უბანში.

PM ₁₀ (mkg/m ³)	Tsereteli Avenue	Kazbegi Avenue	Varketili District	Vashlidjvari District	Average	BE	RMSE
26/7/2018	56.0	89.0	52.0	45.0	61.0	-	-
27/7/2018	148.0	179.0	152.0	206.0	172.0	33.17	47.31
28/7/2018	78.0	74.0	76.0	95.0	81.0	-	-
29/7/2018	52.0	53.0	54.0	55.0	54.0	-	-

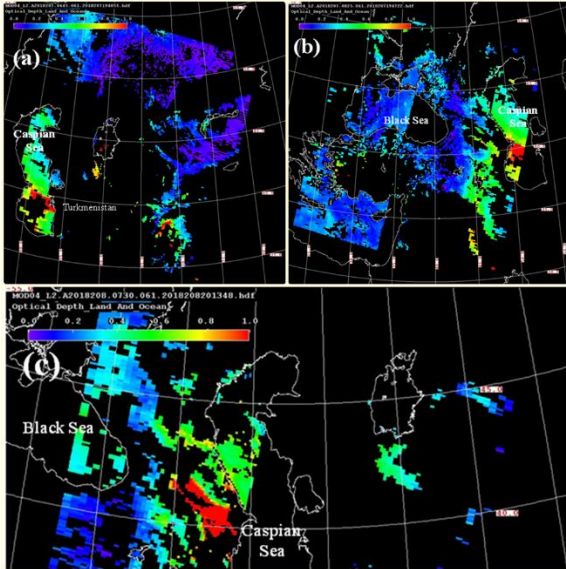
ცხრ.4.3.2 ადასტურებს, რომ ყარაყუმის მტვრის ქარიშხლის ნარჩენებმა თბილისის ტერიტორიაზე მიაღწიეს 2018 წლის 27 ივლისს. მიუხედავად იმისა, რომ მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობები არც თუ ისე მაღალია, როგორც ცხრ.4.3.2-ში, მაგრამ ამის მიუხედავად PM10 კონცენტრაციები (გასაშუალებული 24 საათის განმავლობაში) მაინც რამდენჯერმე მეტია ვიდრე ზღვ-ები თბილისის ყველა უბანში. კერძოდ, საშუალო კონცენტრაცია წერეთლის გამზირზე 2,96-ჯერ უფრო მაღალი იყო, ყაზბეგის გამზირზე 3,58-ჯერ, ვარკეთილში 3,04-ჯერ, ვიდრე შესაბამისი ზღვ, ხოლო მაქსიმალური კონცენტრაცია დაფიქსირდა ვაშლიჯვრის რაიონში სადაც 4,12-ჯერ აღემატებოდა ზღვ-ს. თბილისში PM10 კონცენტრაციის არათანაბარი განაწილება შეიძლება აიხსნას თბილისის რთული ტოპოგრაფიითა და ლოკალური ცირკულაციური პროცესების თავისებურებებით. ცხრ.4.3.2 გვიჩვენებს, რომ საერთო ჯამში, თბილისში საშუალო PM10 კონცენტრაცია 2018 წლის 27 ივლისს 3,44-ჯერმეტი იყო ვიდრე შესაბამისი ზღვ (50 მკგ/მ³). აღსანიშნავია, რომ თბილისში PM10 საშუალო კონცენტრაციათა მნიშვნელობები შენარჩუნდა და საკმაოდ მაღალი იყო 2018 წლის 29 ივლისამდე.



ნახ.4.3.2. CALIOP 3.40 ვერსიით შესრულებული გაზომვები: (a)-ვერტიკალური მახასიათებლების განაწილების სახე და (b)-აეროზოლის ქვეტიპი.

ნახ.4.3.2(ა) რომელიც წარმოადგენს ვერტიკალური მახასიათებლების განაწილებას, გვიჩვენებს, რომ სტანდარტული ღამის სატელიტური კვალი (მიღებული ღამის 22:01 – UTC დან 22:15 UTC-მდე, 2018 წლის 26 ივლისს) მოდის რუსეთიდან (დემინკა (გრძედი 59° 72 ', განედი 70° 00') ყაზახეთის (კოსკოლის), თურქმენეთის (ყარაყუმის), უზბეკეთის (შუა), ირანის (ფარიმა და ბამი), ომანის (ღაბ (გრძედი 23° 57 ', განედი 56° 85')) გავლით, ომანის სანაპირო ზონა (გრძედი 11° 40 ', განედი 54° 08', არაბეთისზღვაში) და აეროზოლური ნაკვთები ძირითადად შეიცავს 3 კილომეტრის ქვედა ფენას (რუსეთიდან ირანისკენ (კერმანი), ყარაყუმის უდაბნოს ჩათვლით) და სამხრეთით 6-7 კმ-იან ფენას (არაბეთის ზღვამდე). ნახ.6(ბ), რომელზედაც წარმოდგენილია აეროზოლების ქვეტიპები (მიღებულია 26 ივლისისღამის 22:01 UTC–დან 22:15 UTC- მდე) ადასტურებს, რომ თურქმენეთის (Karakum) ტერიტორია ნამდვილად დაბინძურებულია მტვრით, ხოლო რუსეთისა და ყაზახეთის ტერიტორიები ძირითადად დაბინძურებულია კვამლით და დაბინძურებული მტვრით. ხოლო ტერიტორიები ირანიდან არაბეთის ზღვამდე დაბინძურებულია მტვრისა და მტვრის აეროზოლების ნარევით. ნახ .4.3.2 (c) დანახ .4.3.2 (d) - მიღებულია 2018 წლის 27 ივლისის, ღამის 22:44 UTC –დან 22:58 UTC-

მდე, ნაჩვენებია CALIOP- ის გაზომვები რუსეთიდან (Perm გრძედი 59⁰.59', განედი 59⁰.37') საუდის არაბეთამდე (გრძედი 17⁰.80 ', განედი 44⁰.89'). ნახ .4.3.2 (c) და ნახ .4.3.2 (d) გვიჩვენებს, რომ კასპიის ზღვის თავზე 3-7 კმ-ზე და ფენაში ძლიერი მტვრის ღრუბლებია, ხოლო აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე უფრო მცირე ზომის ღრუბლებია ქვედა 3 კმ-იან ფენაში.



ნახ.4.3.3 აეროზოლური ოპტიკური სისქის (AOT) სიმაღლე-ორბიტა- განივი კვეთის გაზომვები, შესრულებული CALIOP ვერსიით 3.40.

