

საერთაშორისო სამეცნიერო
ჟურნალი

საჰაერო ტრანსპორტი

AIR TRANSPORT

International Scientific Journal

საჰაერო ტრანსპორტი

საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი გამოიცემა
2008 წლიდან და წარმოადგენს ავიაციასთან
დაკავშირებული პრობლემების ასახვისა და გადაჭრის
გზების სამეცნიერო ნაშრომების კრებულს

AIR TRANSPORT

The international scientific journal has been
published since 2008 and is a collection of scientific works
on the reflection and solution of aviation-related problems

<http://www.ssu.edu.ge>

სარჩევი

გამოცემა ეძღვნება პროფესორ გიორგი (გივი) ცირეკიძის ხსოვნას	6
Optimized Ionizing Radiation Detector for Measuring Average Density of Solid Particles in Airflow under Extreme Conditions	8
Authors: Robert Khachidze, Tornike Kimeridze	
Multi-Criteria Propeller Design App (MCDM).....	20
Authors: Aria Nazarpavar, Singh Yash Kumar, Ponthen Sooraj, Aldali Anas, Mohaimen Mohamed Abdulrahim Ibrahim	
აირტურბინულ ძრავებში შემავალი უცხო სხეულების (ნაწილაკების) აღმოჩენა და იდენტიფიკაცია OFDM - MIMO ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადარული სისტემით.....	33
ავტორები: თეიმურაზ ქორთუა, ანდრო მაისურაძე	
ჰაერსატარ სისტემებში მყარი ნაწილაკების დეტექტირებისა და რაოდენობის შეფასების გაუმჯობესებული მოდელი ულტრაბგერითი მეთოდის გამოყენებით.....	45
ავტორები: ბიძინა აბესაძე, გიორგი თაყაძე	
სიმეტრიული ფრთის პროფილის კონტურის განსაზღვრის თეორიული მოდელი წინაღობის მინიმიზაციის მიზნით	58
ავტორები: ბიძინა აბესაძე, საბა კოპალიანი, ლიზი უბილავა	
შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის მნიშვნელობა საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სასერტიფიკაციო მოთხოვნების უზრუნველყოფაში.....	66
ავტორები: ნინო ხიტალიშვილი, დავით ლომაძე	
საჰაერო ხომალდის ჩატვირთვის კონტროლისა და წონა/ბალანსის სტაბილურობის გათვალისწინება ფრენისათვის მგზავრთა რეგისტრაციის ეტაპზე.....	72
ავტორი: ბადრი ნადარაია	
ოპტიკური კომპიუტერები და მათი გამოყენების პერსპექტივები ავიაციაში.....	82
ავტორი: დემურ ვეფხვაძე	
Paradigmatic Ambiguity in Flight Deck Communication.....	91
Author: Tea Vepkhvadze	
ვერტმფრენის ტიპის უპილოტო საფრენი აპარატის პროექტი	99
ავტორები: ბექან ჯიქია, ცეზარი გაბაძე	
ფენოვანი კონსტრუქციების რღვევის ფორმები	105
ავტორი: ბექან ჯიქია	
უპილოტო საფრენი აპარატების ხელოვნური ინტელექტის როლი გარემოსდაცვითი და აგრარული მონაცემების შეგროვებასა და ანალიზში	113
ავტორი: გიორგი თაყაძე	
თბილისის საერთაშორისო აეროპორტში საჰაერო ხომალდების მომსახურე სატრანსპორტო საშუალებების ექსპლუატაციის ეკონომიკური და ეკოლოგიური საკითხების კვლევა	120

ავტორები: ბიძინა აბესაძე, ლუკა ქურდაძე, ოთარ ბრეგაძე

Increasing the Flight Safety of Coastal Rescue Drones and Helicopters with Protective Devices from Bird Strikes..... 130

Author: Zurab Kopaleishvili

მაზვათა კონცენტრაციის შესწავლა განსხვავებული სიხისტის ელემენტების შეერთების უბანში 137

ავტორები: სერგო ტეფნაძე, სოფიო ბლიაძე

საფრენი აპარატების ტექნიკური მომსახურების გაუმჯობესება და უსაფრთხოების ზომების გაზრდა..... 143

ავტორები: ბიძინა აბესაძე, ცეზარი გაბაძე

Technam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდის საექსპლუატაციო მახასიათებლების კვლევა და ანალიზი 151

ავტორები: ნიკა თიკანაშვილი, თორნიკე ტეფნაძე

Fault Detection and Predictive Maintenance of the Aircraft Propeller System 161

Authors: Sergo Tepnadze, Vazha Kelikhashvili, Luka Kurdadze

ქალების შრომის უსაფრთხოების ინსტიტუციური მექანიზმები სამოქალაქო ავიაციის სამუშაო სივრცეში – საერთაშორისო გამოცდილება და რეგულირების პრიორიტეტები 166

ავტორი: დავით ალანია

საჰაერო ხომალდის აირტურბინული ძრავებში შემავალ ჰაერის ნაკადში შერეული უცხო სხეულების მახასიათებლების ანალიზი, კლასიფიკაცია და მათი ძრავაში მოხვედრის პრევენციის გზები 173

ავტორები: რობერტ ხაჩიძე, ანდრო მაისურაძე

ნანოტექნოლოგიები და თანამედროვე ავიამშენებლობა 183

ავტორები: გელა ოთარაშვილი, ზურაბ საბაშვილი, კონსტანტინე ხახანაშვილი

საერთაშორისო ლოგისტიკური ცენტრების მნიშვნელობა 193

ავტორები: ანა კურტანიძე, გიორგი ევგენიძე

თითოეულ სტატიას გავლილი აქვს შემოწმება პლაგიატზე, Strikeplagiarism.com
პლატფორმის მეშვეობით

Each article has been checked for plagiarism through the Strikeplagiarism.com platform

მთავარი რედაქტორი

სერგო ტეფნაძე, ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, პროფესორი, საერთაშორისო
სატრანსპორტო აკადემიისა და საქართველოს
საინჟინრო აკადემიის ნამდვილი წევრი.
საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის რექტორი.

რედაქტორი

ნიკა თიკანაშვილი, საქართველოს საავიაციო
უნივერსიტეტის რექტორის მოადგილე სამეცნიერო
დარგში, პროფესორი, ინჟინერიის დოქტორის
აკადემიური ხარისხი საჰაერო ტრანსპორტის
ექსპლუატაციაში.

სამეცნიერო-სარედაქტორო საბჭო

ანდრო მაისურაძე, აკადემიური დოქტორი,
საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო
ფაკულტეტის პროფესორი, თბილისი, საქართველო.

იგორ კაბაშკინი, ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, რიგის ტრანსპორტისა და
ტელეკომუნიკაციების ინსტიტუტის ტექნიკის
მეცნიერებათა დოქტორი პროფესორი, რიგა, ლატვია.

რობერტ გლენბოტსკი, ვარშავის ტექნოლოგიური
უნივერსიტეტის პროფესორი, ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, ვარშავა, პოლონეთი.

კონსტანტინოს კალიგიანისი, გამოყენებითი
მეცნიერებების საერთაშორისო უნივერსიტეტის
საავიაციო პროგრამის ხელმძღვანელი, პროფესორი,
ერფურტი, გერმანია.

თამაზ ნატრიაშვილი, ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, სსიპ რაფიელ დვალის მანქანათა
მექანიკის ინსტიტუტის დირექტორი. საქართველოს
მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსი,
თბილისი, საქართველო.

დემურ ვეფხვაძე, აკადემიური დოქტორი,
საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო
ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველოს
მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსი,
თბილისი, საქართველო.

სეით ბლიაძე, ტექნიკის მეცნიერებათა
დოქტორი, საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის
პროფესორი, თბილისი, საქართველო.

რობერტ ხაჩიძე, აკადემიური დოქტორი,
საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის უფროსი
მეცნიერი-თანამშრომელი, თბილისი, საქართველო.

ბიჭიკო მაზანიშვილი, საქართველოს
საავიაციო უნივერსიტეტის მთავარი მეცნიერი-
თანამშრომელი. დოქტორის აკადემიური ხარისხი
საინჟინრო მეცნიერებაში, თბილისი, საქართველო

აღმასრულებელი მდივანი

ბიძინა აბესაძე, საქართველოს საავიაციო
უნივერსიტეტის საინჟინრო ფაკულტეტის
პროფესორი, სამეცნიერო-კვლევითი ცენტრის
ხელმძღვანელი, ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური
ხარისხი მექანიკის ინჟინერისა და ტექნოლოგიაში.

Chief Editor

Sergo Tepnadze, Doctor of Technical Sciences,
Professor, The real member of the International Academy
of Transport and Engineering Academy of Georgia. Rector
of Georgian Aviation University.

Editor

Nika Tikanashvili, Deputy Rector of the Georgian
Aviation University in scientific field, PhD of Engineering in
Air Transport Exploitation, Professor.

Scientific-Editorial Board

Andro Maisuradze, PhD, Professor of the Engineering
Faculty of Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia.

Igor Kabashkin, Doctor of Technical Sciences,
Professor of Riga Transport and Telecommunication
Institute. Riga, Latvia.

Robert Glenbotski, Doctor of Technical Sciences,
Professor of Warsaw University of Technology. Warsaw,
Poland.

Konstantinos Kalligiannis, Head of the Aviation
Program at the International University of Applied Sciences,
Professor. Erfurt, Germany.

Tamaz Natriashvili, Doctor of Technical Sciences,
director of the Rafiel Dvali institute of Mechanical
Engineering and Technologies, Academician of Georgian
National Academy of Science, Tbilisi, Georgia.

Demur Vepkhvadze, PhD, Professor of the
Engineering Faculty of the Georgian Aviation University,
Academician of the Georgian National Academy of Science,
Tbilisi, Georgia.

Seit Bliadze, Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Georgian Aviation University, Tbilisi, Georgia.

Robert Khachidze, PhD, senior scientist-collaborator
of the Georgian Aviation University, Tbilisi, Georgia.

Bichiko Mazanishvili, Chief scientist-collaborator of
the Georgian Aviation University. PhD degree in
Engineering Science, Tbilisi, Georgia.

Executive Secretary

Bidzina Abesadze, Professor at Georgian Aviation
University Engineering Faculty. Head of the scientific-
research center, PhD degree in Engineering of Mechanical
Engineering and Technology, Tbilisi, Georgia.

გამოცემა ეძღვნება პროფესორ გიორგი (გივი) ცირეკიძის ხსოვნას



პროფესორი გიორგი ცირეკიძე დაიბადა 1942 წლის 21 სექტემბერს ქალაქ ქუთაისში. 1965 წელს დაამთავრა საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის მეტალურგიის ფაკულტეტი, სადაც მიენიჭა ინჟინერ-მეტალურგის კვალიფიკაცია. შემდგომში, 1967–1971 წლებში, სწავლა განაგრძო მოსკოვის მანქანათმშენებლობის ცენტრალურ სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში, სადაც წარმატებით დაიცვა სადისერტაციო ნაშრომი და მიენიჭა ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის აკადემიური ხარისხი.

მისი პროფესიული საქმიანობა მჭიდროდ უკავშირდება საქართველოს ინდუსტრიულ და სამეცნიერო სივრცეს. კარიერის ადრეულ ეტაპზე მუშაობდა ქუთაისის საავტომობილო ქარხანაში ტექნოლოგიის პოზიციაზე, სადაც აქტიურად იყო ჩართული საამქრო წარმოების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმიზაციასა და ინოვაციური ტექნიკური გადაწყვეტების დანერგვაში. შემდგომში იგი საქმიანობდა სსრკ ჩარხმშენებლობის სამინისტროს თბილისის სამეცნიერო-საწარმოო ინსტიტუტებში, სადაც

სხვადასხვა პერიოდში იკავებდა განყოფილების გამგის, მთავარი ინჟინერისა და გენერალური დირექტორის თანამდებობებს. აღნიშნულ პერიოდში მისი ხელმძღვანელობით განხორციელდა მრავალი საინჟინრო-ტექნოლოგიური მიმართულების კვლევა, რამაც არსებითად შეუწყო ხელი საქართველოს სამრეწველო პოტენციალის ზრდას.

2005 წლიდან პროფესორი გიორგი ცირეკიძე იყო საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო ფაკულტეტის დეკანი, 2011 წლიდან იყო საქართველოს საინჟინრო აკადემიის ნამდვილი წევრი, ხოლო 2018 წლიდან იკავებდა საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის რექტორის მოადგილის თანამდებობას სამეცნიერო დარგში. მისი ხელმძღვანელობით საინჟინრო ფაკულტეტზე მიმდინარეობდა საავიაციო ტექნოლოგიების, საკონსტრუქციო მასალების, საწარმოო ინჟინერიისა და კომპოზიციური ტექნოლოგიების მიმართულებით სასწავლო და სამეცნიერო აქტივობების განვითარება.

გიორგი ცირეკიძე აქტიურად იყო ჩართული სამეცნიერო-კვლევით საქმიანობაში. მისი სამეცნიერო ინტერესის სფერო მოიცავდა მეტალურგიის ისტორიას საქართველოში, მეტალთა ფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებს, კომპოზიციური მასალების ტექნოლოგიას, საავიაციო წარმოების პროცესების მოდელირებას და საავიაციო ტერმინოლოგიის სტანდარტიზაციის საკითხებს, იყო 10-მდე წიგნის და სახელმძღვანელოს, ასევე 25-ზე მეტი სამეცნიერო ნაშრომის ავტორი და თანაავტორი, მისი სამეცნიერო ნაშრომები გამოქვეყნებულია როგორც ქართულ, ისე საერთაშორისო სამეცნიერო გამოცემებში,

მათ შორის, ჟურნალებში: „საჰაერო ტრანსპორტი“, „საინჟინრო სიახლეები“, „ცხოვრება და კანონი“, „ინოვაციური ტექნოლოგიები მეტალურგიასა და მასალათმცოდნეობაში“ და სხვა. იგი რეგულარულად მონაწილეობდა ადგილობრივ და საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებში. ბატონ გიორგის მნიშვნელოვანი წვლილი მიუძღვის საქართველოს საავიაციო განათლების განვითარებაში, საინჟინრო მეცნიერებების პოპულარიზაციასა და ახალგაზრდა მკვლევართა პროფესიული ზრდის ხელშეწყობაში. მისი პედაგოგიური მოღვაწეობა გამოირჩევა მაღალი სტანდარტებით, აკადემიური და სამეცნიერო ეთიკითა და სწავლების პროცესში ინოვაციური მიდგომებით.

პროფესორ გიორგი ცირეკიძის მრავალწლიანი მოღვაწეობა თვალსაჩინო

მაგალითია ქართული ტექნიკური სფეროს ინტელიგენციისა, რომელმაც საკუთარი გამოცდილებითა და მეცნიერული მიღწევებით ღირსეულად გააგრძელა ეროვნული საავიაციო მეცნიერებისა და ტექნოლოგიური განათლების განვითარების საქმე.

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტის საინჟინრო ფაკულტეტის საბჭოს გადაწყვეტილებით, პროფესორ გიორგი ცირეკიძის ხსოვნის უკვდავსაყოფად საავიაციო საკონსტრუქციო მასალათა ლაბორატორიას მიენიჭა მისი სახელი. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალ „საჰაერო ტრანსპორტის“ სარედაქციო კოლეგია პატივს მიაგებს პროფესორ გიორგი ცირეკიძის ნათელ ხსოვნას.

Optimized Ionizing Radiation Detector for Measuring Average Density of Solid Particles in Airflow under Extreme Conditions

Robert Khachidze¹, Tornike Kimeridze²

^{1,2}Georgian Aviation University
16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *During the operation of various air-conducting systems such as ventilation networks, gas pipelines, and aircraft gas-turbine engine air intakes in contaminated environments, solid components such as dust, sand, hail, and volcanic ash are often entrained in the airflow. To mitigate their negative effects, it is essential to identify these particles and periodically determine their mass flow relative to allowable threshold values. A prerequisite for this is the measurement of the average density of solid particles suspended in the airflow. This measurement can be performed using a variety of methods, including radioisotopic, ultrasonic, optical, and ionizing radiation techniques. The present study reports results on the use of ionizing radiation for measuring the average density of various solid particles in a two-component airflow (air + solid particles). First, the technical characteristics and operational conditions, including extreme conditions of different air-conducting systems are determined. Based on these factors, appropriate ionizing radiation sources and modern, optimized detectors are selected to enable accurate and reliable measurements.*

Key Words: *Air-ducting device, solid particles, ionizing radiation detector, X-ray and gamma detection, density measurement.*

Introduction

In the operation of various air-transport systems, such as ventilation networks, gas pipelines, and air intakes of aircraft gas-turbine engines, solid components, including dust, sand, hail and volcanic ash, are often entrained in the airflow [1]. To mitigate their negative effects, it is essential to identify these particles and periodically determine their mass flow rates relative to permissible threshold values. A key prerequisite for this is the measurement of the average density of solid particles suspended in airflow [2].

Several approaches can be applied for this purpose, including radio frequency, ultrasonic, optical, and ionizing radiation techniques [3].

This paper presents the results of research on the application of ionizing radiation for measuring the average density of solid particles in a two-component airflow (air + solid particles).

Main Part

Air-ducting devices, have different designs and distinct geometric and physical characteristics depending on their purpose and operating conditions (see Fig. 1). Similarly, airflow and solid particles entrained within it exhibit specific properties that vary according to the type of air-conducting system.

Solid particles can enter air-conducting systems in different ways, depending on the operating environment and conditions of a particular system, as well as the airflow velocity and its ability to entrain ambient particles (Fig. 1).



Fig. 1 Example of dust entrainment in the air intake of an aircraft gas-turbine engine

Air-conducting systems operate in various environments under different operational and climatic conditions. The relevant characteristics are summarized in Table 1.

Table 1. Air/natural gas density, airflow velocity at the system inlet, and mass flow rate

#	Air-Conducting System	Air/Natural Gas Density	Air/Gas Velocity	Air/Gas Mass Flow Rate
1	Ventilation Duct	1.20–1.25 kg/m ³ (air, 20 °C, 1 atm)	10–15 m/s (main duct); 5–10 m/s (branches)	0.5–2.0 kg/s (typical HVAC main ducts)
2	Gas Pipeline	0.7–0.9 kg/m ³	10–25 m/s (main line); 5–15 m/s (branches)	0.05–0.5 kg/s (depending on pressure and diameter)
3	Aircraft Engine Air Intake	1.0–1.3 kg/m ³ (sea level to 10 km altitude)	50–100 m/s (idle or taxi, medium revolutions); 150–250 m/s (takeoff)	300–400 kg/s (B737, CFM56); ≈50–100 kg/s (business jet)

In addition to the aforementioned factors, solid particles in air-conducting systems vary in their size, shape, and composition. Their concentrations in airflow or natural gas streams differ under various conditions [4]. Accordingly, the parameters of these particles play an important role in determining the average density of mixed flow. The parameters are summarized in Table 2.

Table 2. Characteristics of solid particles in air-conducting systems

#	Air-Conducting System	Dust Particles	Sand Particles
1	Ventilation Duct	Size: 1–100 μm ; Mass flow: 0.01–0.05 kg/s	Rare; Size: 100–300 μm ; Mass flow: < 0.01 kg/s
2	Gas Pipeline	Size: 10–200 μm ; Mass flow: 0.05–0.2 kg/s	Size: 200–500 μm ; Mass flow: 0.02–0.1 kg/s
3	Aircraft Engine Air Intake	Size: 1–100 μm ; Mass flow: 0.01–0.05 kg/s	Size: 100–600 μm ; Mass flow: 0.05–0.15 kg/s

Naturally, the question arises: what potential damage can solid particles suspended in the airflow cause to the air-conducting system itself or to the components supplied with air or gas?

Therefore, it can be concluded that solid particles suspended in air or gas are unlikely to cause significant damage to ventilation ducts or gas pipeline airways over extended periods. However, this is not the case for the components and environments to which air or gas is delivered. Therefore, it is essential to periodically quantify the concentration of solid particles in the airflow or gas stream and compare the results with the permissible limits throughout the operational life of the air-conducting system.

Solid particles, particularly sand, can cause considerable damage and, consequently, material and technical losses when they penetrate hazardous zones of aircraft engines through the air intake. Sand particles first strike the fan blades of the engine, causing mechanical damage (Fig. 2a). After passing through the fan zone, sand enters the high-temperature regions of the engine, such as the turbine, where air temperatures range from 1,200°C to 1,600°C, while the melting point of quartz sand is approximately 1,710°C. In these regions, thermal processes occur, including sand heating, melting, and adhesion to walls, which adversely affect engine performance.

Additionally, in the reactive zones of the engine, chemical transformations and thermomechanical effects occur, including melting, sticking, and damage to the thermal barriers in the turbine. Compressor components may experience erosion, particles can accumulate or stick in the combustion chamber, and there is even the potential for fire initiation (Fig. 2b) [5].



a)



b)

Fig. 2 Examples of the effects of solid particles in air on engine components

Therefore, the most significant and relevant concern among the discussed air-conducting systems is the automated assessment and control of solid particles suspended in the airflow to prevent reductions in the operational life of an aircraft gas-turbine engine.

Several studies [2,6] have addressed solutions to this problem, providing general concepts and methods, including recommendations for using ionizing sources to measure the mass flow of solid particles in the airflow entering an aircraft engine's air intake.

To implement the authors' recommendations in practice, it is necessary to correctly select the type and parameters of the ionizing radiation source and the corresponding detector for the extreme conditions in which the aircraft engine operates: ambient temperature range of -60°C to $+50^{\circ}\text{C}$; air density, inlet velocity, and mass flow in the air-conducting system, as presented in Table 2; and information on dust and other solid particles in the airflow, as given in Table 2. The dimensions of the air intake (Table 1) must also be considered. [7]

Given these constraints, only specific types and parameters of gamma radiation or X-rays can be employed. Alpha and beta radiations were excluded because they are completely absorbed under these conditions and cannot provide the necessary measurement information.

Among gamma-emitting radioisotope sources, the most commonly used practical sources are summarized in Table 3.

Table 3. Properties of ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am

#	Source Name	Half-Life (years)	Radiation Energy (keV)	Absorption Coefficient Quartz (SiO_2 , $\rho \approx 2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) $\mu (\text{cm}^{-1})$
1	Cobalt-60	5.2714	1173, 1332	$\sim (0.07 - 0.12) \text{ cm}^{-1}$
2	Cesium-137	30.04	662	$\sim (0.10 - 0.25) \text{ cm}^{-1}$
3	Americium-241	432.6 ± 0.6	59.5	$\sim (1.0 - 3.0) \text{ cm}^{-1}$

Based on the absorption coefficients of the radioisotope sources presented in the table, and considering that the concentration of foreign particles mixed in the air stream entering the air turbine engine is sufficiently low (mass flow rate not exceeding 0.05-0.15 kg/s), the task is best solved using americium-241, since its absorption coefficient significantly exceeds that of the others. The energy of ^{241}Am gamma radiation (59.5 keV) provides sufficient penetration to detect particles in an air stream. In addition, its long half-life (~ 432 years) ensures stable operation over a long period, making it practical for continuous monitoring [8].