MODIS L2 AOT პროდუქტი უზრუნველყოფს უდაბნოში მტვრის მომატებული კონცენტრაციის უფრო მკაფიოდ განსაზღვრას, ვიდრე CALIPSO. კვლევებმა აჩვენა, რომ MODIS-ით AOD-ს მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად დაბალია, ვიდრე CALIPSO-ით მიღებული AOD-ს მნიშვნელობები ბიომასის აქტიურად წვის რეგიონებში. მაგრამ MODIS-ით AOD-ს მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად აღემატება CALIPSO-ით მიღებული AOD-ს მნიშვნელობებს მტვრის არეებში (Ma et al. 2013). მართლაც, ნახ.4.3.3-ზე ნათლად ჩანს AOT MODIS-ის მიერ წარმოებული პროდუქტები შუა აზიაში (ნახ.4.3.3(a)) და კავკასიაში (ნახ.4.3.3(b),(c)). ნახ.4.3.3 ნახაზიდან აშკარად ჩანს, რომ მაქსიმალური AOT-ს მნიშვნელობები დაფიქსირებულია (გადაჭიმულია) კასპიის ზღვის თავზე 2018 წლის 26 ივლისს დილით (UTC: 06:45). ორი საათის შემდეგ, მტვერმა სრულად მოიცვა ბაქო და გადაადგილდა დასავლეთის მიმართულებით აზერბაიჯანის ტერიტორიაზე (ნახ.4.3.3(b). ნახ.4.3.3(c)-ის ანალიზი ნათლად გვიჩვენებს, რომ 23

საათის განმავლობაში ამ ძლიერმა მტვრის ნაკადმა დაიპყრო აზერბაიჯანისა და აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორია და 2018 წლის 27 ივლისის დილით მიაღწია საქართველოს დედაქალაქ თბილისს, რაც ადასტურებს ჩვენს მიერ მიღებული რიცხვითი თვლის შედეგებს.

4.4. მეოთხე თავის დასკვნა

ამ კვლევაში, უდაბნოებიდან (საჰარა-აფრიკაში, არაბული უდაბნოები-შუა აღმოსავლეთში, ყიზილყუმი და ყარაყუმი-შუა აზიაში) საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ტრანსპორტირების შესასწავლად პირველად დისტანციური ზონდირების საშუალებებთან ერთად, გამოიყენება რიცხვითი მოდელირება. კერძოდ, საქართველოს ტერიტორიაზე ინტენსიური მტვრის ქარიშხლების ტრანსპორტირების შესწავლის მიზნით სატელიტურ CALIPSO და MODIS პროდუქტებთან ერთად გამოიყენება WRF-Chem და HYSPLIT რიცხვითი მოდელები დაფუძნებული ჰიდროთერმოდინამიკის სრულ განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებაზე. WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგებმა, რომელიც წარმოებდა ყოველდღიურად 2017 წლის დეკემბრიდან 2018 წლის ნოემბრამდე, აჩვენა, რომ ამ პერიოდში საქართველოს ტერიტორიაზე დაფიქსირდა მტვრის მასის შემოტანის ცხრა შემთხვევა. ამ ნაშრომში განხილულია და შესწავლილია მხოლოდ 2018 წლის 22-24 მარტს და 25-26 ივლისის მოვლენები. WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგების შედარებამ გარემოს ეროვნული სააგენტოს რეალურ PM10 მონაცემებთან და სატელიტურ CALIOP და MODIS პროდუქტებთან აჩვენა, რომ WRF-Chem v.3.6.1 მოდელი, რომელიც შემუშავებულ იქნა კავკასიისთვის, კარგად სიმულირებდა მტვრის აეროზოლების მიგრაციას საჰარისა და ყარაყუმის უდაბნოებიდან კავკასიის რთული რელიეფის პრობებში. გარდა ამისა, ჩადგმულ ბადეებზე ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ მცირე რეზოლუციის ბადეზე, ჰორიზონტალური ბიჯით 12,4 კმ, გააუმჯობესა რიცხვითი თვლის შედეგები. უნდა აღინიშნოს, რომ ცენტრალურ აზიაში მდებარე თაკლი-მაკანისა და გობის უდაბნოები შედარებით შორსაა კავკასიის (საქართველო) ტერიტორიიდან და WRF-Chem მოდელმა ვერ შეძლო დაეფიქსირებინა მტვრის ქარიშხლებით აელონური მტვრის

ტრანსპორტირება თაკლი-მაკანისა და გობის უდაბნოებიდან სამხრეთ კავკასიის ტერიტორიაზე ჩვენი მოკლევადიანი (48 საათიანი) რიცხვითი გათვლებით. მაგრამ მტვრის ქარიშხლის შემთხვევაში ყიზილყუმისა და ყარაყუმის უდაბნოებში (მდებარეობენ კავკასიასთან უფრო ახლოს), WRF-Chem და HYSPLIT მოდელებით თვლის შედეგებმა აჩვენა, რომ მტვრის ქარიშხლებმა ცხრაჯერ მიაღწია სამხრეთ კავკასიის ტერიტორიას (საქართველო) ერთი წლის პერიოდში, რაც სიახლეა. გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემების მიხედვით, კვლევის პერიოდში საქართველოში ისედაც მაღალი იყო PM10 მტვრის კონცენტრაციის ფონური მნიშვნელობები (ცხრ. 2-3). ასევე PM2.5 -ის კონცენტრაცია 2019 წელს საქართველოში 2-ჯერ აღემატებოდა WHO-ს დასაშვებ რეკომენდაციას (<https://www.iqair.com/georgia>). დამატებით მტვრის ქარიშხლებით შემოტანილი უდაბნოს ეოლინური მტვერი მნიშვნელოვნად მოქმედებს საქართველოს კლიმატურ სისტემაზე (დავითაშვილი და სხვები, 2018). აქედან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ მტვრის აეროზოლები ძლიერ გავლენას ახდენენ და არიან აქტიური მოთამაშე საქართველოს ჯანმრთელობის, სოფლის მეურნეობისა და კლიმატის სისტემებში.

მოკლედ, შეგვიძლია შევაჯამოთ, რომ WRF-Chem მოდელმა შეძლო კარგად წარმოედგინა მტვრის აეროზოლების გადატანა მიმდებარე უდაბნოებიდან საქართველოს ტერიტორიაზე რთული ოროგრაფიის პირობებში; შესასწავლი პერიოდის განმავლობაში მტვრის აეროზოლების ტრანსპორტირება ხდებოდა როგორც აფრიკის და შუა აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან, ასევე ცენტრალური (დასავლეთ) აზიიდან, რაც მანამდე არ იყო დაფიქსირებული კავკასიის მცინვარებზეც კი; წვრილი რეზოლუციის ქსელის (12,4 კმ) გამოყენებამ მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა რიცხვითი მოდელირების ხარისხი. აღმოჩნდა, რომ მინერალური მტვრის აეროზოლი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გარემოსა და საქართველოს კლიმატური სისტემის დაბინძურებაზე; WRF-Chem ის ამ მოდელმა დაადასტურა, რომ ის კარგი საშუალებაა საქართველოში მტვრის გავრცელების პროგნოზირებისთვის და იგი წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას გარემოს ეროვნულ სააგენტოს მიერ ჰაერის მტვრით დაბინძურების პროგნოზირებისთვის.