As an alternative to radioisotope sources, X-ray sources can be used, provided that a specific portion of the emitted spectrum is selected to optimize the particle detection. Typical X-ray sources include tungsten (20–120 keV), molybdenum (17–20 keV), and copper (8–10 keV) targets. The choice of source depends on the desired penetration depth, particle size, and absorption characteristics, with higher energy X-rays (e.g., tungsten) being more suitable for relatively large air inlet systems and higher airflow densities, whereas lower energy X-rays (e.g., copper or molybdenum) can be used for compact or low-density systems. The absorption coefficients of quartz, which represent typical dust and sand particles, range from approximately 1 cm^{-1} (tungsten) to $7\text{--}8\text{ cm}^{-1}$ (copper), allowing for the appropriate calibration of the detector system. By carefully selecting the radiation source and matching it to the detector parameters, accurate real-time measurements of the mass flow of solid particles under extreme operating conditions in aircraft gas turbine engines can be achieved, thereby enabling the preventive monitoring and protection of critical engine components. The types of X-ray sources that are likely to be used are presented in Table 4. [9,10]

Table 4. Properties of X-rays Tubes

#	Source / target	Typical spectrum / characteristic energies (keV)	Approx. linear attenuation μ (cm^{-1}) for quartz (SiO_2 , $\rho \approx 2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	Tungsten (W) target (X-tube)	Bremsstrahlung 20–120 keV; W characteristic $\sim 59, 67\text{ keV}$	$\sim 0.3 - 1.5\text{ cm}^{-1}$ (decreasing with energy; $\sim 0.5\text{--}1.0$ near 60 keV).
2	Molybdenum (Mo) target (X-tube)	$K\alpha \approx 17.5\text{ keV}$, $K\beta \approx 19.6\text{ keV}$	$\sim 2.5 - 8\text{ cm}^{-1}$ (strong photoelectric region; expect a few cm^{-1} at 17–20 keV).
3	Copper (Cu) target (X-tube)	$K\alpha \approx 8.05\text{ keV}$, $K\beta \approx 8.9\text{ keV}$	$\sim 50 - 110\text{ cm}^{-1}$ (very high at $\sim 8\text{ keV}$ because of photoelectric effect).
4	Iron (Fe) target	$K\alpha \approx 6.40\text{ keV}$	$\sim 100 - 300\text{ cm}^{-1}$ (very large — low-keV X-rays are strongly absorbed in SiO_2).
5	Silver (Ag) target	$K\alpha \approx 22.1\text{ keV}$, $K\beta \approx 24.9\text{ keV}$	$\sim 1.5 - 5\text{ cm}^{-1}$ (lower than Mo/Cu region but still photoelectric-influenced).

This measurement can be performed using multiple methods, including radioisotope gamma sources, X-rays, ultrasonic, and optical techniques. In this study, we focused on the use of ionizing radiation to measure the average density of solid particles in a two-component airflow (air + particles) [11]. The technical characteristics and operational conditions of the duct systems, including extreme scenarios, were analyzed to select appropriate radiation sources and detectors with optimal modern specifications.

The choice of detector and photon energy is critical and involves trade-offs between sensitivity and penetration. Low-keV X-ray tubes (e.g., Cu, Fe, and Mo targets) provide high sensitivity for detecting small

particle concentrations but are limited in penetration, requiring thin windows and careful calibration. Medium-energy sources (e.g., W-target X-ray tubes or Am-241, ~ 60 keV) offer a compromise, enabling the measurement of moderate-to dense-particle clouds while maintaining sufficient sensitivity. High-energy gamma sources (e.g., Cs-137 and Co-60) penetrate dense particle clouds and heterogeneous mixtures but exhibit lower sensitivity to small density variations and require larger, highly sensitive detectors with radiation safety precautions [12].

Considering these trade-offs, this study identifies the optimal radiation sources and detector types for the quantitative, real-time measurement of particle density in airflow under extreme environmental conditions, supporting both monitoring and preventative maintenance in industrial and aerospace systems [13].

Extreme environments, high-density dust, and volcanic plumes, where low-energy X-rays are completely absorbed [12].

Table 5. Summary Table: Detector Type Tradeoffs for Airflow Particle Density Measurement

#	Source / Energy	Sensitivity to low particle density	Penetration through dense clouds	Detector considerations	Typical application
1	Low-keV X-ray tube (Cu, Fe, Mo)	High	Low	Thin-window detectors, low-energy filters	Clean/moderately polluted airflows
2	Medium-energy X-ray tube / Am-241 (~60 keV)	Moderate	Moderate	Standard detectors, moderate shielding	Industrial airflow, moderate dust levels
3	High-energy gamma (Cs-137, Co-60)	Low	High	Scintillators or HPGe, strict radiation safety	Dense, extreme dust clouds, volcanic/industrial plumes

Detector Selection for Airflow Particle Density Measurement

The measurement of the average density of solid particles in airflow under extreme environmental conditions requires careful selection of radiation detectors, as their performance depends strongly on the photon energy, sensitivity, and penetration capabilities. The technical goal is to detect and quantify dispersed particles, such as dust, sand, volcanic ash, or hail, in real time, even in high-velocity or heavily contaminated airflows [13-15].

1. Gas-filled detectors (Ionization chambers, Proportional counters, Geiger-Müller tubes)

- **Strengths:** Broad energy response, simple construction, robustness in harsh environments and ability to handle moderate to high fluxes.

- **Limitations:** Low energy resolution; insufficient sensitivity for detecting small density variations in low particle-concentration airflows.
 - **Application:** Suitable when **medium-energy photons** (~ 30–100 keV) or **gamma rays** are used, providing reliable average particle density measurements over large airflow volumes.
2. **Scintillation detectors (NaI (Tl), CsI (Tl), plastic scintillators)**
- **Strengths:** High detection efficiency and moderate energy resolution; capable of measuring low-energy X-rays and medium-energy gamma-photons. A fast response allows **real-time monitoring**.
 - **Limitations:** Sensitive to temperature and mechanical vibration; some scintillators require shielding from background radiation.
 - **Application:** Ideal for **low - to moderate particle densities**, where small changes in transmitted photon intensity must be resolved accurately, such as in clean or moderately polluted airflows.
3. **Semiconductor detectors (Silicon PIN diodes, HPGe, CdTe, CZT)**
- **Strengths:** Excellent energy resolution and high sensitivity to low-keV photons (X-rays), enabling precise particle density measurements. It is compact and suitable for integration into flow channels.
 - **Limitations:** HPGe requires cryogenic cooling, whereas CdTe and CZT are more robust but limited in size. High-energy gamma detection may require thicker or stacked crystal detectors.
 - **Application:** Highly suitable for **low-keV X-ray detection**, where precise density measurements of fine particles are required, such as in low-concentration airflows or laboratory-scale experiments.

The choice of detector type is critical for solving key technical problems [16]:

- **Sensitivity versus penetration:** Low-keV detectors (semiconductors, scintillators) are highly sensitive to small particles but cannot penetrate dense clouds. High-energy gamma detectors penetrate thick flows but require high-efficiency or large-volume sensors.
- **Real-time monitoring:** Scintillation and semiconductor detectors provide fast response times, allowing dynamic measurement of particle density in moving airflows.
- **Robustness under extreme conditions:** Gas-filled detectors and solid-state detectors (CdTe, CZT) are durable under high airflow rates, vibration, and temperature fluctuations, suitable for industrial or aerospace environments.
- **Calibration flexibility:** Semiconductor and scintillation detectors allow precise energy discrimination, facilitating the calibration of specific particle compositions or mixtures.

Based on the above tradeoffs, the detectors most suitable for measuring the average solid particle density in airflow in this study were as follows [17,18]:

- **Semiconductor detectors (Si, CdTe, and CZT)** are used for low- to medium-energy X-ray measurements, where high sensitivity is required for small particle concentrations.

- **Scintillation detectors (NaI(Tl), CsI(Tl))** are used for medium-energy photons and moderate-density clouds, allowing fast, real-time monitoring.
- **Gas-filled detectors (ionization chambers, proportional counters)** are used for high-energy gamma radiation, dense particle clouds, or situations where robustness under extreme operational conditions is prioritized.

By integrating these detector types with appropriate photon energies, this study achieved a flexible, multi-scale measurement capability, from fine dust detection to monitoring dense, highly contaminated flows, providing a reliable solution to the technical challenges of particle density measurement in airflow systems [19].

Table 6. Recommended Detector Types Based on Photon Energy and Particle Density

#	Photon Energy Range	Sensitivity to Particle Density	Penetration in Dense Flow	Recommended Detector Type	Typical Application
1	6–20 keV	Very high (detects fine particles, low concentrations)	Low	Semiconductor (Si, CdTe, CZT)	Laboratory airflow, clean or moderately polluted air
2	20–60 keV	High	Moderate	Semiconductor + Scintillation (NaI (Tl), CsI (Tl))	Industrial airflow, moderate dust levels
3	60–100 keV	Moderate	Moderate	Scintillation (NaI (Tl), CsI (Tl)), Gas-filled	Industrial airflows, medium-density clouds
4	100–500 keV	Low	High	Gas-filled, Scintillation (high-efficiency), HPGe	Dense particle clouds, aerospace ducts
5	>500 keV (gamma rays, e.g., Cs-137, Co-60)	Very low	Very high	Gas-filled, large-volume Scintillation, HPGe	Extreme environments, volcanic or industrial plumes

By linking the photon energy, particle density sensitivity, and detector type, this framework enables flexible and optimized measurement strategies for airflow monitoring. Low-energy semiconductors are ideal for the high-resolution detection of fine particles, scintillators are optimal for moderate densities and real-time

measurements, and gas-filled detectors are suitable for extreme or highly dense particle flows. This multiscale approach ensures reliable quantitative monitoring across a wide range of operational conditions.

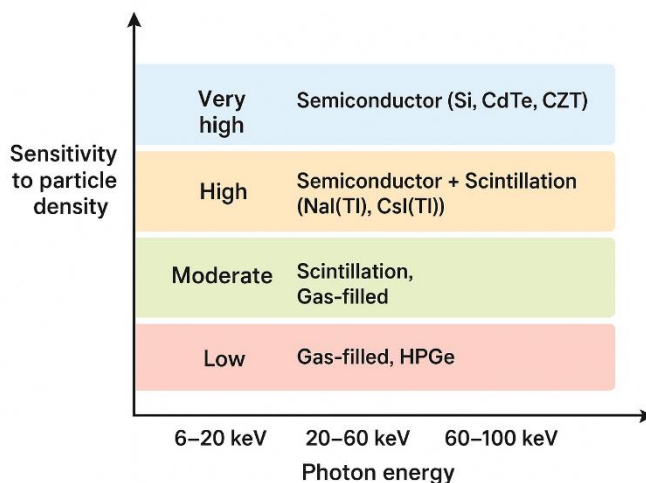


Fig. 3 Illustrating photon energy ranges, particle density sensitivity, and detector types

Conclusion

A systematic framework has been developed to assess the average density of solid particles in airflow under extreme conditions. By analysing airflow characteristics, particle properties, and environmental constraints, optimal combinations of ionizing radiation sources and detectors have been identified. Low-energy X-ray semiconductor detectors exhibit high sensitivity for detecting fine, low-concentration particles, while medium-energy X-ray and Am-241 sources with scintillation detectors are effective for moderate particle densities. High-energy gamma sources, when paired with gas-filled detectors, enable the monitoring of dense or highly contaminated flows.

This multiscale approach ensures precise, real-time quantification of particle density across diverse operational scenarios, thereby supporting preventive maintenance and safeguarding critical components in aerospace systems. The methodology provides a robust foundation for the automated monitoring of particle-laden airflows in harsh environments, enabling reliable long-term performance and risk mitigation.

Acknowledgements

This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG) [FR-24-4684, Research of the characteristics of mixed flows containing multi-component solid particles in air ducting devices, development of effective methodology for their measurement and detection].

References:

1. A. Maisuradze, G. Mushkudiani, D. Metreveli, G. Gedaminski, “Analysis of foreign objects ingress into aircraft gas turbine engines and methods of their recording”, Internacional Scientific Journal “Air Transport”, #1, 2019;
2. R. Khachidze, A. Maisuradze, N. Tikanashvili, V. Kelikhashvili, „Ways of measuring the number of foreign particles in the gas turbine engine air intake“, Internacional Scientific Journal “Air Transport”, #1, 2022;
3. П. П. Кремлевский, “Расходомеры и счетчики количества, Справочник“, „Машиностроение“. Ленинград 1989.
4. ASHRAE HANDBOOK, 2001 Fundamentals.
5. Guo, Chuanliang, Shaowen Chen, Shuaitong Chen, and Cong Zeng. “Investigation of Particle Deposition and Erosion Characteristics of Axial Compressor Blades.” In Volume 12B: Turbomachinery — Axial Flow Turbine Aerodynamics; Deposition, Erosion, Fouling, and Icing, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2024 (GT2024), paper no. 126898. 2024.
6. R. Khachidze, A. Maisuradze, N. Tikanashvili, B. Mazanishvili, B. Abesadze, V. Kelikhashvili „A device for measuring the total mass of mixed particles in intel airflow to turbine engines “, P 2025 7737 B, Invention, 04-03-2024.
7. Tan, S.-A., and T. F. Fwa. “Nondestructive Density Measurements of Cylindrical Specimens by Gamma-Ray Attenuation.” Journal of Testing and Evaluation 19, no.3 (1991): 211-216. <https://doi.org/10.1520/JTE12547J>.
8. Astafieva, I. M., D. N. Gerasimov, and R. E. Makseev. “Density Measurement by Radiometric Method with Gamma Irradiation from Sources of Low Activity.” Journal of Physics: Conference Series 891, no. 1 (2017): 012322. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012322>.
9. J. H. Hubbell and S. M. Seltzer, Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, NIST Standard Reference Database 126, 2004.
10. National Institute of Standards and Technology. “X-Ray Mass Attenuation Coefficients — Silicon (Z = 14).” Physics Reference Data, accessed November 12, 2025. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z14.htm>

11. Astafieva, I. M., D. N. Gerasimov, and R. E. Makseev. "Density Measurement by Radiometric Method with Gamma Irradiation from Sources of Low Activity." *Journal of Physics: Conference Series* 891, no. 1 (2017): 012322. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012322>.
12. Keller, J. M. "Applied Radiation Measurements." In *Radiation Measurement Methods; Detector Technologies*, 8th chapter. New York: Springer, 2006. https://doi.org/10.1007/0-387-34123-4_8.
13. Papadopoulos, G., and D. Bivolaru. "Real Time Gas Turbine Engine Particulate Ingestion Sensor for Particle Size and Composition." In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, paper no. GT2018-77137 (June 11-15, 2018). <https://doi.org/10.1115/GT2018-77137>.
14. Anderson, Charles, et al. "A Gas Flow Geiger-Mueller Type Detector and Method for Monitoring Ionizing Radiation." U.S. Patent, filed August 28, 1992.
15. Klein, Rolf-Dieter, et al. "Radiation Measurement Device for Measuring Ionizing Radiation." U.S. Patent, filed April 16, 2015.
16. Silva, Marcia Dutra R. "Ionizing Radiation Detectors." In *Ionizing Radiation*, September 17, 2015. <https://doi.org/10.5772/60914>.
17. Neno, Mitsuru. "Evolution of Ionizing Radiation Research." In *Ionizing Radiation*, September 17, 2015. <https://doi.org/10.5772/59330>.
18. Silva, Marcia Dutra R. "Ionizing Radiation Detectors." In *Ionizing Radiation*, September 17, 2015. <https://doi.org/10.5772/60914>.
19. Wehe, D. K. "Current Trends in Ionizing Radiation Detection." *Nuclear Engineering and Technology* 38, no. 4 (2006): 311-318.

მაიონებელი გამოსხივების წყაროებისა და შესაბამისი დეტექტორების ოპტიმალური მახასიათებლების შერჩევა ჰაერის ნაკადში შერეული მყარი ნაწილაკების საშუალო სიმკვრივის გასაზომად ექსტრემალურ პირობებში

რობერტ ხაჩიძე¹, თორნიკე ქიმერიძე²

^{1,2}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: სხვადასხვა ჰაერსატარ მოწყობილობების - სავენტილაციო სისტემები, გაზსადენის მილები, თვითმფრინავი აირტურბინული ძრავების ჰაერმიმღებები და სხვა - დაბინძურებულ გარემოში ექსპლუატაციისას მათში გამავალ ჰაერის ნაკადში ხშირად ხდება ისეთი მყარი კომპონენტების შერევა, როგორიცაა: მტვერი, ქვიშა, სეტყვა, ვულკანური ფერფლი და სხვა. ამ კომპონენტების მოქმედების უარყოფითი გავლენის პრევენციისათვის საჭიროა მოხდეს მათი იდენტიფიცირება და მასური ხარჯის პერიოდული განსაზღვრა და შედარება ზღვრულ დასაშვებ მნიშვნელობასთან, რის განსახორციელებლად უპირველეს ყოვლისა უნდა გაიზომოს ჰაერის ნაკადში შერეული მყარი ნაწილაკების საშუალო სიმკვრივე.

ამ უკანასკნელის გაზომვა შესაძლებელია სხვადასხვა მეთოდებით - რადიოსიხშირული, ულტრაბგერითი, ოპტიკური, მაიონებელი გამოსხივების გამოყენებით და სხვა.

სტატიაში წარმოდგენილია კვლევის შედეგები, რომლებიც ეხება მაიონებელი გამოსხივების გამოყენებას ორკომპონენტთან ჰაერის ნაკადში (ჰაერი+მყარი ნაწილაკები) შერეული სხვადასხვა მყარი ნაწილაკების საშუალო სიმკვრივის გაზომვისათვის. უპირველესად დადგენილია ჰაერსატარ მოწყობილობების ტექნიკური მახასიათებლები და საექსპლუატაციო პირობები, მათ შორის ექსტრემალური, და ამ უკანასკნელთა გათვალისწინებით შერჩეულია მაიონებელი გამოსხივების წყაროები და შესაბამისი თანამედროვე ოპტიმალური დეტექტორები.

საკვანძო სიტყვები: ჰაერსატარი მილი, მყარი ნაწილაკები, გამა-გამოსხივება, რენტგენის გამოსხივება, სიმკვრივის გაზომვა.

Multi-Criteria Propeller Design App (MCDM)

Aria Nazarpour¹, Singh Yash Kumar², Ponthen Sooraj³, Aldali Anas⁴, Mohaimen Mohamed
Abdulrahim Ibrahim⁵

¹⁻⁵Georgian Aviation University
Ketevan Dedopali Ave. №16, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This research presents a Python-based Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) application for propeller design in civil and light aviation aircraft, integrating a structured logical process that evaluates multiple parameters, including aircraft category, engine type and power, environmental conditions, and priorities such as weight, noise, and cost. Based on EASA Module 17 – Propeller, the app recommends optimal propeller configurations, including blade material, pitch type, actuation method, anti-icing system, blade count, and rotation strategy, while ensuring compatibility between subsystems and preventing critical mistakes such as unsafe material-power combinations, incorrect pitch selection, or improper anti-icing systems. The system also accounts for operational factors like critical engine effects and noise mitigation strategies such as synchrophasing and synchronization, balancing efficiency, performance, and safety. By combining these factors in a multi-criteria framework, the tool provides designers, technicians, and students with reliable guidance to explore feasible propeller designs while maintaining operational safety and system efficiency.*

Keywords: *Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Aircraft Propulsion, Noise Mitigation, Critical Engine*

The problem and solution

The design and selection of propellers for aircraft involve multiple interacting factors, including engine power, aircraft type, environmental conditions, and operational priorities like weight, noise, and cost. Improper selection can lead to critical operational issues, reduced efficiency, increased maintenance, or even safety hazards, particularly in multi-engine aircraft where critical engine effects may occur. Traditional design approaches rely heavily on manual calculation, experience, and iterative trial-and-error, which are time-consuming and prone to errors.

The proposed Python-based application addresses this problem by implementing a multi-criteria decision-making framework that systematically evaluates input parameters and their interdependencies. The tool ensures that selected propeller configurations are compatible with engine type, power levels, and operational priorities, while preventing critical mistakes such as unsafe combinations of blade material and engine power. By providing clear recommendations for propeller pitch, blade count, material, actuation method, anti-icing system, rotation direction, and noise mitigation strategies like synchrophasing, the app enables designers and students to quickly identify safe, efficient, and practical solutions. This approach reduces the risk of human error, improves design efficiency, and offers a structured methodology for educational and practical applications in propeller system design.

Introduction

The design and selection of propellers for aircraft involve multiple interdependent factors, including aircraft type, engine power, number of engines, weight limitations, noise requirements, operational environment, and cost considerations. Traditionally, propeller selection has been based on empirical data, experience, and standard recommendations from regulatory guidance such as EASA Part 66 Module 17 [1]. However, as aviation systems grow more complex, the need for a systematic, multi-criteria decision-making approach becomes essential to ensure compatible and efficient designs while minimizing critical mistakes, such as selecting an inappropriate propeller material for high-power engines or mismanaging critical engine considerations [2].

The Multi-Criteria Decision-Making Propeller Design App (MCDM) is developed in Python programming language to integrate these various parameters into a coherent logic. The app evaluates input parameters such as aircraft category, engine type, total power, weight and noise priorities, cost priorities, climate considerations, and propeller pitch preferences. Based on these inputs, the app outputs recommendations including propeller pitch type, actuation method, blade count, material, anti-icing requirements, direction of rotation, and additional suggestions for noise cancellation features such as synchronizing and synchrophasing [3,4]. This structured approach allows the user to identify optimal propeller configurations that are compatible with the aircraft and engine characteristics while preventing incompatible or unsafe choices.

The program applies classification logic for engine power, evaluates material compatibility with power levels, considers environmental factors for anti-icing requirements, and integrates critical engine concepts for multi-engine designs to manage yawing moments and operational safety. It also offers flexibility for optional inputs, maintaining robust outputs regardless of whether the user provides all details, which enhances its usability and applicability across a wide range of aircraft types.

This MCDM approach can be further developed to incorporate detailed engine design parameters, databases of existing propeller brands, and automatic sizing recommendations, providing a more comprehensive tool for aircraft designers, engineers, and maintenance personnel. By integrating more precise aerodynamic models and manufacturer specifications, the app could evolve into a full-scale decision support system for both conventional and advanced aircraft propulsion configurations [2, 3, 6].

Parameters, Outputs, and Logical Interdependencies

To facilitate a clear understanding of the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approach employed by the propeller design application, all input and output parameters considered by the app are summarized in Table 1. Each parameter represents a critical factor affecting propeller selection, including aircraft characteristics, engine specifications, environmental conditions, and operational priorities such as weight, noise, and cost. The table provides a concise reference to the parameter name (as used in the app code), a brief description, whether the parameter is an input or an output, the type of input expected (e.g., Selective, Optional, Numerical), units where applicable, the valid range or selectable options, and additional notes. By consulting this table, users can better understand the rationale behind each input and its influence on the resulting propeller configuration recommended by the app.

Table 1: Input and Output Parameters for the MCDM Propeller Design App

Parameter	Description	Type	Input Type / Unit	Options / Range	Notes
P1	Aircraft Category	Input	Selective	12 Option	Defines the type of aircraft, affects material, pitch, blade count, etc.
P2	Number of Engines	Input	Numerical	1, 2, 4, 6, 8	Determines rotation direction logic and critical engine consideration
P3	Engine Total Power	Input	Numerical	Positive values	Used to classify power: Low / Medium / High; affects pitch type, blade count, material
P4	Environment	Input	Selective	8 Options	Influences anti-icing selection
P5	Engine Type	Input	Optional / Selective	1: Piston, 2: Turboprop, 3: Electric	Affects blade number, material constraints
P6	Weight Priority	Input	Selective	High priority (Light design), Moderate priority	Influences pitch type, material selection, blade count
P7	Noise Priority	Input	Selective	High priority (Minimum noise), Moderate priority	Affects blade count, rotation logic, synchrophasing suggestions
P8	Cost Priority (Build)	Input	Selective	High priority (Economy), Moderate priority	Impacts pitch type, actuation complexity
P9	Cost Priority (Maintenance)	Input	Selective	High priority (Economy), Moderate priority	Affects anti-icing type, maintenance-friendly material selection
P10	Propeller Pitch Type	Input	Optional Selective	1: Fixed, 2: Ground Adjustable, 3: Variable / Constant-Speed	Overrides default pitch selection if specified
P11	Material Recommendation	Input	Optional Selective	1: Wood, 2: Aluminum/Metal, 3: Composite	Overrides default material choice if specified; checked against power constraints
P12	Power Classification	Output	Derived	Low / Medium / High	Derived from P3; affects pitch type, blade count, actuation
O1	Propeller Pitch Type	Output	Selective	Fixed, Ground Adjustable, Variable / Constant-Speed	Determined from power, weight, noise, and optional input P10
O2	Actuation Method	Output	Text	No Actuation, Single-Acting, Double-Acting	Derived from pitch type, engine type, power

O3	Blade Count Recommendation	Output	Numerical	2–6 blades	Based on power classification, engine type, noise priority
O4	Material Recommendation	Output	Text	Wood, Aluminum/Metal, Composite	Based on aircraft type, power, user preference P11
O5	Anti-Icing Type	Output	Text	None, Electrical, Fluid	Determined from environment (P4) and maintenance/cost priorities
O6	Direction of Rotation	Output	Text	Right-Hand, Left-Hand, Contra-Rotation	Determined from number of engines, noise priority, critical engine consideration
O7	Noise Reduction Suggestion	Output	Text	Synchrophasing / Synchronizing recommended or not	Suggested if noise priority is high; increases weight and cost slightly

Parameter Explanations and Interdependencies

1. Aircraft Category (P1):

The aircraft category defines the operational role and physical characteristics of the aircraft, which significantly influence propeller selection. Small aircraft, regional transport, ultralight, and training aircraft each impose different constraints on engine power, number of blades, allowable materials, and propeller pitch types [1, 7]. The app uses this input to constrain other design choices such as maximum allowable power, suitable materials, and appropriate propeller configurations. As indicated in the logic, mappings such as:

(Allowed Power Range = $f(P1)$) and (Allowed Materials = $g(P1)$)

P1: Aircraft Category

ensure that only compatible designs are recommended, preventing critical selection mistakes [2].