დასკვნა

ატმოსფერული ჰაერის დინამიკა იზოლირებული დაბრკოლებისა და სამხრეთ კავკასიის რეალურ რელიეფის შემთხვევაში, არასტაციონარული ფართომასშტაბიანი ფონური პროცესების არსებობის პირობებში შესწავლილია სამგანზომილებიანი ჰიდროსტატიკური მეზომასშტაბური მოდელის საფუძველზე. რიცხვითი ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ ოროგრაფიულ თავისებურებათა გავლენა, ტროპოსფეროში მნიშვნელოვნად გარდაქმნის არამდგრად ფონურ ნაკადს. კერძოდ, სინოპტიკური მასშტაბის ატმოსფერული ჰაერის მოძრაობის დროს მნიშვნელოვნად იზრდება მეზომასშტაბური ნაკადის ამპლიტუდები ვერტიკალური მიმართულებით და მათი საშუალო მნიშვნელობიდან სიჩქარის გადახრის მნიშვნელობები (ქარის სიჩქარის მაქსიმალურმა სიდიდემ მიაღწია 26 მ/წმ-ს, როდესაც შეუშფოთებელი ფონის ჰაერის ნაკადის სიჩქარე იყო 12 მ წმ). გარდა ამისა, ნაჩვენები იქნა, რომ ფონური დინების არარსებობის შემთხვევაშიც, ატმოსფერული ქარის სიდიდემ შეიძლება მნიშვნელოვნად მოიმატოს რთული ოროგრაფიის პირობებში. გარდა ამისა, გაანგარიშების შედეგებმა აჩვენა, რომ კავკასიონის ქედმა მნიშვნელოვნად გაზარდა ტროპოსფეროში ატმოსფერული დინებათა ამპლიტუდები და გააჩინა მორევის ტიპის სტრუქტურები მცირე ფონური დინების შემთხვევაშიც. ეს შედეგები პირველად იქნა მიღებული რიცხვითი მოდელირებით და ეთანხმება მეტეოროლოგიურ დაკვირვებათა მონაცემებს.

დისერტაციაში შესწავლილ იქნა ატმოსფერულ ნაკადთა სიძლიერე და განმეორადობის მახასიათებელი პარამეტრები, ენერგეტიკული თვალსაზრისით, ქუთაისის მაგალითზე. როგორც კვლევამ აჩვენა ყველაზე მეტი განმეორებადობა გვაქვს ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედში, ყველაზე მცირე კი 25 მ/წმ-ზე მეტი სიჩქარის შემთხვევაში. თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ მათთვის ქარის სიჩქარის სეზონური ცვლილება თითქმის ერთნაირი იყო. განმეორებათა რიცხვის მაქსიმუმი აღინიშნებოდა ზამთრის ბოლოს და გაზაფხულის დასაწყისში, ასევე შემოდგომის ბოლოს და ზამთრის დასაწყისში. შესაძლებელია ვთქვათ, რომ ქუთაისის რეგიონისთვის ძირითადი

წამყვანი ქარის სიჩქარის შუალედია 16-20 მ/წმ რაც ძალიან მნიშვნელოვანია ენერგეტიკული თვალსაზრისით. ასევე აღსანიშნავია, რომ 20-25 მ/წმ ინტერვალის ქარის მნიშვნელობები მინიმალურია ზაფხულში დანარჩენ სეზონებთან შედარებით, თუმცა ენერგეტიკული თვალსაზრისით ეს არ არის მნიშვნელოვანი, რადგანაც ენერჯის მოხმარება ამ პერიოდში მინიმალურია. ქარის სიჩქარის 16-20 მ/წმ შუალედი უზრუნველყოფს ქარის ენერჯის გამოყენების მაქსიმალურ ეფექტურობას და ასეთი სიდიდის ქარის სიჩქარეები უზრუნველყოფენ ქარის ენერგეტიკული დანადგარის გამართულ ავტომატურ რეჟიმს რაც წარმოადგენს ქარის ელექტროსადგურების გავითარებისთვის მნიშვნელოვან საფუძველს დასავლეთ საქართველოს რეგიონისთვის.

საქართველოს ტერიტორიაზე მიმდინარე ძლიერი, საშიში მეტეოროლოგიური პროცესები ხშირად ლოკალური ხასიათისაა და ხშირ შემთხვევაში გამოწვეულია (პროვოცირებულია) საქართველოს რთული რელიეფის არაერთგვაროვანი განაწილებით. უნდა აღინიშნოს, რომ ამინდის საპროგნოზო რეგიონალურმა (WRF) მოდელმაც კი, რომელიც კარგად ითვალისწინებდა კავკასიის რელიეფის არაერთგვაროვნებას ერთმანეთში ჩადგმული ბადეებით (16 კმ და 2.2 კმ) ვერ დააფიქსირა 2015 წლის 13 ივნისის, 2016 წლის 21, 23 ივნისს და 2 აგვისტოს განვითარებული ძლიერი კონვექციური მოვლენები ჩვენს მიერ WRF მოდელში მოსინჯული ვერც ერთი ატმოსფეროს პარამეტრიზაციის სქემების საშუალებით. ასევე ნაშრომში ჩვენს მიერ შესწავლილია აღმოსავლეთ საქართველოში განვითარებული ძლიერი მეტეოროლოგიური პროცესების რამოდენიმე შემთხვევა. განხილული შემთხვევებისათვის აეროლოგიურმა დიაგრამებმა კვლავ ზუსტად აჩვენეს ატმოსფეროს არამდგრადობა ლოკალურ ტერიტორიაზე, მიუხედავად იმისა, რომ არამდგრადობის ხარისხი ოთხივე შემთხვევაში იყო განსხვავებული, ეს განსხვავება ზუსტად შეესაბამებოდა კონკრეტული დღის რეალურ მეტეოროლოგიურ მდგომარეობას (მეტეოროლოგიური რადარის მონაცემების მიხედვით). მიღებული შედეგების საფუძველზე შეიძლება ვთქვათ, რომ NOAA-ის ARL -ის READY სისტემის საშუალებით კონკრეტული რეგიონისთვის მიღებული

საპროგნოზო აეროლოგიური მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მოვახდინოთ ატმოსფეროს თერმოდინამიკური მდგომარეობის პროგნოზი და შევაფასოთ ლოკალურ ტერიტორიაზე კონვექციური პროცესების შესაძლო განვითარების ხარისხი, რომლის გამოყენება საქართველოს ამინდის საპროგნოზო ოპერატიულ სამსახურში არსებულ საპროგნოზო მეთოდებთან ერთად გააუმჯობესებს ამინდის წინასწარმეტყველების ხარისხს.