2. Number of Engines (P2):

The number of engines directly affects propeller rotation patterns and aircraft yaw control in the event of an engine failure. For single-engine aircraft, rotation is usually fixed and right-hand rotation. For multi-engine aircraft, rotation may be alternating (R/L) to reduce noise and improve balance if noise priority is high, or uniform (all Right Handed) if noise concerns are moderate [1, 7]. The app also considers the critical engine concept, where the engine whose failure produces maximum yawing moment is identified. If the user selects "No Critical Engine," a left-hand rotation may be recommended, which slightly increases maintenance and production costs [8, 2].

These interdependencies are formalized in the logic:

(Rotation Pattern = $f(P2, P7, \text{Critical Engine})$)

P2: Number of Engines

P7: Noise Priority

8. Engine Power /(P3):

Engine power or thrust is classified into low, medium, and high categories. This classification is crucial because it dictates allowable propeller types, actuation methods, blade counts, and materials. Low-power engines can use fixed or ground-adjustable propellers, medium-power engines may require variable or ground-adjustable pitch depending on noise priority, and high-power engines must use variable/constant-speed propellers [1, 2, 5].

The logic is represented as:

$$\begin{cases} \text{Low Power,} & P3 \leq 112 \text{ kW} \\ \text{Medium Power,} & 113 \leq P3 \leq 746 \text{ kW} \\ \text{High Power,} & P3 > 746 \text{ kW} \end{cases}$$

P3: Power Input (hp or KW)

This classification informs subsequent design decisions, such as allowable blade number, pitch type, and material selection.

8. Environment / Climate (P4):

The operational environment affects anti-icing requirements and indirectly impacts propeller materials. Aircraft operating in temperate or cold climates may require electrical or fluid anti-icing systems [1, 3, 5]. In contrast, warm climates require no anti-icing. The app translates this input into anti-icing recommendations using the formula, numbers indicated below are classification of environmental condition:

$$[05 = \{\text{No Anti-Icing, } P4 \in 1,2,3 \text{ Electrical, } P4 \in 4,5 \text{ Fluid, } P4 \in 6,7,8\}]$$

P4: Environmental Condition

05: Icing System

This logic ensures that environmental conditions are considered in the propeller subsystem design, maintaining safety and performance.

8. Engine Type (P5):

Engine type (piston, turboprop, or electric) affects permissible materials, propeller blade counts, and actuation methods. Piston engines can use wood or aluminum, turboprops typically use aluminum or composite, and high-power electric engines favor composite materials. The formula-based logic:

$$[\text{Allowed Materials} = f(P5)]$$

P5: Engine Type

guarantees that material recommendations are compatible with both engine type and power class. This interdependency prevents conflicts, such as using wood with high-power turboprops [1, 5, 3, 2].

6. Weight Priority (P6), Noise Priority (P7), Cost Priorities (P8, P9):

These parameters represent multi-factor decision criteria that influence final propeller selection. High weight priority promotes lighter materials and simpler actuation methods. High noise priority may suggest synchrophasing or alternating rotation, slightly increasing weight and cost. Cost priorities influence material and maintenance recommendations. These priorities are evaluated as weighted constraints in the logic [9]:

$$[\text{Noise Reduction Feature} = \{\text{Enabled}, \quad P7 = \text{High Disabled}, \quad P7 = \text{Moderate}\}]$$

This approach integrates multiple criteria in a scientifically consistent manner.

7. Propeller Pitch Type (O1) and Material (O4):

Propeller pitch type and material are outputs determined from all previous inputs and must satisfy compatibility rules. For example, high-power engines cannot use wood, and low-power engines can avoid complex variable-pitch mechanisms to reduce cost. The actuation method is determined based on pitch type and power class O2O_2O2 [9]:

- Fixed pitch and ground-adjustable propellers do not require actuation mechanisms.
 - Variable or constant-speed propellers require actuation:
 - Single-acting: simpler, lighter, typically using spring or gas pressure for blade angle changes.
 - Double-acting: more precise, faster response, but heavier and increases maintenance cost.
- $$\begin{cases} \text{None,} & O_1 = \text{Fixed or Ground-Adjustable} \\ \text{Single-Acting,} & O_1 = \text{Variable / Low-to-Medium Power, weight} \\ \text{Double-Acting,} & O_1 = \text{Variable / High Power, weight} \end{cases}$$

These rules ensure safe and efficient propeller selection while preventing incompatible or unsafe designs.

8. Outputs Integration:

All output parameters; propeller pitch, actuation, blade count, material, anti-icing, direction of rotation, and optional noise reduction; are derived from a combination of user inputs, classifications, and compatibility rules. Mathematical logic, comparisons, and conditional mappings enforce multi-factor decision making, allowing the app to provide recommendations that are compatible, efficient, and safe [2, 9].

Worked Example of Propeller Design Recommendation

The application was tested using the following input parameters Table 2. to demonstrate its decision-making and propeller recommendation capabilities.

Tabel 2. Input Parameters for Propeller Design Recommendation

Parameter	Code	Input	Description
Aircraft Category	P1	3	Ultralight/Sport
Number of Engines	P2	2	Twin-engine configuration
Engine Total Power	P3	120 kW	Total power across engines
Environment / Climate	P4	4	Seasonal Cold Climate (Possible Icing)
Engine Type	P5	1	Piston engine
Weight Priority	P6	1	Highest priority (Light Design)
Noise Priority	P7	2	Moderate noise concern
Cost Priority (Build)	P8	2	Moderate
Cost Priority (Maintenance)	P9	1	High (economy)
Propeller Pitch Type	P10	None	Optional input left blank
Material Recommendation	P11	None	Optional input left blank
Critical Engine Design	CE	No Critical Engine	Optional input; the program considers implications on engine selection and maintenance

Step-by-Step Logic:

1. Power Classification (P12):

- $\begin{cases} \text{Low,} & P3 \leq 112 \text{ kW} \\ \text{Medium} & 112 < P3 \leq 746 \text{ kW} \\ \text{High} & P3 > 746 \text{ kW} \end{cases}$

Here, $P3 = 120 \text{ kW} \rightarrow P12 = \text{Medium Power}$

2. Propeller Pitch Type (O1):

- Since P10 is blank, logic checks P12, P6, and P7.
- Medium power + moderate noise $\rightarrow$ Ground Adjustable

3. Actuation Method (O2):

- Ground Adjustable $\rightarrow$ Simple Actuation (on ground)

4. Blade Count Recommendation (O3):

- Medium power + Piston engine $\rightarrow$ 3 blades

5. Material Recommendation (O4):

- $P1 = \text{Ultralight, } P5 = \text{Piston} \rightarrow \text{Composite, Wood suitable (light and simple)}$

6. Anti-Icing Type (O5):

- $\begin{cases} \text{No Anti-Icing,} & P4 \in \{1,2,3\} \\ \text{Electrical,} & P4 \in \{4,5\} \\ \text{Fluid,} & P4 \in \{6,7,8\} \end{cases}$
- $P4 = 4 \rightarrow \text{Electrical Anti-Icing Recommended}$

7. Direction of Rotation (O6):

- $P2 = 2, P7 = \text{Moderate noise} \rightarrow \text{All engines Right-Hand Rotation}$
- Noise reduction features like synchrophasing are optional and not applied here due to moderate noise concern

8. Critical Engine Consideration:

In this design, the “No Critical Engine” option was selected. By definition, a critical engine is one whose failure produces the maximum adverse yawing moment, making climb or recovery particularly challenging for the pilot. When no engine is considered critical, the program may recommend that the left-hand engine operate in a counter-rotating direction relative to the right-hand engine to balance torque and improve performance. This configuration helps maintain symmetrical thrust in case of failure, but it may introduce additional complexity in production and maintenance. Specifically, left-hand propellers and associated engine components are less common, which can increase both manufacturing and maintenance costs due to the need for specialized parts.

The app integrates this logic to prevent critical mistakes in engine and propeller selection, ensuring the design remains safe, efficient, and compatible with multi-engine configurations. The resulting recommendation, including direction of rotation, actuation method, and noise mitigation measures, is summarized in the Output Table shown below.

Table 3: Output Parameters from Propeller Design Recommendation

Output Parameter	Value	Notes / Logic Reference
Propeller Pitch Type (O1)	Ground Adjustable	Medium power, moderate noise
Actuation Method (O2)	Simple Actuation (on ground)	Ground adjustable pitch
Blade Count (O3)	3	Medium power, piston engine
Material (O4)	Wood, Composite	Lightweight, compatible with ultralight aircraft
Anti-Icing Type (O5)	Electrical Anti-Icing Recommended	Cold seasonal environment
Direction of Rotation (O6)	All engines Right-Hand Rotation	Twin-engine, moderate noise
Noise Reduction Feature	Not applied	Optional, only for high noise priority
Engine Recommendation	Piston	Based on input P5 and power class

Critical Consideration	Engine	No Critical Engine	Left-hand engine may be used; adds slight cost and maintenance complexity due to uncommon parts
---------------------------	--------	--------------------	---

Conclusion and Future Work:

The Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Propeller Design App developed in this work demonstrates a structured, accurate, and safety-oriented approach for selecting propeller subsystems for small and medium aircraft applications. By integrating technical parameters such as aircraft category, engine power, environmental conditions, noise requirements, material constraints, and multi-engine rotation logic, the system ensures that every recommendation falls within the safe and compatible operational limits of real propeller-engine configurations.

This tool significantly reduces the risk of selecting incompatible combinations (e.g., high power with wood blades, single-acting actuation for high-power variable pitch systems, or improper rotation directions for multi-engine aircraft). The systematic logic improves decision accuracy, supports design transparency, and enables consistent evaluation of alternative configurations based on performance, cost, safety, and maintenance considerations. It is therefore an effective educational instrument for aviation engineering students and an early design-support tool for conceptual-level propulsion selection.

Beyond its immediate purpose, this project has strong potential for further development. Students can expand the app to incorporate:

- **More detailed propeller system modeling**, such as aerodynamic efficiency curves, propeller performance maps, ERAO / BEMT performance predictions, torsional vibration consideration, or fatigue life estimation.
- **Integration of real propeller manufacturer data**, including MT-Propeller, Hartzell, McCauley, and Hamilton Standard catalogs.
- **Advanced material modeling**, considering composite layup, metal fatigue factors, erosion resistance, and mass-moment-of-inertia effects.
- **Expanded actuation systems**, including oil-pressure governors, hydro-mechanical units, feathering mechanisms, reverse-thrust systems, and FADEC-controlled electric propeller drives.
- **Deeper coupling with engine design**, allowing:
 - Propeller-engine matching for specific power curves
 - Gearbox ratio selection
 - Electric motor torque/RPM optimization
 - Turboprop spool model integration
 - Hybrid-electric propulsion distribution logic

As students continue refining the app, it can evolve into a larger simulation and design-assessment platform capable of supporting full propulsion integration, aircraft performance analysis, and even preliminary sizing for hybrid-electric Distributed Propulsion Systems (DEP). Such an expanded system would serve as both a teaching tool and a computational foundation for future research at Georgian Aviation University.

Appendix - Mathematical Expressions and Logical Rules Used in the Program

This appendix contains the complete set of mathematical formulas, comparison expressions, and rule-based decision structures used throughout the program.

1. Power-to-Material Compatibility Rule

The Power-to-Material Compatibility Rule ensures that the selected propeller material is appropriate for the engine power. Specifically, if the engine power exceeds 150 hp, wood is not recommended as a material because it cannot withstand the higher mechanical stresses and rotational forces safely. Using a material incompatible with the power rating could lead to structural failure, excessive vibration, or reduced lifespan of the propeller. This rule helps prevent critical design mistakes by linking the engine's power input directly to the allowable material options [1, 3, 8, 9].

If Power (hp) > 150 $\Rightarrow$ Material $\neq$ Wood

2. Diameter Scaling Logic

The Diameter Scaling Logic determines the approximate propeller diameter based on the engine power. This approach allows designers to estimate a propeller size that can efficiently absorb the available power while maintaining aerodynamic and structural efficiency. By correlating diameter with power, the rule ensures that the propeller generates sufficient thrust without exceeding mechanical or aerodynamic limits [6, 10, 11].

$$D = k \cdot \sqrt[3]{P} \quad D = k \cdot \sqrt[3]{P} \quad D = k \cdot \sqrt[3]{P}$$

D : Propeller Diameter (mm, or in)

P : power input (hp)

K = Coefficient (mm/hp^{1/3})

3. Blade Count Decision Rule

The Blade Count Decision Rule determines the appropriate number of propeller blades based on engine power. For low-power engines, two blades are typically sufficient. Medium-power engines may require three blades to efficiently absorb power and maintain smooth operation. High-power engines generally need four or more blades to distribute the load, reduce vibration, and ensure aerodynamic efficiency. This rule helps match the number of blades to engine output for optimal performance [5, 3, 4].

$$\begin{cases} 2, & P \leq 80 \\ 3, & 80 < P \leq 180 \\ 4, & P > 180 \end{cases}$$

P : Power (hp)

4. Synchronization / Synchrophasing Decision Rule

This rule determines whether propeller synchronization or synchrophasing should be enabled to reduce noise and vibration in multi-engine aircraft. When noise priority is high, synchronization is recommended to ensure

propellers rotate in a coordinated manner, minimizing harmonic interference and tonal noise. If noise is not a primary concern, synchronization can be disabled to simplify design and reduce weight and cost [1, 3, 12].

$$\begin{cases} \text{Enabled} & N_{\text{priority}} = \text{High} \\ \text{Disabled,} & \text{otherwise} \end{cases}$$

N : Noise priority

5. Engine Recommendation Logic

This rule suggests the most suitable engine type based on the aircraft's power requirements and operational priorities. For low-power applications, a piston engine is typically recommended. For medium-power ranges, a turboprop is preferred. In cases where noise priority is low or for advanced concepts like Electric VTOL (EVTOL) or Advanced Air Mobility (AAM), electric motors are considered suitable. This ensures the engine choice aligns with power demands, noise considerations, and modern propulsion trends [1, 3, 2].

$$\begin{cases} \text{Piston Engine,} & P < 200 \\ \text{Turboprop,} & 200 \leq P < 1500 \\ \text{Electric Motor,} & \text{Low noise priority OR EVTOL} \end{cases}$$

P : Power (hp)

6. Hub Type Selection Rule (Expanded to Multiple Lines)

This rule determines the appropriate propeller hub type based on the selected pitch mechanism and engine power. Fixed propellers require no hub actuation, ground-adjustable or low-power configurations typically use a simple single-acting hub, while variable or high-power propellers demand a more sophisticated double-acting hub to ensure rapid response and reliable performance. The selection ensures compatibility between the hub mechanism and the propeller's operational demands [1, 5, 3, 9].

$$\begin{cases} \text{None,} & O1 = \text{Fixed} \\ \text{Single-Acting,} & O1 = \text{Ground Adjustable / Low-Power} \\ \text{Double-Acting,} & O1 = \text{Variable / High-Power} \end{cases}$$

$O1$ = Propeller Pitch Type outputted

7. Critical Engine Logic

This rule addresses multi-engine configurations by evaluating whether a critical engine exists. A critical engine is defined as the one whose failure produces the maximum adverse yaw, making recovery difficult. If no engine is designated as critical, the program may recommend a left-hand counter-rotating propeller to balance torque and maintain symmetrical thrust. This approach improves overall handling and safety but can slightly increase production and maintenance complexity due to the rarity of left-hand propeller components [2, 5, 10].

If No Critical Engine $\Rightarrow$ Recommend LH counter-rotating propeller

References:

1. Aircraft Technical Book Company, "EASA Module 17 – Propellers", Copyright © 2016, All Rights Reserved.
2. Hamilton Standard, "Propeller Engineering Fundamentals", Internal Training Manual, 1995.
3. S. Mattingly, "Propeller Theory and Performance", Aircraft Propulsion Notes, Purdue University, 2012.
4. NACA, "Propeller Characteristics at Various Blade Angles", NACA Report 640, 1938. (Primary source for blade twist, pitch–power relationships)
5. Jeppesen, "Powerplant Textbook", Jeppesen Publishing, Year of Publication.
6. J. Roskam, "Airplane Design, Part V: Propulsion and Performance", DARcorporation Press, 1990.
7. B. W. McCormick, "Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics", 2nd ed., John Wiley & Sons, 1995.
8. Federal Aviation Administration, "FAA ACs on Icing (AC 91-74B, AC 91-51A), Aircraft Icing Handbook; Research Overviews", 2020.
9. Hartzell Propeller Inc., "Propeller System Design Guide", Engineering Handbook, 2010.
10. E. Torenbeek, "Synthesis of Subsonic Airplane Design", Kluwer Academic Publishers, 1982.
11. E. Obert, "Aerodynamic Design of Transport Aircraft", IOS Press, 2009.
12. K. Seddon & S. Newman, "Basic Helicopter Aerodynamics", Wiley-Blackwell, 2011.

პროპელერის მრავალკრიტერიუმიანი პროექტირების აპლიკაცია (MCDM)

არია ნაზარფარვარ¹, სინგჰ იაშ კუმარ², პონტენ სურაჯ³,
აღდალი ანას⁴, მოჰამედ მოჰამედ აბდულრაჰიმ იბრაჰიმ⁵

¹⁻⁵ საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: მოცემულ კვლევაში წარმოდგენილია Python-ზე დაფუძნებული მრავალკრიტერიული გადაწყვეტილების მიღების (MCDM) აპლიკაცია სამოქალაქო და მსუბუქ ავიაციაში გამოყენებული პროპელერების კონსტრუქციისთვის, რომელიც აერთიანებს სტრუქტურირებულ ლოგიკურ პროცესს და აფასებს მრავალ პარამეტრს, მათ შორის: საავიაციო ხომალდის კატეგორიას, ძრავის ტიპს და სიმძლავრეს, გარემო პირობებს, ასევე პრიორიტეტებს, როგორიცაა წონა, ხმაური და ღირებულება. EASA-ის მოდული 17, „პროპელერი“-ს მიხედვით, აპლიკაცია რეკომენდაციას აძლევს პროპელერის ოპტიმალურ კონფიგურაციებს, მათ შორის: Pitch-ის ტიპის ფრთის მასალას, ამოქმედების მექანიზმს, შემოყინვის საწინააღმდეგო სისტემას, ფრთების რაოდენობას და ბრუნვის სტრატეგიას. ამავე დროს უზრუნველყოფს ქვესისტემებს შორის თავსებადობას და თავიდან იცილებს კრიტიკულ შეცდომებს, როგორიცაა არასამთავებლო მასალა-სიმძლავრის კომბინაციები, არასწორი ტიპის მასალის არჩევა ან შეუსაბამო შემოყინვის საწინააღმდეგო სისტემა. ის ასევე ითვალისწინებს ოპერაციულ ფაქტორებს, როგორიცაა კრიტიკული ძრავის ეფექტები და ხმაურის შემამცირებელი ტექნოლოგიები, მათ შორის სინქროფეზირება და სინქრონიზაცია, რაც უზრუნველყოფს ეფექტიანობის, წარმადობის და უსაფრთხოების ბალანსს. ამ ფაქტორების მრავალკრიტერიულ ჩარჩოში გაერთიანებით, წარმოდგენილი მეთოდიკა ინჟინერებს, ტექნიკოსებს და სტუდენტებს სთავაზობს საიმედო გზამკვლევს, რათა გამოიკვლიონ პროპელერის განხორციელებადი კონსტრუქციები ოპერაციული უსაფრთხოების და სისტემური ეფექტიანობის შენარჩუნების პირობებში.

საკვანძო სიტყვები: მრავალკრიტერიული გადაწყვეტილების მიღება (MCDM), საავიაციო ძალური დანადგარი, ხმაურის შემცირება, კრიტიკული ძრავი.

აირტურბინულ ძრავებში შემავალი უცხო სხეულების (ნაწილაკების) აღმოჩენა და იდენტიფიკაცია OFDM - MIMO ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადარული სისტემით

თეიმურაზ ქორთუა¹, ანდრო მაისურაძე²

^{1, 2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

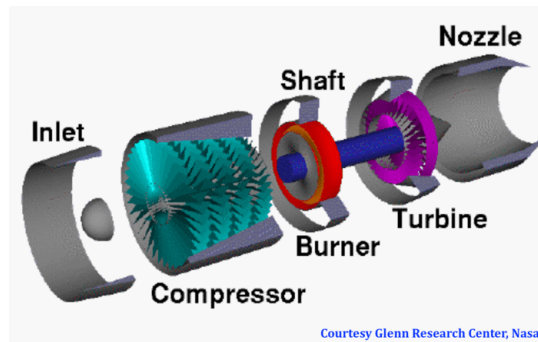
ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: თვითმფრინავების აირტურბინული ძრავები მგრძნობიარეა მათ გამდინარე ნაწილში მოხვედრილი უცხო სხეულების მიმართ, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ძრავის სერიოზული დაზიანება ან ეფექტურობის დაკარგვა[1]. ასეთი ობიექტების რეალურ დროში აღმოსაჩენად და მათი იდენტიფიკაციისთვის ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას წარმოადგენს OFDM – MIMO [4] ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული რადარული სისტემის გამოყენება. საჭიროა რადარული სისტემის აგება, რომელსაც შეუძლია ფუნქციონირება მაღალი დიაპაზონის გარჩევადობით, დოპლერის მგრძნობელობით და მრავალმხრივი არეკვლის, ხმაურის და ვიბრაციის მიმართ მდგრადობით; ისეთი ექსტრემალურმა პირობებმა (როგორიც არის: ჰაერის ნაკადის მაღალი სიჩქარე, ტემპერატურა, ტენიანობა) შესაძლებელია გავლენა მოახდინოს ისეთ მნიშვნელოვან პარამეტრზე, როგორიც არის რადარის ტალღის დაფარვის ზედაპირი (RCS).

საკვანძო სიტყვები: რადარი, მიმღები, (OFDM) ორთოგონალური სიხშირული გაყოფის მულტიპლექსირება, (MIMO) მრავალი შემავალი და გამომავალი სიგნალი, გადაცემის მრავალფეროვნება.

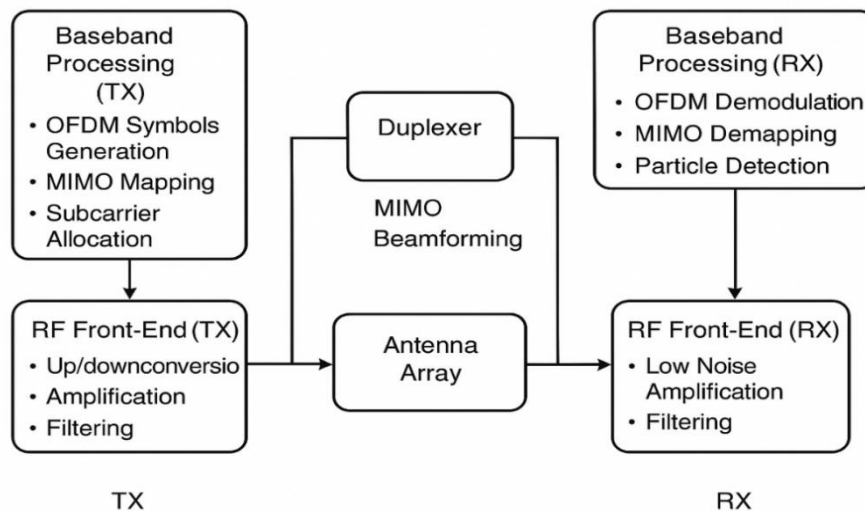
შესავალი

წარმოდგენილი კვლევა ეყრდნობა MIMO-OFDM რადარის სისტემის შემუშავებას, რომელიც გამოიყენებს ე.წ. ალამუტის სივრცით-დროის კოდირებას, რათა მიღწეულ იქნას უცხო სხეულების აღმოჩენის სიზუსტე, მათი გარჩევის საიმედოობა და მიმღების მაღალი მგრძნობელობა, შედარებით გამარტივებული დიზაინით. სისტემა უნდა განთავსდეს საჰაერო ხომალდის აირტურბინული ძრავის ჰაერმიმღებ მოწყობილობებში.



სურ. 1 აირტურბინული ძრავა

სისტემა თავდაპირველად უნდა მუშაობდეს მხოლოდ რადარის რეჟიმში, ორმაგი ფუნქციის მქონე რადარის კომუნიკაციის (DFRC) შემდგომი განვითარებადი პლატფორმით და გაფართოების პოტენციალით. უცხო სხეულების (ნაწილაკების) აღმოჩენის სისტემა დაფუძნებულია რადარების აგების ახალ ტექნოლოგიაზე და არქიტექტურაზე, რომელიც იყენებს **MIMO** –(Multiple-input and multiple-output) და **OFDM**-(Orthogonal frequency-division multiplexing) ტექნოლოგიებს[4], რათა უზრუნველყოს ერთდროული გადაცემა და მიღება ორ ანტენაზე. სისტემის საერთო ზოგადი ბლოკ-სქემა შედგება ხუთი ძირითადი ფუნქციური სექციისგან: საბაზისო დამუშავების ბლოკი (TX), RF წინა მხარე, დუპლექსორი, ანტენის მასივი და საბაზისო დამუშავების ბლოკი (RX). სურ. 2.



სურ. 2 რადარული სისტემის საერთო ბლოკ-დიაგრამა

1. TX საბაზისო გადამცემი და მონაცემთა დამუშავების ბლოკი:

ეს ბლოკი წარმოქმნის OFDM სიმბოლოებს და ასრულებს ქვეგადამტანის განაწილებას ნაწილაკის აღმოჩენის ამოცანის მოთხოვნების შესაბამისად. ის იყენებს MIMO -ს კოდირებული სიგნალების მრავალ სივრცულ გადაცემის ფენაზე გასანაწილებლად, რაც უზრუნველყოფს

პარალელური ზონდირების შესაძლებლობას და აუმჯობესებს ნაწილაკების აღმოჩენის სივრცულ გარჩევადობას.

2. RF წინა მხარე (TX/RX):

RF წინა მხარე ახორციელებს საბაზისო სიგნალის აღმავალ გარდაქმნას დანიშნულ გადამტან სიხშირეზე გადაცემისთვის და დადმავალ გარდაქმნას მიღებისთვის. ის მოიცავს სიმძლავრის გამამდიერებლებს (PA) და დაბალი ხმაურის გამამდიერებლებს (LNA) სიგნალის მაღალი მთლიანობის შესანარჩუნებლად, ზოლის გამტარობის ფილტრებთან ერთად არასასურველი ჰარმონიკების და ინტერმოდულაციის დამახინჯების (IMD) ჩასახშობად.

3. დუპლექსორი:

სიხშირის შერჩევითი ქსელი ჰყოფს გადაცემის გზებს, ხოლო საერთო ანტენის გამოყენება უზრუნველყოფს საჭირო გადაცემის იზოლაციას და მინიმუმამდე ამცირებს შეერთებას, მაღალი გადაცემის სიმძლავრეს და არ ამახინჯებს მიმღების გზას.

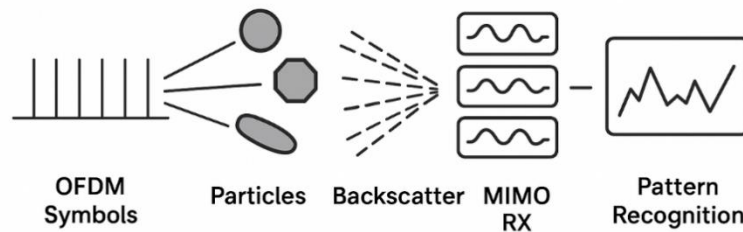
4. ანტენის მასივი (MIMO):

ანტენის სტრუქტურა საშუალებას იძლევა სივრცითი მულტიპლექსირების MIMO ტექნიკის მეშვეობით. ეს საშუალებას იძლევა სიგნალის მიმართულებით გადაცემისა და მიღებისა, რაც ზრდის აღმოჩენის სიზუსტეს და საშუალებას აძლევს სისტემას განასხვავოს ნაწილაკები სხვადასხვა სივრცითი წარმოშობიდან.

5. RX მიმღების საბაზისო დამუშავების ბლოკი:

MIMO-დან მიღებული სიგნალი გადის OFDM დემოდულაციას და დემოდულირებას მონაცემების მრავალი სივრცითი და სიხშირული არხიდან აღსადგენად. ალგორითმები ამუშავებენ აღდგენილ სიგნალებს ნაწილაკების რეალურ დროში იდენტიფიცირების, დათვლისა და კლასიფიკაციის მიზნით სიგნალის ამპლიტუდის, ფაზის ვარიაციის და დროის დომენის საფუძველზე. შეჯამებისთვის, შემოთავაზებული სისტემის არქიტექტურა აერთიანებს მოწინავე საბაზისო დამუშავებას, MIMO სხივის ფორმირებას და OFDM მულტიპლექსირებას ერთიან გადამცემ-მიმღების სტრუქტურაში. ეს MIMO + OFDM ვარიანტი ძალიან საინტერესოა და ტექნიკურად უფრო ძლიერი მიდგომაა, განსაკუთრებით სხვადასხვა სახის ნაწილაკების აღმოჩენისა და პარალელური სიგნალების აღქმისთვის. სურ. 3

Signal Interaction and Detection Principle



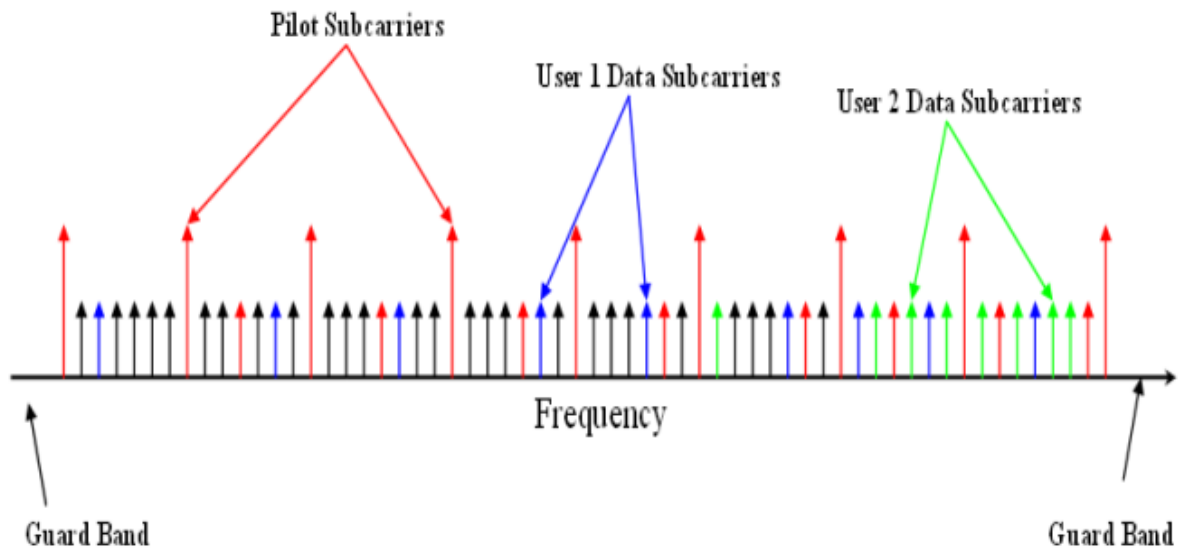
სურ. 3 სიგნალის ურთიერთქმედება და აღმოჩენის პრინციპი

ძირითადი ნაწილი

რადარების განვითარების ტექნოლოგიები და OFDM-ის გამოყენების თეორიული საფუძვლები[2,3,5]:

მულტიპლექსირება სიხშირეთა ორთოგონალური დაყოფით (OFDM) არის ციფრული მოდულაციის ტექნიკა, რომელიც იყენებს მრავალ ორთოგონალურ ქვეგადამტანებს და ატარებს მონაცემებს დაბალი სიმბოლოების სიჩქარით, რომელიც ხელს უშლის ქვეგადამტანებს შორის ნებისმიერ ჩარევას.

მულტიპლექსინგი სიხშირული დაყოფით (FDM) არის ტექნიკა, სადაც გადასაცემი მთავარი სიგნალი გადაიცემა დაყოფილი დამოუკიდებელი სიგნალების ერთობლიობად, რომლებიც ცნობილია როგორც ქვეგადამტანები სიხშირეთა დომენში. ამრიგად, ორიგინალი მონაცემთა ნაკადი იყოფა მრავალ პარალელურ ნაკადად (ან არხად), თეორიულად რაც შესაძლებელია, თითოეული ქვეგადამტანებისთვის. ამ ქვეგადამტანების თითოეული ნაწილი შემდეგ მოდულირდება ჩვეულებრივი მოდულაციის სქემით და გაერთიანებულია FDM სიგნალის გენერირებისთვის.



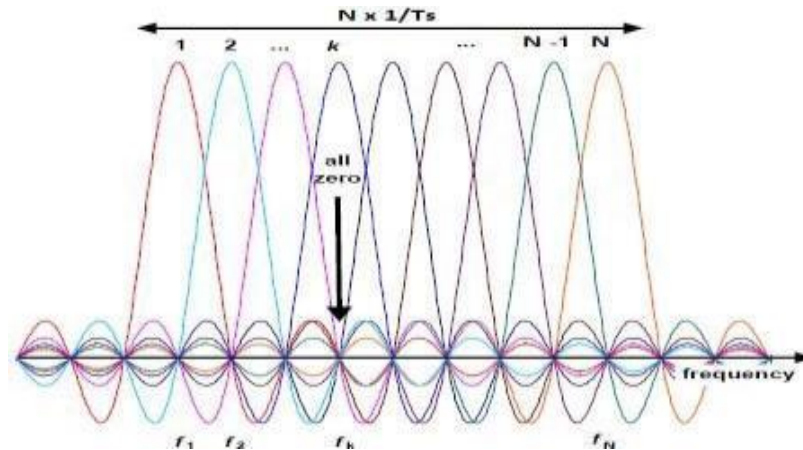
სურ. 4 OFDM სიხშირის სპექტრი დაცვის ზოლებით

სურ. 4 გვიჩვენებს მოცემულ OFDM სიხშირის სპექტრს დაცვის ზოლებით, პილოტური ქვეგადამტანებით და მომხმარებლის მონაცემთა ქვეგადამტანებით. მრავალი ქვეგადამტანის გადაცემას კონკრეტულ გამტარობაზე. იმის გამო, რომ OFDM სიგნალებს შეუძლიათ ეფექტურად გადაცემა დიდ გამტარობაზე, შესაძლებელია მაღალი დიაპაზონის გარჩევადობის მიღწევა, რაც საჭიროა თვითმფრინავის აირტურბინულ ძრავში მიხვედრილი სხეულების დეტალური ამოცნობისთვის.

თუმცა, FDM გადაცემის თითოეული ქვეგადამტანი სიხშირე დამოუკიდებლად აღდგება მიმღებზე და ამიტომ, ეს სიგნალები უნდა აკმაყოფილებდეს გარკვეულ პირობებს ორთოგონალურობის მისაღწევად, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ.1-ზე. მაგალითად, მათ შეიძლება ჰქონდეთ არაგადამფარავი სპექტრები, რათა ფილტრებმა, რომლებიც მორგებულია სხვადასხვა ქვეგადამტანებზე, შეძლონ თითოეული მათგანის დამოუკიდებლად აღდგენა. ეფექტურობის მისაღწევად, პრაქტიკულ ფილტრებში ქვეგადამტან ზოლებს შორის იქმნება დამცავი ზოლი. თუ ქვეგადამტანი სიგნალები აკმაყოფილებენ ორთოგონალურობის პირობას, მათი სპექტრი შეიძლება გადაფაროს, რითაც გაუმჯობესდება სპექტრული ეფექტურობა. ეს ტექნიკა ცნობილია როგორც ორთოგონალური FDM ან OFDM.

შემდეგ, როგორც ნაჩვენებია სურ 5-ში, OFDM სიმბოლოების სპექტრი შედგება გადამფარავი sinc ფუნქციებისგან, რომელთაგან თითოეული წარმოადგენს ქვემატარებელს, სადაც k -ურ ქვემატარებლის სიხშირეზე ყველა სხვა ქვემატარებელს აქვს ნულები. გასათვალისწინებელია, რომ თითოეული ქვემატარებელი ცენტრირებულია fk -ზე და გამოყოფილია ინტერვალით $1/T_s$ -ით მისი მეზობლებისგან. როდესაც ეს ხდება, ორთოგონალურობის პირობა სრულდება, ამიტომ გადაცემისთვის მიიღწევა მაღალი სპექტრული ეფექტურობა. ამ გზით, ქვეგადამტანების აღდგენა შესაძლებელია მიმღებზე გადამტანებს შორის ჩარევის გარეშე, სიგნალის ძლიერი სპექტრული

გადაფარვის მიუხედავად, ორთოგონალურობის პირობის საშუალებით, ოსცილატორების ბანკის და თითოეული ქვეგადამტანის დაბალი გამტარობის ფილტრაციის გამოყენებით.



სურ. 5 OFDM სიმბოლოს სპექტრი გადაფარული ქვეგადამტანებით

OFDM ქვეგადამტანების და ქვეზოლებს შორის ორთოგონალურობის პრინციპი:

სიტყვა „ორთოგონალური“ მიუთითებს, რომ სისტემაში გადამტან სიხშირეებს შორის არსებობს ზუსტი მათემატიკური კავშირი. ნორმალურ სიხშირული დაყოფის მულტი-პლექსურ სისტემაში, ბევრი გადამტანი სიხშირე ისეა დაშორებული, რომ სიგნალების მიღება შესაძლებელია ჩვეულებრივი ფილტრებისა და დემოდულატორების გამოყენებით.

ასეთ მიმდებარეში, დამცავი ზოლები შემოდის სხვადასხვა გადამტან სიხშირის დომენში, რაც იწვევს სპექტრის ეფექტურობის შემცირებას. თუმცა, შესაძლებელია OFDM სიგნალში გადამტან სიხშირეთა ისე განლაგება, რომ ცალკეული გადამტანების გვერდითი ზოლები გადაფარონ და სიგნალები მაინც მიიღონ მიმდებარე გადამტანების ჩარევის გარეშე. ამისათვის გადამტანი სიხშირეები მათემატიკურად ორთოგონალური უნდა იყვნენ ერთმანეთის მიმართ. თუმცა, მრავალგადამტანიანი მოდულაციის (MCM) გადაცემული სიგნალები, $s(t)$ შეგვიძლია წარმოვადგინოთ შემდეგნაირად:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_{sc}} C_{ki} S_{ki}(t - iT_s)$$

$$S_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t}$$
(1)

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 < t \leq T_s) \\ 0, & (t \leq 0, t > T_s) \end{cases},$$
(2)

სადაც; C_{ki} წარმოადგენს k -ური ქვემატარებლის i -ურ საინფორმაციო სიმბოლოს, S_{ki} წარმოადგენს k -ური ქვემატარებლის ტალღის ფორმას, N_{sc} წარმოადგენს ქვეგადამტანების

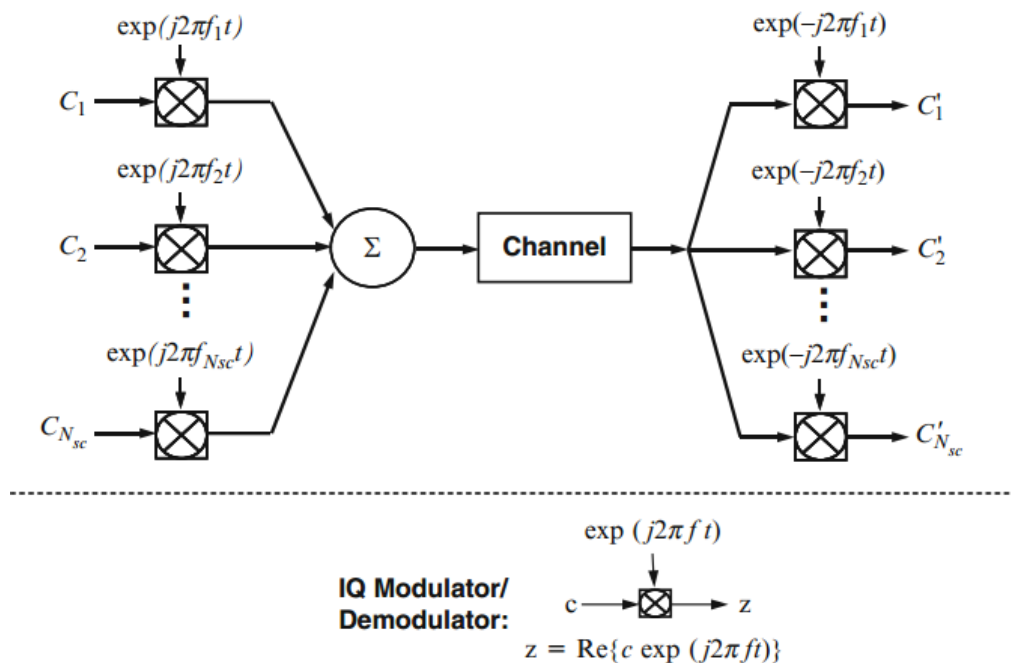
რაოდენობას, f_k წარმოადგენს ქვეგადამტანს სიხშირეს, T_s წარმოადგენს სიმბოლოს პერიოდს და ბოლოს, $\Pi(t)$ წარმოადგენს იმპულსის ფორმირების ფუნქციას. თუმცა, თითოეული ქვემატარებელი ოპტიმალური აღმოჩენის მისაღწევად შეიძლება გამოიყენოს ფილტრი, რომელიც შეესაბამება ქვემატარებლის ტალღის ფორმას, ან კორელატორი, რომელიც შეესაბამება ქვემატარებელს, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ 6-ზე. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მიმღებზე აღმოჩენილი საინფორმაციო სიმბოლო C_{ik} მოცემულია შემდეგნაირად:

$$C_{ik} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s^* k dt$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt$$

(3)

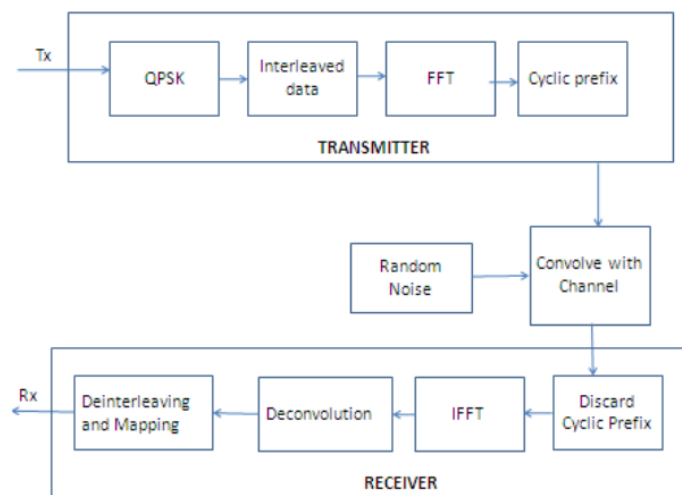
სადაც $r(t)$ წარმოადგენს მიღებულ დროის დომენის სიგნალს.



სურ. 6. მოდულაციის სისტემა მრავალი გადამტანით (MCM)

მრავალი გადამტანით მოდულაციის სისტემა MCM იყენებს არაგადაფარულ, შეზღუდული დიაპაზონის სიგნალებს, მისი დანერგვა გულისხმობს ოსცილატორებისა და ფილტრების დიდი რაოდენობას გადამცემსა და მიმღებზე. მიუხედავად იმისა, რომ მისი თანდაყოლილი უპირატესობებით, MCM-ის ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა ის არის, რომ ის მოითხოვს დიდ გამტარობას. OFDM მოდულაციის გამოყენებით, მაღალი სპექტრული ეფექტურობის გარდა, გამოიყენება მრავალჯერადი შემავალი, მრავალჯერადი გამომავალი (MIMO) ანტენა-მასივი.

ამგვარ MIMO რადარულ სისტემებს აქვთ რამდენიმე უპირატესობა, ძირითადად სივრცითი გარჩევადობის გაუმჯობესების და კუთხური არეკვლის შეფასების ფორმირების გამოყენების შესაძლებლობა, რაც აუცილებელია მრავში მიხვედრილი სხეულების დეტალური ამოცნობისთვის. OFDM სიგნალის გადაცემისას, აუცილებელია, რომ ქვეგადამტანი სიხშირეები დარჩნენ ორთოგონალურები და არ ერეოდნენ ერთმანეთში. აქ გამოყენებულია MIMO ალამუტის მეთოდები, რომელიც არის სივრცულ-დროით ბლოკური კოდირების ტექნიკა, რომელიც გამოიყენება მონაცემთა საიმედოობისა და გადაცემის სიჩქარის გასაუმჯობესებლად. ყველაზე გავრცელებული მეთოდი იყენებს ორ გადამცემ ანტენას და ერთ ან მეტ მიმღებ ანტენას ერთი და იგივე მონაცემების გასაგზავნად ისე, რომ გამოყენებული იყოს სივრცითი მრავალფეროვნება, რაც მიმღებს საშუალებას აძლევს ზუსტად გაშიფროს სიგნალი, ალამუტის ძირითადი სქემა ახორციელებს კოდირებას მონაცემთა ორი სიმბოლოთი, მათი სპეციალური ნიმუშით გადაცემით ორ ანტენაზე ორ დროით სლოტზე, გადაცემის ორთოგონალურობის მისაღწევად. ამასთან ერთად OFDM-ზე სხივური ფორმირების გამოყენებით შესაძლებელი ხდება OFDM სიგნალის ენერგიის კონკრეტული მიმართულებით ფოკუსირება. დიაპაზონის, დოპლერის ეფექტის და კუთხის შეფასების შესრულება სამიზნე პოზიციების ზუსტი შეფასების საშუალებას იძლევა, რაც კიდევ უფრო გაუმჯობესებულია სხივური ფორმირებით.



სურ. 7 OFDM ბლოკ-სქემა

OFDM გადამცემი სიგნალის გენერირებისთვის, რომელთაგან თითოეული შეიცავს N ქვემატარებელს გადაცემისთვის, ციფრული ბიტური ნაკადი გარდაიქმნება მოდულაციის სქემად, როგორიცაა კვადრატულ ფაზური მანიპულაცია (QPSK) ან კვადრატულ ამპლიტუდური მოდულაცია (QAM). ამ მიზნით გამოვიყენეთ 16-QAM, რომელიც უზრუნველყოფს უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტურობას, ვიდრე QPSK, სიმბოლოზე 4 ბიტის გადაცემით 2-ის ნაცვლად.