ამ კვლევაში, უდაბნოებიდან (საჰარა-აფრიკაში, არაბული უდაბნოები-შუა აღმოსავლეთში, ყიზილყუმი და ყარაყუმი-შუა აზიაში) საქართველოს ტერიტორიაზე მტვრის ტრანსპორტირების შესასწავლად პირველად დისტანციური ზონდირების საშუალებებთან ერთად, გამოიყენება რიცხვითი მოდელირება. კერძოდ, საქართველოს ტერიტორიაზე ინტენსიური მტვრის ქარიშხლების ტრანსპორტირების შესწავლის მიზნით სატელიტურ CALIPSO და MODIS პროდუქტებთან ერთად გამოიყენება WRF-Chem და HYSPLIT რიცხვითი მოდელები დაფუძნებული ჰიდროთერმოდინამიკის სრულ განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებაზე. WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგებმა, რომელიც წარმოებდა ყოველდღიურად 2017 წლის დეკემბრიდან 2018 წლის ნოემბრამდე, აჩვენა, რომ ამ პერიოდში საქართველოს ტერიტორიაზე დაფიქსირდა მტვრის მასის შემოტანის ცხრა შემთხვევა. ამ ნაშრომში განხილულია და შესწავლილია მხოლოდ 2018 წლის 22-24 მარტს და 25-26 ივლისის მოვლენები. WRF-Chem მოდელის თვლის შედეგების შედარებამ გარემოს ეროვნული სააგენტოს რეალურ PM10 მონაცემებთან და სატელიტურ CALIOP და MODIS პროდუქტებთან აჩვენა, რომ WRF-Chem v.3.6.1 მოდელი, რომელიც შემუშავებულ იქნა კავკასიისთვის, კარგად სიმულირებდა მტვრის აეროზოლების მიგრაციას საჰარისა და ყარაყუმის უდაბნოებიდან კავკასიის რთული რელიეფის პრობებში. გარდა ამისა, ჩადგმულ ბადეებზე ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ მცირე რეზოლუციის ბადეზე, ჰორიზონტალური ბიჯით 12,4 კმ, გააუმჯობესა რიცხვითი თვლის შედეგები. გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემების მიხედვით, კვლევის პერიოდში საქართველოში ისედაც მაღალი იყო PM10 მტვრის კონცენტრაციის ფონური მნიშვნელობები. ასევე PM2.5 -ის კონცენტრაცია 2019 წელს საქართველოში 2-ჯერ აღემატებოდა WHO-ს

დასაშვებ რეკომენდაციას (<https://www.iqair.com/georgia>). დამატებით მტვრის ქარიშხლებით შემოტანილი უდაბნოს ეოლინური მტვერი მნიშვნელოვნად მოქმედებს საქართველოს კლიმატურ სისტემაზე (დავითაშვილი და სხვები, 2018). აქედან გამომდინარე, შეიძლება ითქვას, რომ მტვრის აეროზოლები ძლიერ გავლენას ახდენენ და არიან აქტიური მოთამაშე საქართველოს ჯანმრთელობის, სოფლის მეურნეობისა და კლიმატის სისტემებში. WRF-Chem ის ამ მოდელმა დაადასტურა, რომ ის კარგი საშუალებაა საქართველოში მტვრის გავრცელების პროგნოზირებისთვის და იგი წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას გარემოს ეროვნულ სააგენტოს მიერ ჰაერის მტვრით დაბინძურების პროგნოზირებისთვის.

სადოქტორო ნაშრომის ფარგლებში გამოქვეყნებული სტატიები:

1. Davitashvili, T., Samkharadze, I. Study of Aeolian transfer of mineral dust from deserts to the territory of Georgia. *Arab J Geosci* 14, 67 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06407-2>
2. Davitashvili T., Samkharadze I., Sharikadze M. (2020) Modeling of Extreme Events and Regional Climate Variability on the Territory of the Caucasus (Georgia). pp. 61-82, In: Jaiani G., Natroshvili D. (eds) Applications of Mathematics and Informatics in Natural Sciences and Engineering. AMINSE 2019. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 334. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56356-1_5
3. Teimuraz Davitashvili, Inga Samkharadze, Lika Megreladze and Ramaz Kvatadze (2020), „Using modern technology to protect vineyards from hail amid climate change” E3S Web of Conferences. https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/10/e3sconf_icies2020_00034/e3sconf_icies2020_00034
4. Teimuraz Davitashvili, Nato Kutaladze, Ramaz Kvatadze, Georgi.Mikuchadze, Zurab Modebadze, Inga Samkharadze. (2016). „Showers Prediction by WRF Model above Complex Terrain”, *Proceedings of the 39th International Convection MIPRO 2016/DC VIS*, Opatija, Croatia, 236-241.
5. ი. სამხარაძე, ზ. ხვედელიძე. ნ.ზოტიკიშვილი (2016). „ქარის რეჟიმი საქართველოს ზოგიერთი რეგიონისთვის ბოლო ორმოცდაათი წლის მანძილზე“. საერთაშორისო კონფერენციის მასალები „გეოგრაფიისა და ანტროპოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“. თსუ. გვ.195-198.
http://aljavakhishvili-2015.tsu.ge/data/file_db/pdf/KREBULI%20-%20al.%20javaxishvili.%20tiraji%20200.pdf
6. Marika Tatishvili, Inga Samkharadze (2017). „Local disturbances and wind field distribution modeling in Georgia“ *International Scientific Journal of Environmental Science* . ISSN: 2367-8941.
<http://environment.scientific-journal.com/articles/6/1.pdf>