ალამუტის დეკოდირების სქემა

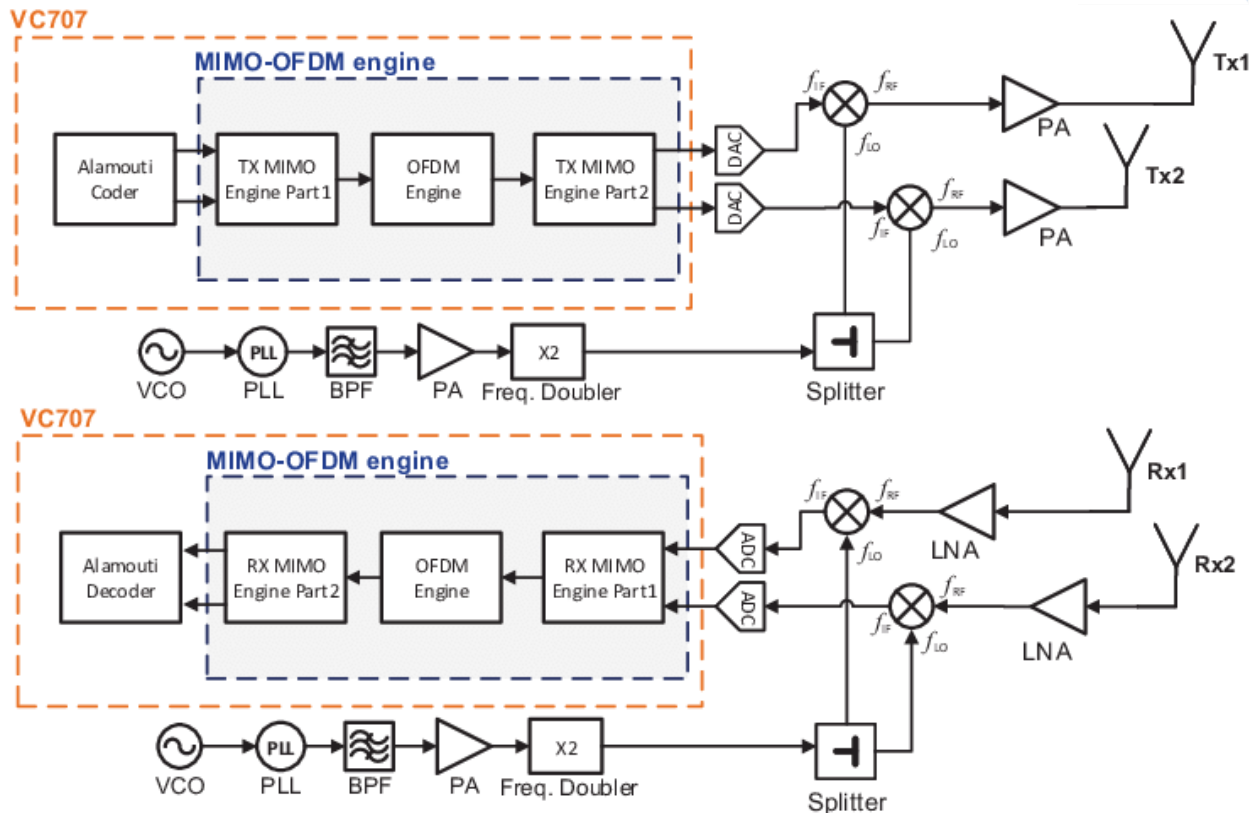
ამ ნაწილში მოკლედ განხილულია ალამუტის დეკოდირების სქემა. ალამუტის კოდი არის სივრცითი-დროით ბლოკური კოდირების (STBC - Space-time block coding) ტექნიკა უკაბელო კომუნიკაციისთვის, რომელიც იყენებს ორ გადამცემ ანტენას და ორი სიმბოლოს პერიოდს მუშაობის გასაუმჯობესებლად. ის მუშაობს სიმბოლოების წყვილის „ჰკვიანური“ გზით გადაცემით, რომელიც იყენებს სხვადასხვა არხის გზებს მრავალფეროვნების გაზრდის მისაღწევად (რაც სისტემას უფრო მდგრადს ხდის ცვალებადობის მიმართ) გადამცემისგან არხის სტატუსის ცოდნის გარეშე. ეს მონაცემთა გადაცემის უფრო საიმედოობის საშუალებას იძლევა და განსაკუთრებით სასარგებლოა სისტემებში, რომლებსაც აქვთ მრავალი გადამცემი ანტენა და მინიმუმ ერთი მიმღები ანტენა. მიმღები აერთიანებს ორივე დროის ინტერვალთან მიღებულ სიგნალებს ორივეს საიმედოდ დეკოდირებისთვის. ეს პროცესი ეფექტურია, რადგან ის ეფუძნება ორთოგონალურობის პრინციპს, რაც ნიშნავს, რომ გადაცემული სიმბოლოების გამოყოფა შესაძლებელია მიმღებთან.

ძირითადი უპირატესობები:

- ის მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს სიგნალის საიმედოობას, განსაკუთრებით ცვალებად არხებში, იმის უზრუნველყოფით, რომ მაშინაც კი, თუ ერთი გზა ცუდია, სიგნალი მაინც შეიძლება იქნას მიღებული მეორე გზით;
- გადამცემს არხის შესახებ ინფორმაციის არქონა: გადამცემს არ სჭირდება არხის კოეფიციენტების ცოდნა, რაც მას პრაქტიკულ და ფართოდ გამოყენებულ ტექნიკად აქცევს.
- გამტარობის გაფართოების არარსებობა: ის აღწევს მრავალფეროვნების მომატებას გამტარობის გაზრდის გარეშე, რაც მისი მთავარი უპირატესობაა სხვა მრავალფეროვნების ტექნიკასთან შედარებით.
- დაბალი გამოთვლითი სირთულე: დეკოდირების პროცესი შედარებით მარტივია, რაც მას გამოთვლით ეფექტურს ხდის

რადარის პრაქტიკული რეალიზაციისათვის პლატფორმა VC 707

განხილული რადარისათვის OFDM - MIMO ტექნოლოგიის ბაზაზე, ჩვენ შევარჩიეთ ქვემოთ წარმოდგენილი პლატფორმა VC 707 - რომელიც გულისხმობს მრავალი შემავალი და მრავალი გამომავალი სიგნალების (MIMO) საანტენო სისტემის აპარატურულ იმპლემენტაციას, რომელიც იყენებს ორთოგონალურ სიხშირის დაყოფით მულტიპლექსირების (OFDM) ტექნოლოგიას VC707 პლატფორმას, ალამუტის კოდირებით და (FPGA-Field Programmable Gate Array) PGA ნიშნავს პროგრამირებად ვენტილურ მასივს (კარიბჭეთა მასივს).



სურ. 8 ციფრული ინტეგრირებული სქემა

სურ. 8-ზე წარმოდგენილია ციფრული ინტეგრირებული სქემა, რომლის დაპროგრამებაც შესაძლებელია შესაბამისი პრაქტიკული შესასრულებლად მისი წარმოების შემდეგ. ძირითადად გამოიყენება კვლევის ან სპეციალიზებული მაღალი ხარისხის აპლიკაციებისთვის რადიო კომუნიკაციებში.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევა ასახავს თანამედროვე რადარული ტექნოლოგიების ერთ-ერთ პერსპექტიულ მიმართულებას — OFDM-MIMO არქიტექტურაზე დაფუძნებული სისტემის გამოყენებას ავიაციისთვის მნიშვნელოვან ამოცანაში, რომელიც ეხება აირტურბინულ ძრავებში უცხო სხეულების (FOD) ოპერატიულ აღმოჩენასა და იდენტიფიცირებას. მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ ორთოგონალური სიხშირული გაყოფის მულტიპლექსირება და მრავალანტენიანი სივრცითი მულტიპლექსირება ქმნის მაღალი გარჩევადობის, დოპლერული მგრძნობელობისა და ხმაურ-ვიბრაციის მიმართ მდგრადი ზონდირების მექანიზმს, რომელიც არსებითად აძლიერებს ძრავის ჰაერმიმღების გარემოს მონიტორინგის ეფექტურობას.

კვლევამ აჩვენა, რომ ალამუტის სივრცით-დროითი კოდირების, სხივური ფორმირების და OFDM ქვეგადამტანების ორთოგონალურობის ერთიანობა უზრუნველყოფს ნაწილაკების სივრცითი და სიხშირული დისტრიბუციის ზუსტ აღდგენას რეალურ დროში, რაც კრიტიკულია მათი ტიპისა და შესაძლო ზიანის მასშტაბის ოპერატიული შეფასებისთვის. FPGA-VC707 პლატფორმაზე განხორციელებული იმპლემენტაცია ადასტურებს სისტემის პრაქტიკულ რეალიზირებას და ხაზს უსვამს მის მასშტაბირებადობას მომავალი DFRC (Dual-Function Radar-Communication) სისტემებისკენ.

მთლიანობაში, OFDM-MIMO რადარული სისტემა წარმოადგენს მაღალპოტენციურ ტექნოლოგიურ საფუძველს FOD-ის სტრუქტურულ მონიტორინგში. მისი დანერგვა მნიშვნელოვნად გააძლიერებს ავიაციის უსაფრთხოების სტანდარტებს, შეამცირებს ძრავის დაზიანების რისკებს და ხელს შეუწყობს ინოვაციური, ინტელექტუალური დიაგნოსტიკური პლატფორმების განვითარებას თანამედროვე საავიაციო ინდუსტრიაში.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტიანი მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Andro maisuradze, Giorgi Mushkudiani, Dato Metreveli, Giorgi Gedaminski. *Analysis of foreign objects ingress into aircraft gasturbine engines and methods of their recording. AIR TRANSPORT 2019 ISSN 1512-4916 63-75;*
2. თ. ქორთუა. (2018). *სატელეკომუნიკაციო სიხშირული სპექტრის მართვისა და რეგულირების საფუძვლები (9 kHz–300 GHz) სიხშირულ დიაპაზონებში*. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. ISBN 978-9941-28-405-2 (PDF);
3. Amrita Vishwa Vidyapeetham Coimbatore-641112, India“ **Visualization of OFDM Using Microsoft Excel Spreadsheet in Linear Algebra**“ *Perspective Conference Paper · August 2012;*
4. Y.L. Sit. „*MIMO OFDM RadarCommunication System with Mutual Interference Cancellation*“. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017;
5. Benjamin Nuss, Lucas Giroto de Oliveira and Thomas Zwick „*Frequency comb MIMO OFDM radar demonstrator with high unambiguous velocity*“, Institute of Radio Frequency Engineering and Electronics, Karlsruhe Institute of Technology, 76131 Karlsruhe, Germany.

Detection and Identification of Foreign Objects (Particles) in Aircraft Gas-Turbine Engines Using an OFDM–MIMO Radar System

Teimuraz Kortua¹, Andro Maisuradze²

^{1, 2} Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *Gas-turbine engines of aircraft are highly sensitive to foreign objects entering the flow path, which can lead to severe engine damage or significant degradation of operational efficiency [1]. A promising approach for real-time detection and identification of such objects is the use of radar systems based on Orthogonal Frequency-Division Multiplexing and Multiple-Input Multiple-Output (OFDM–MIMO) technologies [4]. Developing such a radar requires achieving high range resolution, Doppler sensitivity, and robustness to multipath reflections, noise, and vibration. Moreover, extreme operational conditions—such as high air-flow velocity, temperature, and humidity may influence critical parameters, including the radar cross section (RCS) of detected particles.*

Key words: *Radar, Receiver, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), transmit diversity.*

ჰაერსატარ სისტემებში მყარი ნაწილაკების დეტექტირებისა და რაოდენობის შეფასების გაუმჯობესებული მოდელი ულტრაბგერითი მეთოდის გამოყენებით

ბიძინა აბესაძე¹, გიორგი თაყაძე²

¹ საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

² ალტე უნივერსიტეტი, უნივერსიტეტის ქუჩა №2, 0177 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: წარმოდგენილი ნაშრომი ეხება ჰაერსატარ სისტემებში უცხო მყარ ნაწილაკებთან დაკავშირებული პრობლემების შესწავლას და მათ აღრიცხვაზე დაფუძნებული ულტრაბგერითი მეთოდის განვითარებას. თანამედროვე ინდუსტრიული და საავიაციო სისტემების გამართულობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ჰაერის ნაკადის სისუფთავესა და სტაბილურობაზე. გარემოდან სისტემაში მოხვედრილი მტვერი, ქვიშა, ფერფლი ან ლითონის მიკრონაწილაკები იწვევენ აბრაზიულ ცვეთას, ზედაპირების ეროზიას, ტურბინებისა და კომპრესორების დეფორმაციას, რაც ამცირებს დანადგარის ენერგოეფექტურობას და ზრდის ავარიული მწყობრიდან გამოსვლის რისკს. ამ ფონზე, აუცილებელია შეიქმნას არაინვაზიური მეთოდი, რომელიც რეალურ დროში შეძლებს ჰაერსატარ არხებში მყარ ნაწილაკთა აღმოჩენასა და რაოდენობრივ შეფასებას სისტემის მუშაობის შეჩერების გარეშე.

კვლევის ფარგლებში შემოთავაზებულია ულტრაბგერითი სენსორული სისტემა, რომელიც იყენებს გამგზავნი და მიმღები ტრანსდუსერების წყვილს. მათ შორის გამავალი ტალღა რეაგირებს გარემოს არაერთგვაროვნებაზე, უცხო ნაწილაკებზე, რაც იწვევს ტალღის გაფანტვას, შთანთქმას ან ფაზურ ცვლილებას. სისტემის მუშაობის პრინციპი ეფუძნება ტალღის გავრცელების დროისა და ამპლიტუდის ცვლილებების ანალიზს, რაც შესაძლებელს ხდის ნაწილაკების ზომისა და კონცენტრაციის განსაზღვრას. მოყვანილია თეორიული მოდელები, რომლებიც აღწერს ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარის, ტალღის სიგრძისა და გარემოს სიმკვრივის ურთიერთდამოკიდებულებას, აგრეთვე მყარ ნაწილაკებთან გაფანტვის ეფექტებს Rayleigh-ისა და Mie-ის მოდელების საფუძველზე.

მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოადგენს ეფექტურ, ეკონომიურ და ეკოლოგიურად უსაფრთხო საშუალებას ჰაერსატარ სისტემების მდგომარეობის კონტროლისთვის. შემოთავაზებული მოდელის დანერგვა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს სისტემების სანდოობასა და ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას როგორც საავიაციო, ისე ენერგეტიკულ ინდუსტრიაში.

საკვანძო სიტყვები: ულტრაბგერა, ჰაერსატარი სისტემა, მყარი ნაწილაკები, სენსორული დიაგნოსტიკა, აკუსტიკური მონიტორინგი.

შესავალი

თანამედროვე ინდუსტრიაში, განსაკუთრებით საავიაციო და ენერგეტიკულ სფეროში, ჰაერსატარ სისტემებს განსაკუთრებული დატვირთვა აქვთ. ეს სისტემები უზრუნველყოფს ჰაერის ნაკადის რეგულაციას, გაგრილებას, წნევის ბალანსს, აგრეთვე საწვავის წვის ხარჯის კონტროლს. ასეთი სისტემები მგრძნობიარეა გარემოსა და მასში მოხვედრილი ნაწილაკების მიმართ. უცხო მყარ ნაწილაკებზე დაკვირვება და მათი დროული იდენტიფიკაცია არა მხოლოდ ტექნიკური პრობლემების პრევენციისთვის, არამედ ადამიანთა სიცოცხლისა და უსაფრთხოების დასაცავადც არის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი. ჰაერსატარ სისტემაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკები შეიძლება იყოს მტვერი, ქვიშა, ფერფლი, სეტყვა, ბეტონის საფარის ნამსხვრევი, ლითონის მიკრონაწილაკები, გამხმარი ზეთის წვეთები ან თუნდაც ლითონის მინიატურული ფრაგმენტები, რომლებიც წარმოიქმნება სისტემის შიდა კომპონენტების ცვეთის შედეგად. მათი არსებობა ჰაერში შესაძლოა გამოწვეული იყოს როგორც ბუნებრივი პირობებით (მაგალითად, უდაბნოში მოქმედი ქვიშის ქარები, ვულკანური ფერფლი ან ატმოსფერული მტვერი), ისე ტექნოგენური ფაქტორებით (ტექნიკური ცვეთა, ძრავის ან ფილტრების ხარვეზი, არასწორი მოვლა-შენახვა). მიუხედავად იმისა, რომ ეს ნაწილაკები ვიზუალურად უმნიშვნელოა, რეალურად, მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში მოქმედებენ როგორც აბრაზიული მასალა და იწვევს მექანიზმის ნაწილების ეროზიას, კოროზიასა და სისტემური არასტაბილურობის ეფექტებს. თვითმფრინავის რეაქტიულ ძრავებში ჰაერსატარი სისტემები შემადგენელი მთავარი კომპონენტებია. აქ ჰაერი გადის კომპრესორებსა და ტურბინებს შორის, სადაც წნევა და ტემპერატურა ატმოსფეროსთან შედარებით მკვეთრად იზრდება. ამ პირობებში ჰაერში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკები აზიანებს კომპრესორის და ტურბინის ნიჩბებს, რაც იწვევს მათ დეფორმაციას, ეფექტურობის შემცირებასა და წვის პროცესის არათანაბარ გადანაწილებას; ადგილი აქვს ეროზულ დაღლას, რაც იწვევს მიკრობზარების წარმოქმნას და შემდგომად მეტალის ფრაგმენტაციას; აზინძურებს სენსორებს, რაც ართულებს რეალურ დროში მექანიკური პარამეტრების კონტროლს. იწვევს არაპროგნოზირებად ვიბრაციებს და ძრავის გადახურებას, რაც შესაძლოა დასრულდეს ძრავის მწყობრიდან გამოსვლით.

ამ ფაქტთან დაკავშირებით ერთ-ერთი ფართოდ ცნობილი შემთხვევა იყო 2010 წელს, როდესაც ისლანდიის ვულკანური ფერფლის გამო ევროპის თითქმის ყველა რეისი გაუქმდა. აღსანიშნავია, რომ ვულკანური ფერფლი რეაქტიულ ძრავში მოხვედრისას არ დნება, არამედ გაღებობასა და ხელახლა გამყარებასთან ერთად ქმნის შუშის მსგავს მყარ ფენას, რომელიც ლითონურ ზედაპირებს ედება და აფუჭებს სისტემას. ენერგეტიკაში, განსაკუთრებით გაზის ტურბინებში, ჰაერსატარი სისტემის ფუნქციური მუშაობა გადამწყვეტია მისი სტაბილური მუშაობისთვის. მყარ ნაწილაკებს შეუძლია გამოიწვიოს: მილების ან არხების დახშობა, რაც იწვევს აირების წნევის არათანაბარ განაწილებას; გაგრილების სისტემაში წყლის/ჰაერის ნაკადის დაბრკოლებას, რის გამოც იზრდება მოწყობილობათა ტემპერატურა და ხდება მათი დაზიანება; წვის კამერაში დაუწველი მასალის დაგროვება, ზრდის CO და NOx-ის გამოყოფას და ამცირებს მისი მუშაობის ეფექტურობას. გარდა ტექნიკური პრობლემებისა, მყარ ნაწილაკებთან დაკავშირებული გაუმართაობები ხშირად იწვევს მექანიზმების ავარიულ გაჩერებებს, რითაც ირღვევა საწარმოო გრაფიკი, იზრდება ფინანსური დანახარჯი მათი

რემონტისთვის და შესაძლოა გამოიწვიოს მათი კრიტიკული დაზიანება, რომელიც საჭიროებს ძვირადღირებულ შეკეთებას ან კომპონენტის სრულ გამოცვლას.

თანამედროვე ინდუსტრიული ინფრასტრუქტურა სულ უფრო მეტად დამოკიდებულია ისეთ კომპლექსურ სისტემებზე, რომლებიც ახორციელებენ გაზის, ჰაერის ან სხვა ნაკადების ტრანსპორტირებას (როგორც მაგისტრალური ასევე სტაციონალური რეზერვუარების მილსადენები) მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. ამ დროს მცირე გადაცდომაც კი, მაგალითად მყარი ნაწილაკის მოხვედრა ჰაერსატარ მილში, შეიძლება გახდეს სისტემის მუშაობის მოშლის ან ენერგოეფექტიანობის სერიოზული შემცირების მიზეზი. უფრო კრიტიკულია მდგომარეობა საავიაციო და ენერგეტიკულ სექტორში, სადაც ასეთმა პროცესებმა შეიძლება გამოიწვიოს არა მხოლოდ ტექნიკური ზიანის მატება, არამედ ადამიანური უსაფრთხოების პირობების მნიშვნელოვანი გაუარესება. სწორედ აღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინებით გაიზარდა მოთხოვნა მეთოდების მიმართ, რომლებიც უზრუნველყოფს ჰაერსატარ სისტემების მონიტორინგს არაინვაზიური გზით, სისტემის მუშაობის შეჩერების გარეშე. ამ კონტექსტში ულტრაბგერითი მეთოდი გამოიკვეთა როგორც პერსპექტიული და ეფექტური მეთოდოლოგია [5, 6].

ულტრაბგერითი დიაგნოსტიკა ეფუძნება მაღალი სიხშირის ბგერითი ტალღების გამოყენებას, რომლებიც ვრცელდება ერთგვაროვან გარემოში შეფერხების გარეშე და აირეკლება შეუსაბამოებზე არაერთგვაროვანი ჩანართების სახით, როგორიცაა სხვა სიმკვრივის მცირე ზომის სხეულები. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა, დროულად იქნეს აღმოჩენილი როგორც სტრუქტურული დეფექტები, ასევე უცხო მყარი ნაწილაკები, რომლებიც შესაძლოა აკუმულირდეს სისტემის შიგნით. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ მოწყობილობებისთვის, რომლებიც მუდმივად ექვემდებარება აეროდინამიკურ, თერმულ ან ქიმიურ დატვირთვებს. ენერგეტიკულ სექტორში, მაგალითად გაზის ტურბინებში ან კომპრესორებში, მიკროსკოპულმა დაზიანებებამაც კი შეიძლება გამოიწვიოს ნაკადის სიმძლავრის კლება, წვის რეჟიმის დარღვევა ან საბოლოოდ ტურბინის დაზიანება [7]. ულტრაბგერითი მეთოდის საშუალებით კი შესაძლებელია რეალურ დროში სისტემის მუშაობაზე მონიტორინგი და შედეგად დადგინდეს, სად და რა სახის ცვლილებები მიმდინარეობს. აღნიშნული მიდგომა მნიშვნელოვნად ამცირებს არაგეგმიური გაჩერებების საჭიროებას და ზრდის სისტემის ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას. ავიაციის შემთხვევაში საკითხი კიდევ უფრო კომპლექსურია. თვითმფრინავის ძრავებში უცხო ნაწილაკების შეწოვამ, განსაკუთრებით ქვიშის ან სხვა წვრილი მყარი ნაწილაკების სახით, შეიძლება გამოიწვიოს ძრავის შიდა ელემენტების აბრაზიული ცვეთა. ეს პროცესი ხშირად შეუმჩნეველი რჩება ვიზუალური ინსპექტირების დროს. თუმცა ულტრაბგერითი სკანირებით შესაძლებელია განისაზღვროს ცვეთის ლოკაცია, სიღრმე და გავრცელების დინამიკა ასევე შესაძლებელია მოხდეს სისტემაში გამავალი უცხო ნაწილაკების იდენტიფიკაცია და მათი მასური ხარჯის განსაზღვრა. გარდა ამისა, ულტრაბგერითი მეთოდი გამოირჩევა ტექნოლოგიური მოქნილობით, ის არ საჭიროებს რთულ სამონტაჟო მოწყობილობებს. ეს ნიშნავს, რომ შესაძლებელია მათი ინტეგრირება უკვე არსებული სისტემების ზედაპირზე, როგორც ფიქსირებული, ისე პორტატული მოწყობილობების სახით. ამასთანავე, თანამედროვე ავტომატიზირებული ულტრაბგერითი მოწყობილობები აღჭურვილია მონაცემთა დამუშავების სისტემებით, ის რაც არა მხოლოდ მონაცემების შეგროვების საშუალებას იძლევა, არამედ მათზე რეაგირების ავტომატიზაციასაც. ამრიგად, ულტრაბგერითი მეთოდი დანერგვის საჭიროება არა მხოლოდ

ტექნიკური პრიორიტეტი, ასევე ეკონომიკური და უსაფრთხოების თვალსაზრისით აუცილებელი სტრატეგიაა. მაღალი სიზუსტით დაფიქსირებული პრობლემები საშუალებას იძლევა, ოპერატორებმა მიიღონ ინფორმირებული გადაწყვეტილებები სისტემის შეკეთებისა ან ექსპლუატაციის გაგრძელების თაობაზე, რაც საბოლოო ჯამში ზრდის ოპერაციულ საიმედოობას, ამცირებს ავარიული გაჩერებების რისკს და უზრუნველყოფს ადამიანური უსაფრთხოების მაღალ სტანდარტს [10, 11, 12].

ძირითადი ნაწილი

1. ულტრაბგერითი მეთოდის ფიზიკური პრინციპები და უპირატესობები

ულტრაბგერითი ტალღა არის მექანიკური ტალღა, რომლებიც ვრცელდება მატერიალურ გარემოში და მათი სიხშირე აღემატება ადამიანის სმენის ზღვარს (>20 kHz). განსხვავებით ელექტრომაგნიტური ტალღებისგან, ულტრაბგერითი ტალღების გავრცელებისთვის აუცილებელია მატერიის არსებობა, რადგან ისინი ეფუძნება მოლეკულებს შორის მექანიკური ბიძგების გადაცემას.

ტალღების გავრცელების მექანიზმი დამოკიდებულია გარემოს ელასტიკურობაზე, სიმკვრივეზე და სტრუქტურაზე. ტალღის სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

სადაც v – ტალღის სიჩქარე, E – გარემოს დრეკადობის (იუნგის) მოდული და ρ – გარემოს სიმკვრივე.