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Andreae MO., Rosenfeld D. (2008). Aerosol-cloud precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-Science Review* 89, 13–41.
- [2] ATSC 3032-Weather Analysis and Forecasting: Skew T diagrams and Stability.
- [3] Benjamin S.G., Grell G.A., Brown J. M. (2004) Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. *Monthly Weather Review* 132, 473-494.
- [4] Blanchard D.O. (1998). Assessing the Vertical Distribution of Convective Available Potential Energy. *American Meteorological Society*. 870-877. NOAA/National Severe Storms Laboratory, Boulder, Colorado. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0870:ATVDOC>2.0.CO;2)
- [5] Charlson R.J., Schwartz S.E., Hales J.M. et al. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science* 255 (5043), 423-430.
- [6] Chen S, Sun W. (2002). A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteor Soc. Japan*. 80(1), 99-118.
- [7] Chin M, Rood RB, Lin SJ, Muller JF, Thompson AM. (2000). Atmospheric sulfur cycle in the global model GOCART: Model description and global properties. *J. Geophys. Res. Atmos.* 105, 24671–24687
- [8] Choobari O.A., Zawar-Reza P., Sturman A. (2014) The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system. *Atmospheric Research* 138, 152–165.
- [9] Claus A. J. (1964). Large-amplitude motion of a compressible fluid in the atmosphere. *J. Fluid. Mech.* 19(2), 267-289.
- [10] Cohen A.E., Cavallo S.M., Coniglio M.C., Brooks H.E. (2015). A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. *Cold Season Severe Weather Environments*. 30, 591-612.
- [11] Davitaashvili T, Gordeziani D. (2000). Mathematical Model with Non-local Boundary Conditions for the Atmosphere Pollution.- *Bulletin of the Georgia Academy of Sciences* 161(3), 435-437

- [12] Davitashvili T, Khantadze A. (2004). Research of Conditions of the climate Change in Georgia in view of Regional Anthropogenic Factors'. Journal " Geography and Natural Resources". Novosibirsk, Russia, 302-308 (in Russian).
- [13] Davitashvili T, Khantadze A. (2008). On Climate, Desertification and Water Pollution Problems For the Territory of Georgia, NATO Security Through Science. Series-C: Environmental Security in Book "Simulation and Assessment of Chemical processes in a Multiphase Environment" Edited by I. Barnes and M.M. Kharitonov, Published by Springer, Netherlands, 453-469.
- [14] Davitashvili T, Samkharadze I. (2021). Study of Aeolian transfer of mineral dust from deserts to the territory of Georgia. *Arab. J. Geosci.* 14(67). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06407-2>
- [15] Davitashvili T. (1988). On some wave properties of barotropic atmosphere prediction equations with account of orographic effects. Proceedings VIAM TSU, 25, 81-92. (Russian)
- [16] Davitashvili T. (1996). Regional nested grid numerical model for baroclinic atmosphere forecast. *Journal of Georgian Geophysical Society.* 2, 43-50.
- [17] Davitashvili T. (2019). Modelling transportation of desert dust to the South Caucasus using WRF Chem model. *E3S Web of Conferences* 99, 03011, CADUC 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199903011>.
- [18] Davitashvili T. (1985). The use of nested grid method in a numerical prediction of the mid-level geopotential for the Caucasus area. Proceedings of VIAM. 15, 94-112. (Russian)
- [19] Davitashvili T. (1988). The use of nested grid methods in the mid-level dew point deficit prediction model. Proceedings VIAM TSU, 25, 107-117. (Russian)
- [20] Davitashvili T. (1996). Regional nested grid numerical model for baroclinic atmosphere forecast. *Journal of Georgian Geophysical Society* 2, 43-50.
- [21] Davitashvili T., Demetrashvili D. (2015). Numerical Modeling of Air Flow above the Caucasus Region, *Proceedings of the Tbilisi International Conference on Computer Sciences and Applied Mathematics (TICCSAM 2015)*, March 21-23, 2015, Tbilisi, Georgia, 175-185.
- [22] Davitashvili T., Janelidze P. (1979). On the prediction of short-term Geopotential, using complete equations of hydrodynamics with account of orography. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Georgian SSR.* 96, 1, (Russian).

- [23] Davitashvili T., Kobiashvili G., Kvatadze R., Kotaladze N., Mikuchadze G. (2009). “WRF-ARW Application for Georgia” Report of SEE-GRID-SCI User Forum, Istanbul, Turkey. 7-10 .
- [24] Davitashvili T., Kotaladze N., Kvatadze R. et al. (2018). Effect of dust aerosols in forming the regional climate of Georgia. *Scalable Computing: 88 Practice and Experience* 19 (2), 199–208.
- [25] Davitashvili T., Kvatadze R., Kotaladze N. (2011). Weather Prediction Over Caucasus Region Using WRF-ARW Model. MIPRO, Proceedings of the 34th International Convection, 2011, Print ISBN: 978-1-4577-0996-8, Opatija, Croatia. 326-330
- [26] Demetrashvili D. I. (1979). A nonstationary problem of meso-scale processes in the free atmosphere over orographically inhomogeneous Earth’s surface, *Izv.AN USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*. 15(7), 609-709.
- [27] Demetrashvili D., Davitashvili T. (2013). A modeling study of mesoscale airflow over the mountainous relief with variable in time large-scale background flow. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 7(2), 57-64.
- [28] Diodato N. (2005). The Influence co-variables on the spatial variability of precipitation over small Regions of complex Terrain. *International Journal of Climatology*. 25, 351-363.
- [29] Dong Zh., Li Zh., Xiao C., et. al. (2009). Characteristics of aerosol dust in fresh snow in the Asian dust and non-dust periods at Urumqi glacier no 1 of eastern Tian Shan, China. *Environmental Earth Sciences*. 60, 1361–1368.
- [30] Draxler R.R., Hess G.D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine*. 47, 295–308.
- [31] Duda J. D. (2011). WRF simulations of mesoscale convective systems at convection-allowing resolutions Graduate Theses and Dissertations. Paper 10272
- [32] Eghbali A., Mirrokni S. M., Memarian MH. (2016). Dust storm simulation using WRF–Chem. (case study: West Asia), *Inter. J. Recent Research and Applied Studies*. 28(1), 1-12.
- [33] Erel Y., Dayan U., Rabi R et. al. (2006). Transboundary transport of pollutants by atmospheric mineral dust. *Environmental Science Technology* . 40, 2996–3005.

- [34] Ferrier B.S., Jin Y., Lin Y., Black T, Rogers E., DiMego G. (2020). Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. Preprints 15th Conf. on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX. *Amer. Meteor. Soc.* 280–283.
- [35] Finardi S., Morzeli M. (1997). Wind Flow Models over Complex Terrain for Dispersion Calculations”. *Report of Working Group 4. Cost Action 710.* 50.
- [36] Gilliland E. K. and Rowe C. M. (2007). A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model. Preprints, 21st Conf. on Hydrology, San Antonio, TX, *Amer. Meteor. Soc.* 16.
- [37] Ginoux P., Prospero JM., Gill TE et. al. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Review Geophysics.* 50, RG3005: 1-36 doi:10.1029/2012RG000388
- [38] Gordeziani D, Davitashvili T, Khvedelidze Z . (2000). On the One Mathematical Model of the Georgian Transport Corridor Pollution.-Bulletin of the Georgia Academy of Sciences 162(1), 73-76.
- [39] Grell G. A. and Dévényi D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.* 29 (14), 1693. doi: 10.1029/2002GL015311.
- [40] Grell GA, Peckham SE, Schmitz R. et. al. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* . 39, 6957–6976.
- [41] Grousset FE., Ginoux P., Bory A et. al. (2003). Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps. *Geophysical Research Letters.* 30 (6), 1277.
- [42] Gutman L. N. (1972). Introduction to the nonlinear theory of mesoscale meteorological processes. Jerusalem. 293 .
- [43] Han Y., Dai X., Fang X et. al. (2008). Dust aerosols: A possible accelerant for an increasingly arid climate in North China. *Journal of Arid Environment* 72, 1476–1489.
- [44] Hernandez E & Diaz J. (1995). Analysis of the atmosphere behavior in the proximities of an orographic obstacle”. *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2, 30-48.
- [45] Hong S.Y. and Lim O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)”. *J. Korean Meteor. Soc.* 42, 129–151.