ულტრაბგერა ვრცელდება როგორც მყარ გარემოში ასევე სითხეებსა და აირებში. ტალღები იყოფა ორ კატეგორიად გრძივი და განივი. გრძივი ტალღა წარმოადგენს ისეთი ტიპის ელასტიურ ტალღას, რომელშიც გარემოს მოლეკულები გადაადგილდება ტალღის გავრცელების მიმართულების პარალელურად ხდება. ასეთ ტალღებში პერიოდულად წარმოქმნილია შეკუმშვის და განშლის ზონები, რაც ქმნის წნევის მერყეობას. გრძივი ტალღები გავრცელების უნარს ინარჩუნებს როგორც მყარ, ისე თხევად და აირად გარემოში, რაც მათ განსაკუთრებით ეფექტურს ხდის სამრეწველო და ბიოსამედიცინო გამოყენებებში.

ტალღის სიჩქარე გრძივი ტალღისთვის დამოკიდებულია გარემოს ელასტიკურობაზე და სიმკვრივეზე:

$$v_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (2)$$

სადაც K – მოცულობითი მოდულია (bulk modulus), G – შერობის მოდული (shear modulus) და ρ – გარემოს სიმკვრივე.

განივი ტალღა ისეთი ტიპის ტალღაა, რომელშიც გარემოს მოლეკულები ოსცილირებენ ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობულად. ეს ტალღები ვრცელდება მხოლოდ მყარ გარემოში. განივი ტალღის სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3)$$

განივი ტალღა უფრო მგრძნობიარეა მასალის შიდა დეფექტების მიმართ, განსაკუთრებით, წვრილი ბზარებისა და ძნელად აღმოსაჩენი შეღწევების შემთხვევაში.

პრაქტიკაში ურღვევი კონტროლის NDT სისტემებში ყველაზე გავრცელებული ფორმაა ულტრაბგერითი მეთოდი, ხოლო ზემოთ აღნიშნული მიზეზით, დეტალური დეტექტირებისათვის ხშირად განივი ტალღები გამოიყენება.

2. ულტრაბგერითი მეთოდის ეფექტურობა ნაწილაკების დეტექტირებაში

ულტრაბგერითი დეფექტოსკოპიის ეფექტურობის მთავარი ფაქტორი ტალღის სიგრძესა და უცხო სხეულის ზომას შორის დამოკიდებულებაა. ტალღის გაფანტვის ან შთანთქმის უნარი ნაწილაკზე დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად შეესაბამება ტალღის სიგრძე კონკრეტული სხეულის გეომეტრიულ პარამეტრებს. როგორც წესი, სისტემა მაღალი ეფექტურობით აფიქსირებს ისეთ მყარ ნაწილაკებს, რომელთა ზომა შედარებულია ან აღემატება ტალღის სიგრძის ნახევარს.

ტალღის სიგრძე, თავის მხრივ, დაკავშირებულია სიხშირესთან შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

სადაც λ — ტალღის სიგრძეა, v — ტალღის გავრცელების სიჩქარე კონკრეტულ გარემოში, ხოლო f — მისი სიხშირე. მაგალითად, ჰაერში, სადაც ტალღის სიჩქარე დაახლოებით 343 მ/წმ-ია, 40 კჰც სიხშირის ტალღის სიგრძე იქნება დაახლოებით 8.5 მმ. შესაბამისად, ასეთი პარამეტრებით, ულტრაბგერითი სენსორი ეფექტურად დააფიქსირებს ისეთ ნაწილაკებს, რომელთა ზომა 4–8 მმ-ზე მეტია. უფრო მაღალი სიხშირეების გამოყენება (მაგ. 500 კჰც – 1 მჰც) ტალღის სიგრძეს ამცირებს და შესაძლებელს ხდის მიკრონული ზომის ნაწილაკების დეტექტირებას, თუმცა ასეთ შემთხვევაში ტალღა ჰაერში უფრო ადვილად იბნევა და საჭირო ხდება სიგნალის მნიშვნელოვანი გაძლიერება ან უფრო მგრძნობიარე მიმღებების გამოყენება.

ეფექტურობა მცირდება, როდესაც ტალღის სიგრძე აღემატება დეტექტირებადი სხეულის ზომას. ასეთ შემთხვევაში ტალღა მარტივად „შემოუვლის“ სხეულს და არ ხდება არც აღქმადი შთანთქმა და არც გამოკვეთილი ანარეკლი. ამ ფაქტის ახსნა შესაძლებელია გაფანტვის თეორიით, კერძოდ Rayleigh-ს ან Mie-ის მოდელით, რომელიც აღწერს ტალღის ქცევას მცირე ზომის ნაწილაკებთან შეჯახებისას. მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ნაწილაკი ქმნის ტალღისთვის საკმარის შეფერხებას. ე.ი. ხდება ტალღის მნიშვნელოვან წილად არეკვლა ან შთანთქმა, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ შესაძლებელია ეფექტური დეტექტირება [3, 13, 14].

აღსანიშნავია, რომ ულტრაბგერითი სისტემა ასევე რეაგირებს ტალღის ფაზაში ან იმპულსის ხანგრძლივობაში მომხდარ მცირედ ცვლილებებზე, რაც საშუალებას იძლევა დეტექტირება მოხდეს ნაწილაკებზე, რომლებიც სრულად არც შთანთქმევენ და არც ირეკლავენ ტალღას. მაგალითად, თუკი ტალღა გადაადგილდება ნაწილაკის მახლობლად და ხდება მისი გაფანტვა, მიკროდეფორმაციები ან ფაზური ცვლილებები შეიძლება გაშიფრულ იქნას როგორც არაერთგვაროვანი გარემოს ინდიკატორი. თუმცა, ასეთი მეთოდები მოითხოვს მაღალგარჩევად და კომპლექსურ სიგნალზე დაფუძნებულ ანალიტიკურ ალგორითმებს.

მსგავსი მიდგომების გამოყენება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საავიაციო და ენერგეტიკულ სისტემებში, სადაც შესაძლოა ჰაერსატარ არხში მოხვდეს არა მხოლოდ მტვერი, არამედ მიკრონული ზომის ქვიშის, ვულკანური მტვრის, კლდოვანი ნამსხვრევების, ლითონის ნამსხვრევების ან სეტყვის ნაწილაკები. იმისათვის, რომ სისტემამ ეფექტურად იმუშაოს რეალურ გარემოში, მაღალი ტემპერატურით, ტურბულენტობითა და ხმაურით გამოწვეულ პირობებში, აუცილებელია ოპტიმალური ბალანსის პოვნა სიხშირეს, მგრძნობელობას და ტალღის გავრცელების დისტანციას შორის [1, 2, 4].

ამრიგად, სისტემა მაქსიმალურად ეფექტურია მაშინ, როდესაც, ტალღის სიგრძე სადარია ნაწილაკის ზომის ან ოდნავ ნაკლებია. გარემო პირობები არ შეუშლის ხელს ტალღის გავრცელებას, სიგნალის ანალიზის დროს გათვალისწინებული იქნება ფაზური და ამპლიტუდური ცვლილებები, რაც აუმჯობესებს სისტემის სიზუსტეს.

ეს კრიტერიუმები ქმნის ფიზიკურ ჩარჩოს იმისთვის, თუ როგორ უნდა იყოს დაპროექტებული და მორგებული ულტრაბგერითი სენსორები კონკრეტული გამოყენების სფეროებისთვის.

3. ჰაერსატარ სისტემებში უცხო ნაწილაკების რაოდენობის თეორიული შეფასება: მოდელი, გამოთვლები და პრაქტიკული მნიშვნელობა

3.1 ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება უცხო ნაწილაკების არსებობისას ჰაერსატარ სისტემებში

ჰაერსატარ სისტემების მუშაობისას ჰაერის სიმკვრივე წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პარამეტრს, რადგან იგი განსაზღვრავს ნაკადის დინამიკას, წნევის ვარდნას, ენერგომოხმარებას და მოწყობილობის ეფექტურობას. იდეალურ პირობებში, როცა ჰაერი გამჭვირვალეა და არ შეიცავს მყარ ნაწილაკებს, მისი სიმკვრივე სტანდარტული ატმოსფერული პირობების მიხედვით (25°C , 1 atm) შეადგენს დაახლოებით 1.184 კგ/მ^3 . თუმცა, როგორც კი გარემოში გაჩნდება უცხო მყარი ნაწილაკები (მტვერი, ქვიშა, მიკრო-მრავალკომპონენტური ფაზები), საშუალო სიმკვრივის შეფასებისას ჩნდება დამატებითი მათგან გამოწვეული დამატებითი წვლილი.

ეს ცვლილება განპირობებულია არა მხოლოდ ჰაერში დამატებითი მასის არსებობით, არამედ ამ მასის ზომით, განაწილებით და კონცენტრაციით. შედეგად, სისტემა რეალურად მუშაობს არა სუფთა ჰაერზე, არამედ ჰაერისა და ნაწილაკების ნარევიზე, ანუ მრავალფაზიან გარემოზე.

3.2 ჰაერში შერეული მყარი ნაწილაკების უარყოფითი გავლენა მექანიზმების მუშაობაზე

ჰაერსატარ არხებში უცხო მყარ ნაწილაკთა შეღწევა წარმოადგენს ტექნოლოგიურ გამოწვევას, განსაკუთრებით იმ თვალსაზრისით, თუ როგორ მოქმედებს ეს მექანიკური გავლენა სისტემის მთლიანობაზე. ერთ-ერთი პირველი და უმთავრესი შედეგი, რაც წარმოიშობა ასეთ შემთხვევაში, არის ზედაპირული დაზიანება, რომელიც ყველაზე ხშირად ვლინდება კონსტრუქციული მასალის დამცავი ფენების მთლიანობის დარღვევით.

დამცავი შრე, რომელიც სპეციალურად არის შექმნილი გარემოს აგრესიული ფაქტორებისგან კონსტრუქციის ძირითადი მასალის დასაცავად, მყარ ნაწილაკებთან შეჯახების შედეგად შესაძლოა მნიშვნელოვნად დაზიანდეს. აღნიშნული დაზიანებები ხშირად წარმოდგენილია მიკრობზარების,

ლოკალური ეროზიის ან ზედაპირული ჭრილობების სახით. მსგავსი მექანიკური დეფექტები ქმნის პირობებს, რომლებიც განსაკუთრებით ხელსაყრელია ქიმიური კოროზიული პროცესების გააქტიურებისთვის.

დამცავი შრის დაზიანების შემდგომ, ზედაპირი ხდება დაუცველი გარემოში არსებული აგრესიული ქიმიური კომპონენტების მიმართ. მაგალითად, ატმოსფერული პირობებიდან შემომავალი ტენიანობა, მარილოვანი ნაწილაკები, დამჟავებული წვეთები ან სხვა ქიმიურად აქტიური ნაერთები თავისუფლად აღწევენ ზედაპირზე და იწყებენ ლოკალურ კოროზიულ რეაქციებს. აღნიშნული პროცესი სწრაფად იწვევს ლითონის ზედაპირის ქიმიურ დეგრადაციას, რაც პოტენციურად იწვევს მიკრო სტრუქტურების დანგრევას, მექანიკური მდგრადობის შემცირებასა და გრძელვადიან პერსპექტივაში – სისტემური გაუმართაობის რისკს.

მიმდინარე კვლევები აჩვენებს, რომ ქიმიური კოროზიის გააქტიურება მჭიდროდ არის კავშირში არა მხოლოდ დაზიანების მასშტაბთან, არამედ იმ გარემოს ხასიათთანაც, სადაც სისტემა ფუნქციონირებს – მაღალი ტემპერატურა, ტენიანობა და წნევა აჩქარებს კოროზიულ მექანიზმებს. ამის გათვალისწინებით, მყარი ნაწილაკების დროული აღმოჩენა და მათი ზემოქმედების პროგნოზირება კრიტიკულად მნიშვნელოვანია სისტემის გამართულობის შენარჩუნებისთვის, რაც საბოლოოდ აისახება როგორც ფუნქციური უსაფრთხოების, ისე ეკონომიკური დანახარჯების მართვაში.

3.3 მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰაერის ნაკადის სიმკვრივის განსაზღვრა

მყარი ნაწილაკების შემცველი ჰაერის ნაკადის საშუალო სიმკვრივე შეიძლება განისაზღვროს შემდეგნაირად:

$$\rho_{\text{შერეული}} = \rho_{\text{ჰაერი}} + \varphi \cdot \rho_{\text{ნაწილაკები}} \quad (5)$$

სადაც $\rho_{\text{შერეული}}$ — მყარი ნაწილაკების შემცველი ჰაერის საშუალო სიმკვრივეა, $\rho_{\text{ჰაერი}}$ — სუფთა ჰაერის სიმკვრივე, $\rho_{\text{ნაწილაკები}}$ — ნაწილაკების სიმკვრივე (მაგ. კვარცისათვის $\rho_{\text{ნაწილაკები}} \sim 2600$ კგ/მ³) და φ — ნაწილაკების მოცულობითი წილი. მაგალითად, თუკი ჰაერში შერეული ნაწილაკების მოცულობითი წილი 0.5%-ია და მათი სიმკვრივე $\rho_{\text{ნაწილაკები}} = 2500$ კგ/მ³, მაშინ ჰაერის საშუალო სიმკვრივე გამოვა $\rho_{\text{შერეული}} = 1.184 + 0.005 \cdot 2500 = 13.684$ კგ/მ³. გამოვა, რომ სისტემა იმუშავებს ბევრად უფრო მკვრივ ინერციულ ნარევეზე, რაც მოითხოვს მეტ ენერგიას, ზრდის ტურბულენტობას, ნაწილების ზემოქმედებას და აჩქარებს მექანიკური ცვეთას.

ჰაერის სიმკვრივის ასეთი ცვლილებები პირდაპირ ზემოქმედებს ჰაერსატარ სისტემის მრავალ მახასიათებელზე:

- იცვლება დინამიკა და ნაკადის პროფილი – უფრო მკვრივი ნარევი განსხვავებულად გადაადგილდება მილებში ან ტურბინებში;
- იზრდება წნევის ვარდნა – საჭიროა მეტი ენერგია ნაკადის გასატარებლად;
- ზიანდება სენსორული სისტემები (მაგ. მასობრივი ნაკადის მრიცხველები) შეიძლება შეცდომით აღირიცხოს ნარევის პარამეტრები.

აქედან გამომდინარე, ჰაერსატარ სისტემებში სასურველია დამაგრებული იყოს სიმკვრივეზე მგრძნობიარე სენსორები, ან ულტრაბერით მეთოდზე დაფუძნებული ხელსაწყოები, რომლებიც

აღწერენ არაწრფივ ნაწილაკთა სტრუქტურას და აკონტროლებენ სიმკვრივის მატებას დროში. ასევე, შესაძლებელია ჰაერის განუწყვეტელი მონიტორინგი ავტომატიზებული ან ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ანალიზით, რომელიც წინასწარ აფიქსირებს, რომ ნარევის ჯამური მასა გადაცდა დასაშვებ ზღვარს.

ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება დაბინძურებული გარემოს პირობებში წარმოადგენს უპირატესად მნიშვნელოვან ფაქტორს ჰაერსატარ მოწყობილობათა მუშაობის უსაფრთხოებისა და რესურსების მართვის კუთხით. მასზე დაკვირვება არა მხოლოდ პრევენციული დიაგნოსტიკის საშუალებას იძლევა, არამედ ინჟინერს აძლევს ზუსტ, რაოდენობრივ სურათს სისტემის რეალური მდგომარეობის შესახებ. ულტრაბგერითი მეთოდები და შესაბამისი მოდელები ქმნიან იმ ტექნოლოგიურ საფუძველს, რომლის გამოყენებაც აუცილებელია თანამედროვე საავიაციო, ენერგეტიკულ და ინდუსტრიულ სექტორებში [6, 14].

4. ულტრაბგერის მეთოდზე დაფუძნებული მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰაერის საშუალო სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდოლოგია

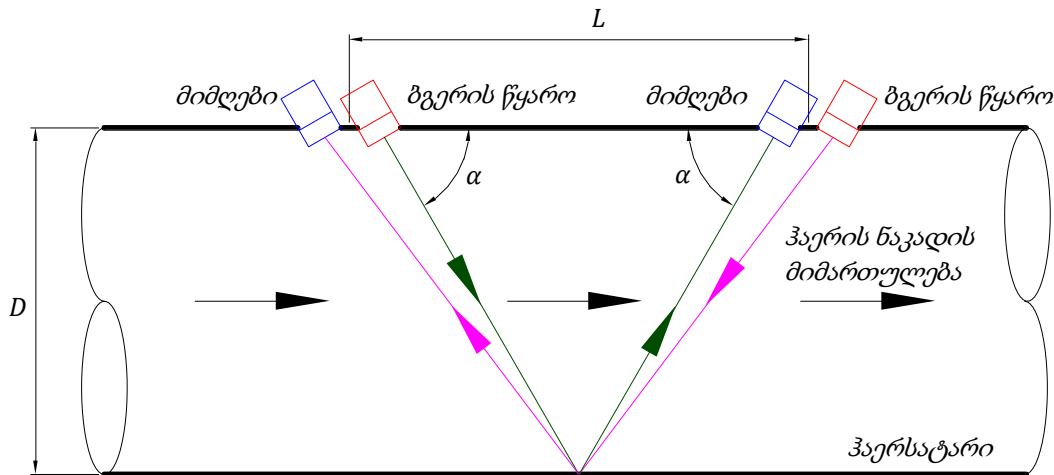
4.1 მეთოდის პრინციპი

წარმოდგენილი კვლევის ფარგლებში შემოთავაზებულია ულტრაბგერითი ტალღებზე დაფუძნებული სენსორული სისტემა, რომელიც განკუთვნილია ჰაერსატარ მილებში უცხო მყარი ნაწილაკების აღმოჩენისთვის. სისტემის ძირითადი ელემენტებია გამგზავნი (emitter) და მიმღები (receiver) პიეზოელექტრონული სენსორები, რომლებიც ერთმანეთის მიმართ გარკვეული კუთხით არიან განლაგებული კონსტრუქციაზე, ერთ მხარეს (სურ. 1) ან სხვადასხვა მხარეს (სურ. 2) ორივე მხარეს. ულტრაბგერითი ტალღა, რომელსაც უშვებს გამგზავნი, გადის ჰაერში და აღწევს მიმღებამდე მანამ, სანამ არ აღმოჩნდება ნაკადში ისეთი მყარი ნაწილაკი, რომელიც ტალღას ან გაფანტავს, ან ნაწილობრივ შთანთქავს. აღირიცხება როგორც ტალღის გაბნევის ინტენსიობა ასევე გავრცელების დრო.

ულტრაბგერითი სენსორები ტალღას აგზავნიან ჰაერის ნაკადში, რომელიც მოძრაობს მილში. თუ გარემო ჰომოგენურია და უცხო ნაწილაკებისგან თავისუფალი, ტალღა გავრცელდება წრფეზე მიმღებისკენ. ჰაერის ნაკადით გამოწვეული დროის სხვადასხვა მაჩვენებელი (ტალღის ვექტორის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ) გვაძლევს საშუალებას განვსაზღვროთ ნაკადის სიჩქარე. მყარ ნაწილაკთა არსებობა გავლენას ახდენს ტალღის გავრცელებაზე, განსაკუთრებით მიკრონაწილაკების შემთხვევაში, სადაც წარმოიშობა გაფანტვა, შთანთქმა ან რეფრაქცია [15, 16, 17].

4.2 მოწყობილობის კონფიგურაცია

პირველი ვარიანტის მიხედვით (სურ. 1), გადამწოდები უნდა განლაგდეს „V“ ფორმის სარკისებური ტრაექტორიის შესაბამისად, რაც უზრუნველყოფს მათი ერთ მხარეს განლაგების მაღალ ეფექტურობას. ამ დროს გეომეტრიული პარამეტრებია ტრანსდისერებს შორის ჰორიზონტალური დაშორება L და ჰაერსატარი მილის დიამეტრი D .



სურ. 1 ჰაერსატარი მილის ერთ მხარეს განლაგებული გადამწოდები

ტრანსდიუსერის სარეკომენდაციო მოდელია 400EP14D, რომელიც უზრუნველყოფს 6 dB (დეციბელი), 135° სხივის სიგანეს, რაც იძლევა ტალღის ფართო დაფარვის საშუალებას.

ჰაერის ნაკადის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ ტალღის გავრცელების დრო იანგარიშება (6) გამოსახულებებით

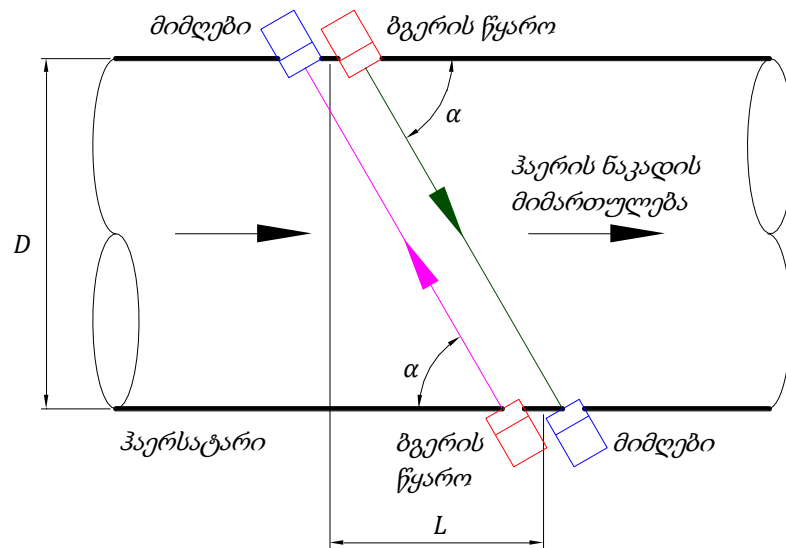
$$t_{\text{წინ}} = \frac{L}{c+v \cos \alpha} \text{ და } t_{\text{უკან}} = \frac{L}{c-v \cos \alpha} \quad (6)$$

საიდანაც ჰაერის ნაკადის სიჩქარე (v) და ბგერის სიჩქარე (c) გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{t_{\text{უკან}} - t_{\text{წინ}}}{t_{\text{წინ}} \cdot t_{\text{უკან}}} \text{ და } c = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_{\text{წინ}} + t_{\text{უკან}}}{t_{\text{წინ}} \cdot t_{\text{უკან}}} \quad (7)$$

სადაც L — ტრანსდიუსერებს შორის მანძილია, α — ტრანსდიუსერების დახრის კუთხე ჰაერის ნაკადის მიმართ, $t_{\text{წინ}}$ — დრო რომელიც სჭირდება ტალღას მოძრაობისთვის ნაკადის საწინააღმდეგოდ, $t_{\text{უკან}}$ — დრო რომელიც სჭირდება ტალღას მოძრაობისთვის ნაკადის მიმართულებით.

მეორე ვარიანტის მიხედვით (სურ. 2) გადამწოდები განლაგებულია კონსტრუქციის სხვადასხვა მხარეს. ნაკადის მიმართულებით და საწინააღმდეგოდ სიგნალის გავრცელების დროების განსაზღვრა იგივენაირად ხდება, როგორც პირველ შემთხვევაში, შესაბამისად, აქაც სამართლიანია (6) და (7) გამოსახულებები.



სურ. 2 ჰერმეტიკის მილის სხვადასხვა მხარეს განლაგებული გადამწოდები

ჰერმეტიკის არაერთგვაროვანი შერეული ნაკადების საშუალო მაჩვენებლების განსაზღვრისთვის რეკომენდებულია მინიმუმ ორი ურთიერთმართობულ სიბრტყეში განლაგებული სენსორული სისტემის დამონტაჟება. ასევე სანდო შედეგების მისაღებად უნდა მოხდეს მცირე დროით შუალედებში მრავალჯერადი გაზომვები და მიღებული შედეგების გასაშუალოება.