- [46] Hong S.Y., Dudhia J., and Chen S.H.(2004). A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Mon. Wea. Rev.* 132, 103–120.
- [47] Huang J., Minnis P., Yan H et. al. (2010). Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements. *Atmospheric Chemistry Physics* 10, 6863–687.
- [48] Huang JH., Yu A., Dai Y., Wei., Kang L. (2017). Drylands face potential threat under 2°C global warming target. *Nature Climate Change* 7(6). <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3275>
- [49] Huang JM., Ji Y., Xie S., Wang Y He., Ran J. (2016). Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics* 46(3-4), 1131-1150. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2636-8>
- [50] Huang JX., Guan., and F Ji. (2012). Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12, 5391-5398. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5391-2012>
- [51] Hui WJ., Cook BI., Ravi S., Fuentes JD.,’Odorico PD. (2008). Dust-rainfall feedbacks in the West African Sahel. *Water Resour. Res.* 44, W05202. <https://doi.org/10.1029/2008WR006885>
- [52] Iacono MJ., Delamere JS., Mlawer EJ et. al. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J of Geophysical Research* 113, 1-8.
- [53] Janjić Z.I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.* 122, 927–945.
- [54] Janjić Z.I. (2000). Comments on “Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models”. *J. Atmos. Sci.*, 57, 3686.
- [55] Janjic Z.I. (2002). Nonsingular implementation of the Millor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note 437, 61.
- [56] Javakhishvili Sh. (1981). Atmospheric precipitations on the territory of Georgia, Tbilisi. 182 (Georgian).
- [57] Javakhishvili Sh. (1988). Georgian Climate Description by the Months. Publishing House “*Ganatileba*”. Tbilisi, 153. (in Georgian).
- [58] Kain J. S. and Fritsch J. M. (1992). The role of the convective “trigger function” in numerical forecasts of mesoscale convective systems. *Meteor. and Atmos. Phys.*, 49, 93–106.

- [59] Kain J. S. and Fritsch J. M. (1993). Convective parameterization for mesoscale models: The Kain–Fritsch scheme. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr., *Amer. Meteor. Soc.* 24, 165–170.
- [60] Kain J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J. Appl. Meteor.* 43, 170–181.
- [61] Kang S., Zhang Y., Zhang Y., et. al. (2010). Variability of atmospheric dust loading over the central Tibetan Plateau based on ice core glaciochemistry. *Atmospheric Environment*. 44, 2980–2989.
- [62] Khvedelidze Z., Amiranashvili A., Dolidze J., Chitaladze D. (2004). Statistical structure of diurnal precipitation distribution on the territory of Eastern Georgia. *Proceedings, tsu*, 39, 79-87.
- [63] Khvedelidze Z., Davitashvili T. (1978). Effect of the changeability of the Coriolis' force and Geopotential variation in availability of mountains. *J. Meteorology and hydrology* . 3. 36-40. (Russian).
- [64] Kibel I. A. (1964). Trudy MMTS. 3, 3-17 (in Russian).
- [65] Kim KW., Kim YJ., Oh SJ. (2001). Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea. *Atmospheric Environment*. 35(30), 5157-5167.
- [66] Kordzadze A. & Demetrashvili D. (2000). Numerical modeling of distribution of the oil pollution in the Black Sea. *Journal of the Georgian Geophysical society*. Tbilisi, 5B, 120-121.
- [67] Kordzakhia M. (1961). The Climate of Georgia. *Academy of Science of Georgia SSR*, Tbilisi, 246 (in Georgian).
- [68] Kutuzov SS., Mikhalenko VN., Grachev AM et. al. (2016). First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier. Caucasus Mountains. *Environmental Earth Sciences*. 75(23), 1-15.
- [69] Kutuzov SS., Mikhalenko VN., Shahgedanova MV et. al. (2014). Ways of far-distance dust transport onto Caucasian glaciers and chemical composition of snow on the Western plateau of Elbrus. *Lёд i Sneg* 54 (3), 5-15.
- [70] Li L., Sokolik I. N. (2018) Analysis of Dust Aerosol Retrievals Using Satellite Data in Central Asia. *Atmosphere* 9, 288.

- [71] Li Z., Zhao S., Edwards R., et. al. (2011). Characteristics of individual aerosol particles over rümqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia, China. *Atmospheric Research* . 99, 57–66
- [72] Lin YL, Farley RD, Orville HD. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* . 22, 1065–1092
- [73] Long R.R. (1954). Some aspects of the flow stratified fluids. II. Experiments with a two-flid system. *Tellus*, 6(2), 97-115.
- [74] Long R.R. (1955). Some aspects of the flow stratified fluids. III. Continuous density gradients. *Tellus*, 7(3), 341-357.
- [75] Ma L.-M. and Tan Z.-M. (2009). Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: convection trigger. *Atmos. Res.*, 92, 190-211.
- [76] Martin F. Price., Alton C. Byers., Donald A. Friend., Thomas Kohler., Larry W. Price. (2013). Mountain Geography: Physical and Human Dimensions. *Univ of California Press*. 396 .
- [77] Mikhaleiko V., Sokratov S., Kutuzov S. et. al. (2015). Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau the Caucasus, Russia. *The Cryosphere* . 9, 2253–2270.
- [78] Monin A. S., Obukhov A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Geofiz. Inst., Akad. Nauk SSSR*, 24, 1963–1967 (in Russian).
- [79] Nakanishi M., Niino H. (2009). Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 87 (5), 895–912.
- [80] Omar AH., Winker DM., Kittaka C. et al. (2009). The calipso automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm. *Journal of Atmospheric Ocean and Technology*. 26, 1994–2014.
- [81] Orlando, Florida A. & L. Kondowe. (2014). Method to Identify the Better WRF Parameterizations Set to Describe Lightning Occurrence”, 3rd meteorological Lightning Conference, 21-22 April, 2010, “Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model”, *Natural Science*. 6, 691-699.
- [82] Prasad AK., Yang K-H S., El-Askary H. M., et. al. (2009). Melting of major Glaciers in the western Himalayas: evidence of climatic changes from long term MSU derived tropospheric temperature trend (1979–2008). *Annals of Geophysics*. 27, 4505–4519.