ნაწილაკებით შერეული ჰერმეტიკის ნაკადში გავრცელებული ულტრაბგერის სიჩქარის სიდიდის მიხედვით უკვე შესაძლებელი იქნება შერეული ნაკადის სიმკვრივის გაზომვაც, რომელიც ხდება შემდეგნაირად: ბგერის სიჩქარე ჰერმეტიკში განისაზღვრება ფორმულით:

$$c = \sqrt{\frac{K_{\text{ჰმ}}}{\rho_{\text{ჰმ}}}} \quad (8)$$

სადაც $K_{\text{ჰმ}}$ არის ნაწილაკებით შერეული ნაკადის ეფექტური მოცულობითი მოდული (Bulk Modulus). თუ ნაწილაკების კონცენტრაცია მცირეა მაშინ შეიძლება ის ჩავთვალოთ სუფთა ჰერმეტიკის შესაბამისი მნიშვნელობის ტოლად

$$K_{\text{ჰმ}} \approx K_{\text{ჰმჰმ}} = \gamma P \quad (9)$$

სადაც γ არის ჰერმეტიკის ადიაბატური მაჩვენებელი ($\gamma_{\text{ჰერმეტიკი}} = C_P/C_V \approx 1.4$), ხოლო P ჰერმეტიკის წნევა. (8) და (9) გამოსახულებებიდან მივიღებთ:

$$\rho_{\text{ჰმ}} \approx \frac{\gamma P}{c^2} \quad (10)$$

ხოლო ჰერმეტიკში შერეული ნაწილაკების მოცულობითი წილი (5) ფორმულიდან გამომდინარე იქნება:

$$\varphi \approx \frac{\gamma P / c^2 - \rho_{\text{ჰმ}}}{\rho_{\text{ჰმ}} \text{ (საშუალო)}} \quad (11)$$

ამრიგად, წარმოდგენილი მეთოდიკა იძლევა საშუალებას განისაზღვროს მყარი ნაწილაკებით შერეული ჰერმეტიკის საშუალო სიმკვრივე და ნაწილაკების მოცულობითი წილი.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევა აჩვენებს, რომ ჰაერსატარ სისტემებში უცხო მყარი ნაწილაკების არსებობა ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს, როგორც საავიაციო, ისე ენერგეტიკულ და ინდუსტრიულ დანადგარებში. აღნიშნული ნაწილაკები, მათი მცირე ზომის მიუხედავად, მოქმედებენ როგორც აბრაზიული ელემენტები, რომლებიც იწვევენ მექანიკური კომპონენტების ზედაპირის დაზიანებას, დამცავი შრეების დარღვევას და შემდგომ ქიმიური კოროზიის გააქტიურებას. შედეგად მცირდება სისტემის ენერგოეფექტურობა, იზრდება ხარჯი ტექნიკურ მომსახურებაზე და იქმნება ავარიული მწყობრიდან გამოსვლის საფრთხე. ამ ვითარების პრევენციისა და დროული დიაგნოსტიკის მიზნით, ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოდგება როგორც ერთ-ერთი პერსპექტიული და საიმედო მიდგომა. მისი მთავარი უპირატესობა მდგომარეობს არაინვაზიურ (ურღვევ) ხასიათში. მისი გამოყენებისას არ ხდება სისტემის გაჩერების ან დაშლის საჭიროება, რაც ოპერაციულად მნიშვნელოვან უპირატესობას წარმოადგენს თანამედროვე ტექნოლოგიურ პირობებში.

შესწავლილი მოდელის საფუძველზე დასტურდება, რომ ტალღის სიგრძის და ნაწილაკის ზომის შესაბამისობა წარმოადგენს კრიტიკულ ფაქტორს დეტექტირების სიზუსტისთვის. მაღალი სიხშირის (40–500 კჰც) ულტრაბგერითი ტალღები ეფექტურად აიდენტიფიცირებენ მიკრონული და მილიმეტრიანი ზომის ნაწილაკებს, რომლებიც ხშირად განსაზღვრავენ სისტემის საერთო დაბინძურების ხარისხს. ჩატარებული თეორიული ანალიზი ცხადყოფს, რომ ტალღის სიგრძის შემცირებასთან ერთად იზრდება გაფანტვის ეფექტურობა, თუმცა ამასთან ერთად მცირდება ტალღის გავრცელების მანძილი ჰაერში, რაც მოითხოვს სენსორების მგრძნობელობისა და გამაძლიერებელი სისტემების ოპტიმიზაციას.

მიღებული ფორმულარული დამოკიდებულებები საშუალებას იძლევა, შეფასდეს ჰაერში მყარი ნაწილაკების მოცულობითი წილი და მათ მიერ გამოწვეული სიმკვრივის ცვლილება. ეს პარამეტრი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ნაკადის დინამიკაზე, წნევის ვარდნაზე და სისტემის ენერგომოხმარებაზე. შესაბამისი სენსორული სქემის მეშვეობით შესაძლებელია რეალურ დროში ამ ცვლილებების კონტროლი და მონაცემთა ინტერპრეტაცია, რაც ინჟინერს აძლევს შესაძლებლობას დროულად შეაფასოს სისტემის დაბინძურების დონე.

კვლევის შედეგების პრაქტიკული დანერგვა მრავალმხრივ სარგებელს იძლევა. ერთი მხრივ, უზრუნველყოფილია სისტემის საიმედოობის და უსაფრთხოების ამაღლება, მეორე მხრივ კი, მცირდება ენერგომოხმარება და ტექნიკური მომსახურების სიხშირე. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მეთოდის გამოყენება საავიაციო ძრავებში, სადაც უცხო ნაწილაკების შეწოვამ შესაძლოა გამოიწვიოს ტურბინის ბალანსის დარღვევა ან ნიჩბების დეფორმაცია.

ამრიგად, შემოთავაზებული ულტრაბგერითი მეთოდი წარმოადგენს ეფექტურ, ეკონომიურად გამართლებულ და ეკოლოგიურად უსაფრთხო საშუალებას ჰაერსატარ სისტემების მონიტორინგისა და უცხო მყარი ნაწილაკების იდენტიფიკაციისათვის. მის საფუძველზე შესაძლებელია შეიქმნას ავტომატიზირებული დიაგნოსტიკური მოდულები, რომლებიც გაზრდიან ინდუსტრიული და

საავიაციო მოწყობილობების ექსპლუატაციის რესურსს, შეამცირებენ ავარიული შემთხვევების ალბათობას და უზრუნველყოფენ ოპტიმალურ მუშაობას რეალურ გარემოში.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტიანი მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Molaie, Saeed, et al. 2021. "Review of the Newly Developed, Mobile Optical Sensors for Real-Time Measurement of the Atmospheric Particulate Matter Concentration." *Sensors (Basel)* 21, no. 6: 1–25. <https://doi.org/10.3390/s21062236>;
2. Sánchez-Barajas, Martín Aarón, Daniel Cuevas-González, Marco A. Reyna, Juan C. Delgado-Torres, Eladio Altamira-Colado, and Roberto López-Avitia. 2023. "Development of a Low-Cost Particulate Matter Optical Sensor for Real-Time Monitoring." *Engineering Proceedings* 58, no. 1 (41): 1–6. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-14521>;
3. Zhang, Y., et al. 2025. "Direct Measurement Techniques for Atmospheric Aerosol: A 20-Year Review." *Atmospheric Environment* (in press);
4. Höpner, F., et al. 2019. "Investigation of Two Optical Methods for Aerosol-Type Identification." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124 (4): 2080–2095;
5. Moon, C. Y., et al. 2021. *Particle Sensing in Gas Turbine Inlets Using Optical Measurements and Machine Learning*. PhD Thesis / Technical Report. Virginia Tech;
6. Massabò, D., et al. 2021. "An Overview of Optical and Thermal Methods for Carbonaceous Aerosol Characterization." *Atmosphere* 12 (3): 316–333;
7. United States Patent Application US 20090029870 A1. "Particle Analyzing Systems and Methods Using Acoustic Resonance and Flow Measurement." Filed January 29, 2009;
8. Wang, S., et al. 2023. "Review of Ultrasonic Particle Manipulation Techniques." *Micromachines* 14 (7): 1376. <https://doi.org/10.3390/mi14071376>;
9. Tiitta, M., et al. 2020. "Air-Coupled Ultrasound Detection of Natural Defects in Wood Using Ferroelectret and Piezoelectric Sensors." *Wood Science and Technology* 54: 1471–1487;
10. Lv, N., et al. 2025. "Exploring the Progress and Challenges of Ultrasonic Technology in Environmental Remediation." *Ultrasonics Sonochemistry* 106 (105917): 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.105917>;
11. Virginia Tech / ASME Group. 2023. "Virginia Tech Optical Inlet Sensor for Particle Detection." *ASME Turbo Expo: Gas Turbine Technology Conference Proceedings*;
12. Boyce, Meherwan P., ed. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 2nd ed. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 2006;
13. Moon, C. Y., et al. 2020. "Particle Sensing in Gas Turbine Inlets: Optical + Machine-Learning Approaches." *Proceedings of ASME Turbo Expo 2020*,

14. Wang, Y., et al. 2023. "Current Status of Detection Technologies for Indoor Particulate Matter: Performance Evaluation and Environmental Influences." *Aerosol and Air Quality Research* 23 (9): 1–24;
15. ResearchGate Conference Paper. 2024. "A Laser Imaging Technique for Measuring Particle Distribution at a Gas Turbine Engine Inlet." *Proceedings of the 14th International Symposium on Laser Diagnostics in Combustion*;
16. Experimental Studies on Low-Cost Ultrasonic Sensors for Distance and Presence Measurement. Examples Based on HC-SR04 Modules. *IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*, 2022;
17. Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. 1983. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons.

An Improved Model for Detection and Quantification of Solid Particles in Air Duct Systems Using the Ultrasonic Method

Bidzina Abesadze¹, Giorgi Taqadze²

¹ Georgian Aviation University, 16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

² Alte University, 2 University Street, 0177 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The present study addresses the issue of foreign solid particles in air duct systems and proposes an enhanced ultrasonic-based method for their detection and quantitative evaluation. The reliability and efficiency of modern industrial and aviation systems largely depend on the cleanliness and stability of the air flow. Dust, sand, ash, or metallic microparticles entering the system from the external environment can cause abrasive wear, surface erosion, and deformation of turbines and compressors. These effects reduce the energy efficiency of the equipment and increase the risk of critical failures. Therefore, there is a pressing need for a non-invasive technique capable of detecting and quantifying solid particles within air ducts in real time, without interrupting system operation.*

Within the scope of this research, an ultrasonic sensing system is proposed, employing a pair of transmitting and receiving transducers. The acoustic wave propagated between them responds to inhomogeneities in the medium and to the presence of foreign particles, resulting in scattering, absorption, or phase shifts. The operating principle of the system is based on analyzing the variations in wave propagation time and amplitude, which enables the determination of particle size and concentration. Theoretical models are presented to describe the interrelation between the ultrasonic propagation velocity, wavelength, and medium density, as well as scattering effects based on Rayleigh and Mie theories.

The obtained results confirm that the ultrasonic method is an effective, economical, and environmentally safe approach for monitoring the condition of air duct systems. Implementation of the proposed model can significantly improve system reliability and operational lifespan in both aviation and energy industries.

Keywords: *Ultrasound, air duct system, solid particles, sensor diagnostics, acoustic monitoring.*

სიმეტრიული ფრთის პროფილის კონტურის განსაზღვრის თეორიული მოდელი წინააღმდეგობის მინიმიზაციის მიზნით

ბიძინა აბესაძე¹, საბა კოპალიანი², ლიზი უბილავა³

^{1, 2, 3} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია ფრთის სიმეტრიული პროფილის კონტურის განსაზღვრის ახალი მეთოდიკა, რომელიც ეფუძნება უმცირესი ქმედების პრინციპსა და ვარიაციული კალკულუსის გამოყენებას. შემოთავაზებული მათემატიკური მოდელის მიზანია წინააღმდეგობის ძალის მინიმიზაცია და გეომეტრიულ-ფიზიკური სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილება. წარმოდგენილი თეორიული ანალიზი მნიშვნელოვანი ნაბიჯია საჰაერო აპარატების აეროდინამიკური ზედაპირების კონსტრუირების მიმართულებით, რადგან არსებობს რიგი პრობლემები, ჰაერის ნაკადის მცირე რეინოლდსის რიცხვებზე მოქმედებისას. აღნიშნული მოდელი იძლევა შესაძლებლობას შეფასდეს ფრთის პროფილის ფორმისა და დინამიკური პარამეტრების გავლენა საერთო აეროდინამიკურ წინააღმდეგობაზე. გარდა ამისა, ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ სიმეტრიული პროფილის შემთხვევაში ნულოვანი შეტევის კუთხისას მინიმალური წინააღმდეგობის მიღწევა მხოლოდ თეორიული გზით შეუძლებელია, რაც მიუთითებს უფრო კომპლექსური, ასიმეტრიული პროფილების შემდგომი კვლევის აუცილებლობაზე. მიღებული შედეგები წარმოადგენს საფუძველს გაუმჯობესებული პროფილის ოპტიმიზაციისა და ფრთის ფორმის მოდიფიკაციის მეთოდების შემუშავებისთვის.

საკვანძო სიტყვები: აეროდინამიკა, ფრთის პროფილი, წინააღმდეგობის მინიმიზაცია, ვარიაციული კალკულუსი, უმცირესი ქმედების პრინციპი, ლაგრანჟის განტოლება, ოპტიმიზაცია, ნაკადის სეპარაცია.

შესავალი

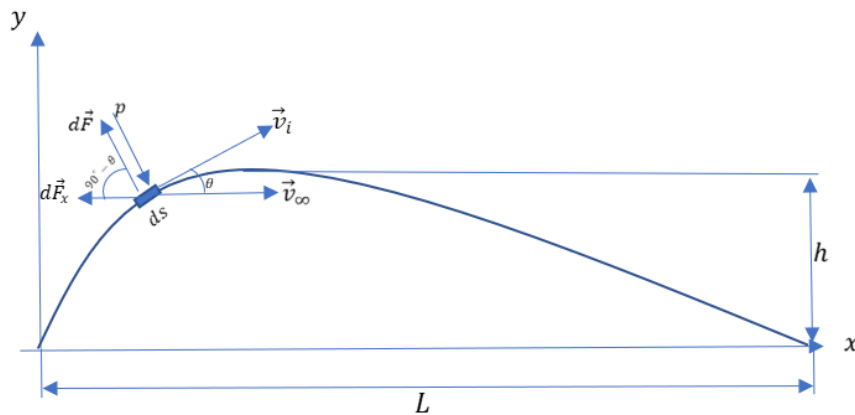
თანამედროვე ავიაკაციაში ფრთის პროფილის ფორმის ოპტიმიზაცია ერთ-ერთ უმთავრეს ამოცანად რჩება როგორც აეროდინამიკური, ისე ენერგოეფექტურობის თვალსაზრისით. ფრენის ეკონომიურობა, საწვავის მოხმარება და მანევრულობის შესაძლებლობები პირდაპირ დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენადაა ფრთის გეომეტრია მორგებული ჰაერის ნაკადის მახასიათებლებსა და რეინოლდსის რიცხვის დიაპაზონზე. ამიტომაც, ფრთის კონტურის განსაზღვრის პრობლემა არა მხოლოდ თეორიული მნიშვნელობისაა, არამედ პრაქტიკულად მნიშვნელოვან როლს ასრულებს საჰაერო ხომალდების დიზაინსა და საინჟინრო პროექტირების პროცესში.

აეროდინამიკური პროფილების ანალიზისა და ოპტიმიზაციის მიმართულებით მრავალი მეთოდი შემუშავდა, რომელთა შორის განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს მათემატიკურ

მოდელირებასა და ვარიაციული ანალიზის საფუძველზე აგებულ მოდელებს. ამგვარი მიდგომა იძლევა შესაძლებლობას დინამიკური და გეომეტრიული ფაქტორების ურთიერთკავშირი განისაზღვროს ზუსტად, რაც საჭიროა ფრთის ზედაპირის ფორმის ისეთი არჩევისთვის, რომელიც უზრუნველყოფს მინიმალურ წინააღმდეგობასა და სტაბილურ ნაკადს სხვადასხვა ფრენის რეჟიმებში.

ძირითადი ნაწილი

ნაშრომის პრობლემატიკა გულისხმობს ფრთის პროფილის იმგვარი კონტურის პოვნას, რომელიც, გარდა აუცილებელი მოთხოვნებისა, დააკმაყოფილებს უმცირესი წინააღმდეგობის ძალის შექმნის პირობას.



სურ. 1. ფრთის პროფილზე მოქმედი ძალები

სურ. 1-ის მიხედვით: dF არის რეაქციის ძალა, p - სტატიკური წნევა, ds - კონტურის ელემენტარული ნაწილი, dF_x - შუბლა წინააღმდეგობის ძალა, v_i - მხები სიჩქარე, v_∞ - თავისუფალი ნაკადის სიჩქარე, θ - კუთხე მხებ სიჩქარეს და თავისუფალი ნაკადის სიჩქარეს შორის, L - ფრთის პროფილის სიგრძე, h - მაქსიმალური სიმაღლე.

ფრთის პროფილზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა შეიძლება წარმოადგეს სამი შესაკრების სახით:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{სტატიკური}} + \vec{F}_{\text{დინამიკური}} + \vec{F}_{\text{ხახუნის}} \quad (1)$$

სადაც სტატიკური დატვირთვა გამოწვეულია სტატიკური წნევით, ის მოქმედებს კონტურის მართობულად. შემდგომში აღებულია მისი ჰორიზონტალური მდგენელი.

$$dF_{\text{სტატიკური}} = p ds \cos(90^\circ - \theta) = p ds \sin \theta = p b dl \sin \theta \quad (2)$$

სადაც $ds = bdl$ ფრთის ზედაპირის ფართის ელემენტი, $dl = \sqrt{1 + (y')^2} dx$ - კონტურის ელემენტის სიგრძე, ხოლო b - ფრთის სიგრძე.

მოცემულ შემთხვევაში ბერნულის განტოლება გამარტივდება რადგან, ფრთის პროფილის სიგანის სიმცირის გამო, შეიძლება იგულისხმებოდეს, რომ $h_1 = h_2$, შედეგად მივიღებთ [1, 2, 3]:

$$P + \frac{1}{2} \rho v_i^2 = P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \Rightarrow P = P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 - \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (3)$$

ნაკადის უწყვეტობის პირობიდან გვექნება:

$$\frac{dl}{v_i} = \frac{dl \cos \theta}{v_\infty} \Rightarrow v_i = \frac{v_\infty}{\cos \theta} \quad (4)$$

ფუნქციის წარმოებულის გეომეტრიული შინაარსიდან გამომდინარე:

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} = y' \quad (5)$$

ხოლო

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \theta)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (y')^2}} \text{ და } \sin \theta = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + (\tan \theta)^2}} = \frac{y'}{\sqrt{1 + (y')^2}} \quad (6)$$

(4), (5) და (6)-ის გათვალისწინებით (3) გამოსახულება მიიღებს სახეს:

$$P = P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 (y')^2 \quad (7)$$

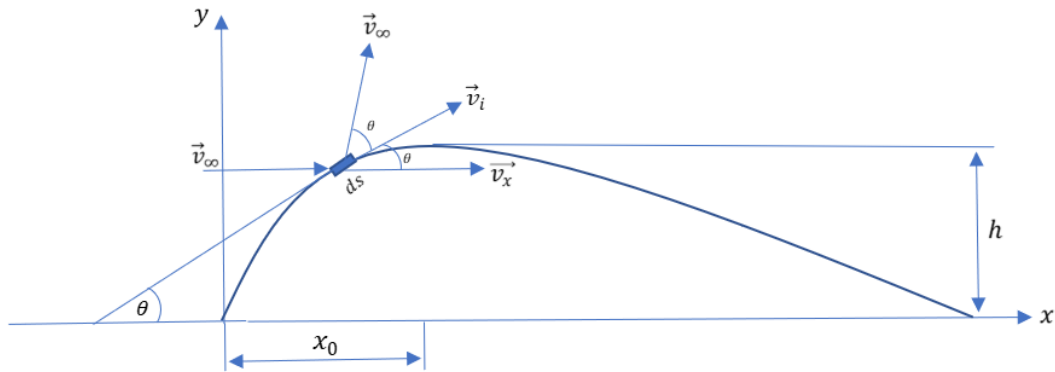
ამავდროულად, სტატიკური დატვირთვით გამოწვეული წინაღობის ძალის ელემენტი (2)-ის მიხედვით

$$dF_{\text{სტატიკური}} = b \left(P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 (y')^2 \right) \frac{y' \cdot \sqrt{1 + (y')^2}}{\sqrt{1 + (y')^2}} dx = b (P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 (y')^2) y' dx \quad (8)$$

ხოლო სტატიკური კომპონენტით გამოწვეული სრული წინაღობის ძალა

$$F_{\text{სტატიკური}} = \int_0^L b (P_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 (y')^2) y' dx \quad (9)$$

მოდრავი ჰაერის ნაკადის დინამიკური დაწნეხვის შედეგად წარმოქმნილი წნევის ძალა ქმნის დამატებით წინაღობას. ამ ძალის წარმოქმნის მექანიზმი შეიძლება აღიწეროს შემდეგნაირად: ჰაერის ნაკადი განიცდის ფრთის ზედაპირიდან არეკვლას (იხ. სურ. 2), შედეგად იცვლება ჰაერის იმპულსის მიმართულება, რაც გამოიხატება რეაქციის ძალის წარმოქმნაში. რაოდენობრივი შეფასებისთვის უნდა დაიწეროს აღნიშნული იმპულსის ცვლილება ჰორიზონტალური x ღერძის მიმართ [4, 5, 11].



სურ. 2. ფრთის პროფილზე მოქმედი დინამიკური ძალა

ჰაერის ნაკადის სიჩქარის მდგენელი ზედაპირიდან არეკვლის შემდეგ იქნება $v_x = v_\infty \cos(2\theta)$, ხოლო სიჩქარის ცვლილება $\Delta v_x = v_\infty - v_x = v_\infty(1 - \cos(2\theta)) = v_\infty \cdot 2(\sin\theta)^2 = \frac{2v_\infty(y')^2}{1+(y')^2}$. რაც შეეხება ჰაერის ნაკადის მასას, ის შეიძლება შეფასდეს შემდეგნაირად: განვიხილოთ ფრთის კონტურის განსახილველ წერტილის მახლობლად მართკუთხა განივკვეთის მქონე ვიწრო ზოლი, რომლის ფართობი იქნება $\Delta S = b \cdot \Delta y = b \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \Delta x$, მაშინ ზღვარზე გადასვლისას $dS = b \cdot y' \cdot dx$. ამ ზოლში გამავალი ჰაერის ნაკადის მასა იქნება $\Delta m = \rho \Delta V = \rho \cdot \Delta S \cdot v_\infty \cdot \Delta t$, ხოლო იმპულსის ცვლილება $\Delta p = \Delta m \cdot \Delta v_x$. ამ ყოველივეს გათვალისწინებით კონტურის მოცემულ წერტილზე მოქმედი ელემენტარული რეაქციის ძალის ჰორიზონტალური მდგენელი, რომელიც სიდიდით წინააღობის ძალის ტოლია, იქნება:

$$dF_{\text{ჰორიზონტალური}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot b \cdot (y')^3}{1+(y')^2} dx \quad (10)$$

მაშინ, სრული წინააღობის ძალის დინამიკური კომპონენტია:

$$F_{\text{ჰორიზონტალური}} = \int_0^{x_0} \frac{2 \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot b \cdot (y')^3}{1+(y')^2} dx = \int_0^L \frac{2 \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot b \cdot (y')^3}{1+(y')^2} \theta(x_0 - x) dx \quad (11)$$

სადაც $\theta(x_0 - x)$ ჰევისაიდის ფუნქციაა.