- [83] Quency P. (1948). The problem of air flow over mountains: A summary of theoretical studies. *Bull. Am. Meteorol.Soc.* 29,16-25.
- [84] Remer LA, Kaufman YJ, Tanr'e, D et. al. (2005). The MODIS algorithm, products and validation. *Journals of the Atmospheric Sciences* . 62, 947–973.
Reviews of Geophysics. 50, 1-47.
- [85] Richtmayer R. & K. Morton (1972). Raznostnye metody resheniya kraevykh zadach. 418 (Russian).
- [86] Rizza U, Anabor V, Mangia C, Miglietta MM, Degrazia GA, Passerini G. (2016). WRF-Chem Simulation of a saharan dust outbreak over the mediterranean regions 38, 330–336. <https://doi.org/10.5902/2179460X20249>.
- [87] Rizza U, Barnaba F, Miglietta MM et. al. (2017). WRF-Chem model simulations of a dust outbreak over the central Mediterranean and comparison with multi-sensor desert dust observations. *Atmospheric Chemistry Physics.* 17, 93–115.
- [88] Robert A. Houze Jr . (2011). Orographic Effects on Precipitating Clouds. *Reviews of Geophysics.* 47.
- [89] Robert A., Houze Jr. (2012). Orographic effects on precipitating Clouds.
- [90] Rolph G., Stein Ar., Stunder B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software.* 95. 210-228. www.elsevier.com/locate/envsoft.
- [91] Rosenfeld D., Rudich Y., Lahav R. (2001). Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop. *Proceedings National Academy Science.* USA 98, 5975–5980.
- [92] Samkharadze I., Davitashvili T.(2004) Some Problems of the Environmental Pollution, Reports of Enlarged Session of the Seminar of I. Vekua Institute of Applied Mathematics, Vol. 19, No 1 , 2004, p.p. 98-102
- [93] Sawyer J.R. (1960). Numerical calculation of the displacement of a stratified airstream crossing a ridge of small height. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 86(369), 326-345.

- [94] Schwikowski M., Brüttsch S., Gäggeler HW et. al. (1999). A high-resolution air chemistry record from an Alpine ice core: Fiescherhorn glacier, Swiss Alps. *Journal of Geophysics Research* 104, 13709–13719.
- [95] Scorer R.S. (1949). Theory of waves in the lee of mountains. *Q.J.R. Meteorol.* 75 (323), 41-56.
- [96] Scorer R.S. (1953). Theory of airflow over mountains: II. The flow over a ridge. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 79(339), 70-83.
- [97] Scorer R.S. (1954). Theory of airflow over mountains: III .Airstream characteristics. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* ,80(345), 417-428.
- [98] Segele Z. T., Lance M., Leslie and Peter J. Lamb. (2013). Weather Research and Forecasting Model simulations of extended warm-season heavy precipitation episode over the US Southern Great Plains: data assimilation and microphysics sensitivity experiments. *Tellus.* 65, 1-26.
- [99] Selex ES GmbH · Gematronik Weather Radar Systems. Rainbow®5 User Guide, 464 (www.Gematronik.com.).
- [100] Shahgedanova M., Kutuzov S., White K H et. al. (2013). Using the significant dust deposition event on the glaciers of Mt. Elbrus, Caucasus Mountains, Russia on 5 May 2009 to develop a method for dating and “provenancing” of desert dust events recorded in snow pack. *Atmospheric Chemistry Physics* 13, 1797–1808.
- [101] ShaoY., Ishizuka M., Mikami M., Leys JF. (2011a). Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. *Journal of Geophysics Research* .116,1-19.
- [102] Silva G.T., Herath S., Weerakoon S.B. & Rathnayake U.R. (2010). Application of WRF with different cumulus parameterization schemes for precipitation forecasting in a tropical river basin. *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*, 17-21 December 2010, Dhaka, Bangladesh, 513-516.
- [103] Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J.G. (2005). A description of the advanced research WRF Version 2. NCAR Tech. Notes. Natl. Cent. *Atmos. Res.*, Boulder, Colorado.
- [104] Smith H. (1979). The Influence of mountains on the Atmosphere”. *Advances in Geopysics.* 21, 87-230.

- [105] Sodemann H., Palmer AS., Schwierz C et. al. (2006). The transport history of two Saharan dust events archived in an Alpine ice core. *Atmospheric Chemistry Physics*. 6, 667–668.
- [106] Solomon S, Qin D, Manning, M. et al. (Ed.). (2007). IPCC: Climate Change, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA*.
- [107] Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 2059e2077. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- [108] Surmava A.(2000). The numerical investigation of air motion over Caucasian Region in Case of Background Southerm wind. *Journal of the Georgian Geophysical society*. Tbilisi, 5B, 28-39.
- [109] Wang W. and Seaman N. L. (1997). A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* 125, 252-278.
- [110] Wang X., Huang J., Ji M., Higuchi K. (2008). Variability of East Asia dust events and their long-term trend. *Atmospheric Environonment* 4, 3156–3165.
- [111] Winker D, Hunt W, McGill M (2007) Initial Performance Assessment of CALIOP. *Geophysics Research Letters* 34: L19803
- [112] Yair Y., Lynn B., Price C., Kotroni V., Lagouvardos K., Morin E., Mugnai A. and Llasat M. d. C. (2010). Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *J. Geophys. Res.*, 115. D04205, doi: 10.1029/2008JD010868.
- [113] Yoshino M.M. (1981). Orographically-induced atmospheric circulations. *Progress in Physical Geography* . 5 (1), 76-98.
- [114] Zepka G. S. and Pinto Jr. O. (2010). A Method to Identify the Better WRF Parameterizations Set to Describe Lightning Occurrence, 3rd meteorological Lightning Conference, 21-22 April, 2010, Orlando, Florida, USA. 1-10
- [115] Zhang XY., Arimoto R., An Z S. (1997). Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation. *Journal of Geophysics Research*. 102, 28041–28047.

- [116] Белов Н. (1989). Численные методы прогноза почоде, Л., гидрометеоздат,. 375.
- [117] Белов П. (1975). Численные методы прогноз и погоди, *Гидрометиздат Л.* 375.
- [118] Берлянд М. (1975). Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., *гидрометеоздат*, 449.
- [119] Быков В. (1962). Об учете отклонения ветра от геострофического в краткосрочном прогнозе. *Изд. АИ. СССР. Серия геофизики.* 3, 418-423.
- [120] Гуния С.(1958). Переваливание воздушных потоков через горных хребти. *Метеорология и гидрология*, 10, 3-8.
- [121] Давиташвили Т., Джанелидзе П., Крацашвили Л., & Хведелидзе З. (1979). О краткосрочном прогнозе геопотенциала по полным уравнениям гидродинамики с учетом орографии” *Сообщения АН. Гру. СССР* 96(1), 101 -105.
- [122] Давиташвили Т., Джанелидзе П., Хведелидзе З. (1987). Некоторые результаты испытания численной схемы краткосрочного прогноза геопотенциала, учитывающие орографию Кавказа. *Труды молодых научных работников ТГУ, (физика)* 13, 136 – 140.
- [123] Давиташвили Т. (1988). Об учете орографии в численных схемах прогноза погоди. *Труды ТГУ.* 5. 118-131.
Докл. АН СССР, 115(3), 497-500.
- [124] Дородницын А. (1940). Некоторые задачи обтекания неровностей поверхности земли воздушным потоком. *Труды ГГО*, 31, 3-41.
- [125] Дородницын А.(1950). Влияния рельефа земном поверхности на воздушные течения. *Труды ЦИП.* 21(48), 3-25.
- [126] Кибел И.А. (1955). Пространственная задача оптекания неровностей поверхности земли воздушным потоком. *Докл. АН СССР*, 100(2), 247-250.
- [127] Кибель И. (1973). Ведение в гидродинамические методы краткосрочного прогнози погоди. *М. Госметиздат.* 368.
- [128] Кожевников В. (1968). Орографические возмущения в двухмерной стационарной задачи, *Изд. АН. СССР*, 15(1), 107.

- [129] Кожевников В.Н. (1963). К одной нелинейной задаче об орографическом возмущении стратифицированного воздушного потока. *Изв. АН СССР. Сер. Геофизич*, 7, 1108-1116.
- [130] Кожевников В.Н.(1968). Орографические возмущения в двумерной стратифицированной задаче. *Изв . АН СССР. Физика атмосферы и океана . 4(1)*, 33-52.
- [131] Кордзадзе А. (1977). О разрешимости задач динамики океана с учетом ветровых течений. *ВАН. СССР. 1*, 52-53.
- [132] Кочин Н. (1937) О влиянии рельефа земли на волны на поверхности раздела двух масс жидкости разной плотностью. *Тр. ГГО. 18*, 19-30.
- [133] Микашавидзе Б & Нозадзе Р.(1969).Опыт расчета вертикальных движений атмосферы с фронтальных разделов. *Труды зак. НИГМИ. 34(40)*, 71-84.
- [134] Пекелис Е. М.(1966). О постановке краевых условий при численном решении стационарных задач на обтекание. *Тр. ГМЦ. 14*, 79-91.
- [135] Пекелис Е.М. (1966). Численный расчет орографических возмущений конечной амплитуды (плоская задача), *Изв . АН СССР. Физика атмосферы и океана . 2(11)*, 1113-1124.
- [136] Пекелис Е.М.(1969). Численный метод расчета подветренных волн при произвольном распределении параметров основного потока (полная линейная задача) , *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана . 5(1)*, 3-16.
- [137] Позднякова В.А. (2010) ПРАКТИЧЕСКАЯ АВИАЦИОННАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ. *Составила преподаватель Уральского УТЦ ГА . г . Екатеринбург*, 113.
- [138] Садоков В. (1984). Избранные работы по динамической метеорологии. *И.А. Кибеля. Гидрометиздат. Л. 278*.
- [139] Сохов Т. З. (1970). О нелинейных орографических волнах в атмосфере.*Изв. АН ССР. Физика атмосферы и океана, 6(2)*, 115-126.
- [140] Сулаквелидзе Я. (1988).Ливневые осадки в горных странах на примере Закавказья. *Изд-во ТГУ. 268*.
- [141] Фабрикант О. Н. (1964). Аэродинамика. Изд. "Наука", 815.

- [142] Хведелидзе З & Ецадзе З. (1987). Численное моделирование распространения реагента при воздействии на обложности ячейковой конвекции. *Труды молодых научных работников, ТГУ (физика)* 13, 131 – 135.
- [143] Хведелидзе З., Шаламберидзе Т., Тагвадзе Е., Аплаков Р. (2009). Изучение выхревых полей ветра на горной территории. Москва, *Экологические системы и приборы*. 11, 41-46.
- [144] Цквитинидзе З. (1974). Радиационных и термический режим территории Грузии. *Тр. Зак. НИГМИ*. 23.24.
- [145] კაპანაძე ნ., ხვედელიძე ზ., ზოტიკიშვილი ნ. (2018). ძლიერი ქარის სტატისტიკური განაწილება იმერეთის რეგიონზე და მისი როლი ეკოლოგიური პროცესების განვითარებაში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“ შრომები, ISSN 1512-1976, ტ. 6, ქუთაისი, საქართველო.
- [146] კოტარია ა. (1992). მეტეოსადგური. თსუ. 446.
- [147] მატყევი ლ. (1987). ზოგადი მეტეოროლოგიის კურსი. თსუ. 700.
- [148] სამხარაძე ი., ტატიშვილი ნ., ხვედელიძე ზ., დავითაშვილი თ., ზოტიკიშვილი ნ. (2011). ზოგიერთი ლოკალური მეტეოროლოგიური პროცესების მათემატიკური მოდელირება საქართველოს ცალკეული რეგიონებისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი. 120, 10-15.
- [149] სურმავა ა. (2001). რელიეფით შეპირობებული ჰაერის ნაკადების გადაადგილების თეორიული გამოკვლევა (რიცხვითი მოდელირების საფუძველზე). *მობსენებათა თეზისი, აკად. თ. დავითაიას 90 წ. მიძღვ. სამეც. კონფერ. მასალები*, თბილისი, 17 – 19.09, 27 -28.
- [150] ხვედელიძე ზ & ალადაშვილი ი. (2002). მინიმალური ტემპერატურის როლი ატმოსფეროს ჰაერის დაჭუჭყიანებაში, მიწისპირა ფენის თავისებურებების გათვალისწინებით. *ჰიდრომეტეოროლოგიური ინსტიტუტის შრომები*, 108, 180-186.
- [151] ხვედელიძე ზ. (2002). დინამიკური მეტეოროლოგია. თსუ. 535.
- [152] ხვედელიძე ზ., ჯანუაშვილი დ. (2011). რეგიონალური ატმოსფერული პროცესების “მადონური,, ბუნების შესახებ ლოკალურ რელიეფის გავლენის

გათვალისწინებით. ქართული ელექტრონული სამეცნიერო ჟურნალი „ფიზიკა“.
5,102-112.