(1) გამოსახულების მესამე შესაკრები გამოწვეულია ჰაერის ნაკადის ფრთის ზედაპირთან ხახუნის შედეგად წარმოქმნილი ძალის (მოქმედებს ზედაპირის მხეხი მიმართულებით) ჰორიზონტალურ ღერძთან მდგენელების აჯამებით [6, 8, 10, 13]. ჰაერის ნაკადის დაბალ სიჩქარეზე ლამინარული დინების შემთხვევაში შესაძლოა სასაზღვრო ფენების მიხედვით ხახუნი გათვალისწინებული იქნას, უფრო გამარტივებული სახით, რაც გულისხმობს, რომ მისი სიდიდე სიჩქარის პროპორციულია. ხახუნის ძალის ელემენტარული მნიშვნელობა $d\tau = \mu v dS$, სადაც $v = v_\infty \sqrt{1 + (y')^2}$, $dS = b dl = b \sqrt{1 + (y')^2} dx$, ხოლო μ ხახუნის კოეფიციენტი. ამ ძალის ჰორიზონტალური მდგენელი $dF_{\text{ჰორიზონტალური}} = d\tau \cdot \cos(\theta) = \frac{d\tau}{\sqrt{1+(y')^2}}$, სრული ძალისთვის იქნება:

$$F_{\text{ხახუნის}} = \int_0^L \mu v_{\infty} b \sqrt{1 + (y')^2} dx \quad (12)$$

აღსანიშნავია, რომ ხახუნის კოეფიციენტის განსაზღვრა მოითხოვს, მაღალი სიზუსტით ნატურალური ექსპერიმენტების ჩატარებას, რაც წარმოდგენილი კვლევის ფარგლებში ვერ მოხერხდა. ამიტომ გამარტივების მიზნით ნაგულისხმევია იდეალურად გლუვი ზედაპირის შემთხვევა, რომლის დროსაც ხახუნის კოეფიციენტი $\mu = 0$. შემდგომი გამოთვლები წარმოებს 1 ფორმულის მესამე შესაკრების გარეშე, რაც საბოლოოდ მიიღებს სახეს:

$$F_x = \int_0^L \left[b \left(P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 (y')^2 \right) y' + \frac{2 \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2 \cdot b \cdot (y')^3}{1 + (y')^2} \theta (x_0 - x) \right] dx \quad (12)$$

ზემოთ მოყვანილი მაგალითის ამოხსნის ანალოგიურად, F_x -ის სიდიდე ქმედების ანალოგიურია და განსახილველი ამოცანაც სწორედ მის მინიმიზაციას ეხება. ანუ უნდა შეირჩეს ისეთი $y(x)$ კონტური, რომელიც (12) გამოსახულებას მინიმუმს მინიშნელობას. ამოხსნის მეთოდიკა გულისხმობს, რომ წინააღობის ძალის გამომსახველი სიდიდის ვარიაცია იყოს 0-ის ტოლი:

$$\delta F_x = 0 \quad (13)$$

სადაც ლაგრანჟიანის როლში (12)-ის ინტეგრალქვეშა გამოსახულებაა:

$$\mathcal{L}(x; y; y') = b \left(P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 (y')^2 \right) y' + \frac{2 \cdot \rho \cdot v_{\infty}^2 \cdot b \cdot (y')^3}{1 + (y')^2} \theta (x_0 - x) \quad (14)$$

აღსანიშნავია, რომ (14) გამოსახულება ცხადი სახით არ შეიცავს $y(x)$ ფუნქციას, რის გამოც ლაგრანჟის განტოლება (3) მიიღებს გამარტივებულ სახეს [6]:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y'} \right) = 0 \quad (15)$$

რომელიც უნდა ამოიხსნას შემდეგი სასაზღვრო პირობების მიხედვით:

$$y(0) \text{ და } y(L) = 0 \quad (16)$$

მიღებული გამოსახულებების სირთულის გამო აქ მოყვანილია მხოლოდ შედეგები. აღსანიშნავია, რომ გამოთვლები განხორციელდა კომპიუტერული პროგრამა „Maple“-ის გამოყენებით. (15)-ის ზოგადი ამონახსნი, მიუხედავად განუსაზღვრელ კოეფიციენტზე დამოკიდებული გამოსახულების სირთულისა, საბოლოო ჯამში დაიყვანება წრფის ფუნქციაზე

$$y(x) = Ax + B \quad (17)$$

ხოლო (16) სასაზღვრო პირობების გამოყენებით მიიღება მარტივი ტრივიალური ფორმა:

$$y(x) = 0 \quad (18)$$

რაც ნიშნავს, რომ ფრთის პროფილის ფორმა უნდა იყოს ჰორიზონტალური წრფის მონაკვეთი. ეს შედეგი გარკვეულწილად მოსალოდნელი იყო, რადგან მათემატიკური თვალსაზრისით მხოლოდ სწორი ხაზის (ან ბრტყელი ფურცელი) ფორმის პროფილს ექნება მინიმალური წინაღობა.

პრაქტიკული თვალსაზრისით ეს შედეგი გამოუსადეგარია. ჩნდება გარკვეული ხელოვნური ჩარევის საჭიროება, რაც ფრთის პროფილის კონტურის მახასიათებელ სპეციფიკას თავიდანვე გაითვალისწინებს. ეს გამოწვეულია იმით, რომ (15) სახით მოცემული გამოსახულება არის მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლება, რომლის ამოხსნის შედეგად ჩნდება ორი განუსაზღვრელი კოეფიციენტი. ისინი მხოლოდ საკმარისია (17) წრფის პარამეტრების განსაზღვრისთვის, თანამედროვე საფრენ აპარატებში გამოყენებული კონტურის ფორმა კი გაცილებით რთულია და შეიცავს გარკვეულ დათქმებს, რომლებიც აუცილებლად უნდა იყოს გათვალისწინებული, კერძოდ: ბგერამდელი სიჩქარეებისთვის გამოყენებულ პროფილებს აქვთ მომრგვალებული თავი (წვეთის ფორმა), წვეროდან რაიმე x_0 მანძილზე შესაბამისი სიგანის მაქსიმუმი და დაცულია წირის გლუვობა. ეს მათემატიკურად გამოსახება შემდეგნაირად:

$$y'(0) = \infty, y(x_0) = h \text{ და } y'(x_0) = 0 \quad (19)$$

ცხადია ამ დამატებითი პირობების გათვალისწინება მხოლოდ ორი დამოუკიდებელი კოეფიციენტის ფორმით ვერ მოხდება, ამიტომ კვლევის ფარგლებში შემუშავდა ახალი მიდგომა, რაც წარმოდგენილ მოთხოვნებს დააკმაყოფილებს.

(19) დამოკიდებულებებით განსაზღვრული და ასევე სასაზღვრო პირობების ავტომატურად შესრულება, იძლევა მნიშვნელოვან შესაძლებლობას მოხდეს ფრთის პროფილის განმსაზღვრელი ფუნქციის მოდერნიზება ისე, რომ მამრავლის სახით გაჩნდეს უცნობი ფუნქცია, რომლის ფორმა განისაზღვროს (15) ლაგრანჟის განტოლებიდან გამომდინარე, რაც საბოლოო ჯამში პროფილის კონტურის დახვეწას გამოიწვევს. წინააღობის ძალის მინიმუმის პირობიდან გამომდინარე, კერძოდ ეს ფორმა შეიძლება წარმოდგეს შემდეგი სახით:

$$y(x) = x \cdot \ln(x) \cdot \varphi(x) \quad (20)$$

მიუხედავად ამდაგვარი მცდელობისა, ლაგრანჟის განტოლების ამონახსნი მაინც დაიყვანება წრფივი ფუნქციის (17) სახეზე, ანუ მეთოდს რაიმე სახის გაუმჯობესება არ მოუცია.

აღნიშნული შედეგი გამოწვეულია იმით, რომ საწყის ამოცანად აღებულია სიმეტრიული ფრთის პროფილის კონტურის განსაზღვრა წინააღობის ძალის მინიმიზაციის გზით. მიუხედავად ხელოვნური ჩარევისა, საბოლოო შედეგი მაინც ტრივიალური ფორმისაა, რაც ლოგიკურად მოსალოდნელი იყო. უფრო საინტერესო სურათის მიღების მოლოდინი ჩნდება ასიმეტრიული პროფილების განხილვისას, როცა მინიმალურ წინააღობის ძალის მოთხოვნასთან ერთად ჩნდება მაქსიმალური ამწევი ძალის მიღების საჭიროება, რაც საერთო სურათს ართულებს. ასეთ შემთხვევაში ფრთის კონტური არატრივიალური ფორმის გამოჩნდება. აღნიშნული საკითხი შემდგომი კვლევის საგანია.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ სიმეტრიული ფრთის პროფილის კონტურის განსაზღვრა მხოლოდ ვარიაციული მეთოდითა და ლაგრანჟის განტოლების ამოხსნით ვერ იძლევა პრაქტიკულად გამოსადეგ ფორმას, რადგან მიღებული შედეგი ტრივიალურია და ემთხვევა ჰორიზონტალურ წრფეს. ეს ნიშნავს, რომ რეალური აეროდინამიკური პირობების გათვალისწინებით, მხოლოდ თეორიული მინიმიზაციის საფუძველზე მიღებული კონტური ვერ უზრუნველყოფს ეფექტურ ნაკადს და მინიმალურ წინააღმდეგობას. აღნიშნული ფაქტი ადასტურებს, რომ სიმეტრიული პროფილის შემთხვევაში ნულოვანი შეტევის კუთხეზე საჭირო ხდება დამატებითი გეომეტრიული ან ფიზიკური შეზღუდვების შემოღება, რომლებიც გაითვალისწინებენ ფრთის კონტურის ბუნებრივ ფორმას, ნაკადის გამრუდებას და სეპარაციის თავიდან აცილების პირობებს.

ამავე დროს, ნაშრომში წარმოდგენილი მიდგომა ქმნის მყარ თეორიულ საფუძველს შემდგომი კვლევებისთვის. განსაკუთრებით საინტერესოა მეთოდის გამოყენება ასიმეტრიული პროფილებისთვის, სადაც შეტევის კუთხის არანულოვან მნიშვნელობებზე მოსალოდნელია არატრივიალური შედეგები და ეფექტური ფორმის მიღება. მიღებული დასკვნები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც საწყისი მოდელი ფრთის კონსტრუქციული ოპტიმიზაციის, სასრულ ელემენტთა მეთოდით სიმულაციებისა და ექსპერიმენტული ტესტირების ერთობლივი სისტემის შესაქმნელად, რაც საბოლოო ჯამში ხელს შეუწყობს ენერგოეფექტურ და დაბალწინააღმდეგობის საჰაერო აპარატების განვითარებას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Anderson, John D. Jr. 2016. Fundamentals of Aerodynamics. 6th ed. New York: McGrawHill;
2. Anderson, John D. Jr. 2001. A History of Aerodynamics and Its Impact on Flying Machines. Cambridge: Cambridge University Press;
3. Von Kármán, Theodore. 2004. Aerodynamics: Selected Topics in the Light of Their Historical Development. New York: Dover Publications;
4. Von Kármán, Theodore and M. A. Biot. 1950. Mathematical Methods in Engineering: An Introduction to the Mathematical Treatment of Engineering Problems. New York: McGrawHill;
5. Von Kármán, Theodore and M. A. Biot. 1958. General Aerodynamic Theory. 2 vols. Berlin: Julius Springer;
6. Vincenti, Walter G. 1990. What Engineers Know and How They Know It: Analytical Studies from Aeronautical History. Baltimore: Johns Hopkins University Press;
7. Bradshaw, Peter. 1964. Experimental Fluid Mechanics. Oxford: Pergamon Press;
8. Bradshaw, Peter. 1971. An Introduction to Turbulence and Its Measurement. Oxford: Pergamon Press;
9. Bradshaw, Peter, T. Cebeci, and J. H. Whitelaw. 1977. Momentum Transfer in Boundary Layers. New York: Hemisphere Publishing;
10. Bradshaw, Peter, T. Cebeci, and J. H. Whitelaw. 1981. Engineering Calculation Methods for Turbulent Flows. London: Academic Press;

11. Küchemann, Dietrich. 1963. Aerodynamics of Propulsion. New York: McGrawHill;
12. Küchemann, Dietrich. 1978. The Aerodynamic Design of Aircraft. Oxford: Pergamon Press;
13. Hoerner, Sighard F. 1951. Aerodynamic Drag. Dayton: Otterbein Press;
14. Hoerner, Sighard F. 1965. FluidDynamic Drag. Bricktown, NJ: Hoerner Fluid Dynamics;
15. Hoerner, Sighard F., and Henry V. Borst. 1975. FluidDynamic Lift. Bricktown, NJ: Hoerner Fluid Dynamics;
16. Wood, Karl Dawson. 1930 (rev. 1950). Airplane Design and Technical Aerodynamics. Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall;
17. Wood, Karl Dawson. 1940 (rev. 1955). Technical Aerodynamics. New York: PrenticeHall;
18. Katz, Joseph, and Allen Plotkin. 2001. LowSpeed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods. New York: McGrawHill;
19. Hoerner, Sighard F. 1945. FluidDynamic Lift. Bricktown, NJ: Hoerner Fluid Dynamics;
20. Marchman, James F. III. 2004. Aerodynamics and Aircraft Performance. Blacksburg, VA: Virginia Tech Libraries.

Theoretical Model for Determining the Contour of a Symmetrical Wing Profile for Drag Minimization

Bidzina Abesadze¹, Saba Kopaliani², Lizi Ubilava³

^{1, 2, 3}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This paper presents a new methodology for determining the contour of a symmetrical wing profile based on the principle of least action and the application of variational calculus. The proposed mathematical model aims to minimize aerodynamic drag while satisfying geometric and physical boundary conditions. The theoretical analysis represents a significant step toward the design and optimization of aerodynamic surfaces in aircraft structures, as various issues arise when operating at low Reynolds numbers. The developed model enables the evaluation of the relationship between the wing profile geometry, flow characteristics, and the resulting aerodynamic resistance. Furthermore, it is demonstrated that for a symmetrical profile at zero angle of attack, achieving minimum drag purely by theoretical means is impossible, indicating the necessity of further investigation into more complex, asymmetrical airfoils. The obtained results provide a foundation for the development of improved optimization and modification methods for wing contour design.*

Keywords: *aerodynamics, wing profile, drag minimization, variational calculus, principle of least action, Lagrange equation, optimization, flow separation.*

შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის მნიშვნელობა საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სასერტიფიკაციო მოთხოვნების უზრუნველყოფაში

ნინო ხიტალიშვილი¹, დავით ლომაძე²

^{1,2}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი საქართველო

რეზიუმე: ერთიანი საჰაერო სივრცის შესახებ საქართველოს, ევროკავშირისა და მის წევრ სახელმწიფოებს შორის შეთანხმებაში წარმოჩენილია საქართველოს ვალდებულებები ევროკავშირის ნორმატიული აქტების გადმოტანის პროცესში. მიუხედავად საერთაშორისო სამართლებრივი ჩარჩოს არსებობისა ქვეყანაში საკანონმდებლო მოთხოვნები და ვალდებულებები საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტთა მიმართ არასრულყოფილია. მნიშვნელოვანია დავინახოთ რამდენად შეესაბამება არსებული სისტემა სამოქალაქო ავიაციის საერთაშორისო სტანდარტებსა და ევროკავშირის რეგულაციებს. ამრიგად, საქართველოსა და ევროკავშირის წევრ ქვეყნებს შორის გაფორმებულ ერთიანი საჰაერო სივრცის შეთანხმებაში გაწერილია ევროპული პრაქტიკის დანერგვის გზები, მონიტორინგის ფუნქციის (შემდგომ: ფუნქცია) უპირატესობები და სარგებელი ქართული საავიაციო სექტორისთვის. პრაქტიკული მაგალითისთვის განხილულია შპს „საქაერონავიგაციის“ მიერ დანერგილი შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქცია, როგორც პირველი პრეცედენტი ქვეყანაში. იგი გვიჩვენებს რეალურად, როგორ განხორციელდა და რა გზა გაიარა შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციამ შესრულებამდე. ეს პროცესი კი მოიცავდა შესაბამისობის მონიტორინგის სახელმძღვანელოს ჩამოყალიბებას, არსებულ მართვის სისტემასთან შერწყმასა და ორგანიზაციულ კულტურასთან ადაპტაციას.

საკვანძო სიტყვები: შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქცია, საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტი, სასერტიფიკაციო მოთხოვნები, სამოქალაქო ავიაციის რეგულაცია, უსაფრთხოების მართვის სისტემა.

ძირითადი ნაწილი

ნებისმიერი იურიდიული პირი, ვისაც სურს საჰაერო ხომალდით კომერციული საქმიანობის განხორციელება, უნდა ფლობდეს სერტიფიკატს სსიპ სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს დირექტორის „საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირების წესის დამტკიცების შესახებ“ [1] 142-ე ბრძანების მიხედვით. საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირებისას მნიშვნელოვან როლს ასრულებს შესაბამისობა, რომელიც განაპირობებს სტანდარტებთან თანხვედრასა და რეგულაციების უზრუნველყოფას. შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქცია მოიცავს სხვადასხვა პრაქტიკას, რაც

გულისხმობს მუდმივ მონიტორინგს, შეფასებას, აუდიტებს, მონაცემთა ანალიზს, საოპერაციო პროცედურების დახვეწას. შესაბამისობის მონიტორინგის მიზანია გამოავლინოს ნებისმიერი შეუსაბამობა საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სასერტიფიკაციო მოთხოვნებთან, რაც თავიდან ააცილებს მომავალში ექსპლუატანტს სერტიფიკატის შეჩერებას/გაუქმებას, ზიანსა და სხვა უსაფრთხოებასთან დაკავშირებულ პრობლემებს

ერთიანი საჰაერო სივრცის შესახებ შეთანხმება საქართველოსა და ევროკავშირის შორის გაფორმდა 2010 წელს [2]. შეთანხმებით განისაზღვრება საავიაციო ბაზრის ურთიერთელმისაწვდომობა. ხელშეკრულება არის ერთგვარი გზამკვლევი, რომ საქართველომ შეძლოს ევროპული საავიაციო სტანდარტების სისტემური დანერგვა, რაც მოიცავს მარეგულირებელი სისტემის გაძლიერებასა და საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტებისთვის ხარისხისა და უსაფრთხოების მოთხოვნების გამკაცრებას. ერთიანი საჰაერო სივრცის შეთანხმების დანართი III განსაზღვრავს სამართლებრივი აქტებისა და რეგულაციების ეტაპობრივ დანერგვას, რაც მოიცავს სერტიფიცირების საერთო წესებს, მათ შორის მართვის სისტემასა და შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციას. ევროკავშირის რეგულაცია (EU) 2018/1139 [3] ადგენს აუცილებელ მოთხოვნებს სამოქალაქო ავიაციის სექტორში უსაფრთხოებისა და მართვის სისტემების მისაღები დონის უზრუნველსაყოფად. დოკუმენტი წარმოადგენს სამართლებრივ ჩარჩოს, რომელიც ავიასაწარმოებისთვის, მათ შორის ოპერატორებისთვის განსაზღვრავს სტრუქტურაში დასაწერებელ ძირითად სტანდარტებსა და ნორმებს. დოკუმენტში გაწერილი მოთხოვნები წარმოადგენს ფუნდამენტურ საფუძველს ევროკავშირის ქვეყნებისა და მისი პარტნიორებისთვის, მათ შორის საქართველოსთვის, რომ ჩამოაყალიბონ ეფექტური, სტრუქტურირებული, და შესაბამისი მართვის სისტემა. რეგლამენტი NO 2018/1139 მოითხოვს ამ პრაქტიკების განსახორციელებლად შეიქმნას გამოყენებადი წესები. ამის მაგალითია Regulation (EU) No 965/2012, იგი მოიცავს მუხლს ORO.GEN.200-ს, რომელიც ექსპლუატანტს უწესებს შესაბამისობის სისტემის ქონას [4]. ამის დასაწერად კი არსებობს AMC – Acceptable Means of Compliance (შესაბამისობის მისაღები საშუალებები) და GM – Guidance Material (სახელმძღვანელო მასალა).

საქართველოს საავიაციო სექტორში შეთანხმების საფუძველზე არსებული ვალდებულებების დანერგვა და შესრულება ჯერ კიდევ ეტაპობრივად მიმდინარეობს. მიუხედავად იმისა, რომ ქვეყანა აქტიურად თანამშრომლობს ევროკავშირთან და იღებს მონაწილეობას შესაბამის პროგრამებში, რიგი საკითხების შეუსრულებლობის მიზეზად შეგვიძლია დავასახელოთ მარეგულირებელი ჩარჩოს მხოლოდ ნაწილობრივი შესაბამისობა ევროკავშირის სტანდარტებთან და შესაბამისობის მონიტორინგის პროგრამის კომპონენტის არასაკმარისად ჩამოყალიბებული პრაქტიკა. გარდა ამისა, ევროკავშირის არაწევრი ქვეყნებისთვის რეგულაციების გადმოტანა უფრო შრომატევადია. დროს ზრდის მთელი რიგი საკითხები, რომელიც პრაქტიკულ დანერგვამდე უნდა შესრულდეს. პირდაპირ გადმოტანა ჩვენს კანონმდებლობაში ტექნიკურად შეუძლებელია, რადგან ის ჯერ უნდა ითარგმნოს და არა მარტო შინაარსობრივად სწორი თარგმანია საჭირო, არამედ არსებულ სამართლებრივ ჩარჩოში უნდა მოხდეს მისი ლოგიკური ჰარმონიზება.

საქართველოში საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირების რეგულირება ეფუძნება შემდეგ სამართლებრივ აქტებს:

- საჰაერო კოდექსი; [5]
- ICAO-ს დანართი 6-ის მოთხოვნებზე მორგებულ შიდა პროცედურებს; [6]
- ევროკავშირთან გაფორმებულ ერთიანი საჰაერო ცის შეთანხმებას (CAA); [2]
- სსიპ – სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს დირექტორის 2013 წლის 19 აგვისტოს №142 ბრძანება „საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირების წესი“; [1]
- იკაოს ოფიციალური გამოცემის Doc 8335 („ექსპლუატაციის ინსპექტირების, სერტიფიცირების და მუდმივი ზედამხედველობის სახელმძღვანელო“). [7]

გეგმიური ინსპექტირების გეგმას ყოველწლიურად ადგენს სსიპ სამოქალაქო ავიაციის სააგენტო და უგზავნის ინსპექტირების ობიექტს. საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის გეგმიური საინსპექციო შემოწმების ფორმები და პერიოდულობა განისაზღვრება სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს დირექტორის 2018 წლის 31 აგვისტოს N166 ბრძანებით დამტკიცებული „სამოქალაქო საავიაციო საქმიანობის ინსპექტირების (საინსპექციო შემოწმების) წესის“ შესაბამისად [8].

ზემოთაღნიშნული ინსპექტირების სისტემა თავისი არსით და ფუნქციით წარმოადგენს შესაბამისობის კონტროლს. მისი მიზანია ოპერატორის დონის შესაბამისობა ეროვნულ და საერთაშორისო სტანდარტებთან. განხილული წესები გვიჩვენებს, რომ ამჟამად მარეგულირებელ ობიექტს წარმოადგენს სააგენტო. კვლევის მიზანია დადგინდეს საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის მიერ შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის დანერგვა, რამდენად შეამცირებდა მხოლოდ მარეგულირებელზე დაყრდნობას შესაბამისობის უზრუნველყოფას. ოპერატორი გამოასწორებდა თვითგამოვლენილ შეუსაბამობებს, თვითონვე აღმოფხვრიდა მას მანამ, სანამ ის იქცეოდა დამაბრკოლებელ ფაქტორად სერტიფიკატის შენარჩუნებისთვის. იმ ორგანიზაციებში, სადაც არსებობს ოპერატორების დონეზე შესაბამისობის ფუნქცია, მარეგულირებელი ორგანოს მიერ ზედამხედველობა შედარებით მსუბუქია. ადვილდება შიდა აუდიტების აღიარება, მცირდება შემოწმებების სიხშირე და მარეგულირებელს აძლევს საშუალებას ყურადღება მიმართოს რისკების უფრო სერიოზულ საკითხებზე.

ეს, რა თქმა უნდა, არ ნიშნავს რომ ამით ზედამხედველობა კარგავს მის მნიშვნელობასა და დატვირთვას, არამედ მისი მუშაობის ხასიათი გადადის უფრო თანამშრომლურ სტილში. ურთიერთინფორმირებულობის ფონზე შესაძლებელია სერტიფიცირების პროცესის მეტად ეფექტური წარმართვა. ამ მხრივ, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ შესაბამისობის ფუნქცია წარმოადგენს დამხმარე რგოლს ზედამხედველობის უწყვეტ პროცესში მარეგულირებელი ორგანოსთვის.

უსაფრთხოების მართვის სისტემების ძირითადი საყრდენი ორგანიზაციული უსაფრთხოების განსახორციელებლად არის შესაბამისობის მონიტორინგი. ამ ფუნქციის გარეშე სისტემა წარმოადგენს ფორმალურ ჩარჩოს და არა პრაქტიკულ ხელსაწყოს. შესაბამისობის მონიტორინგი უზრუნველყოფს ეროვნული და საერთაშორისო ნორმატიული მოთხოვნების შესრულებას, ასევე, ქმნის მდგრად საფუძველს სხვადასხვა სისტემური პროცესებს შორის თანხვედრაზე. უზრუნველყოფს პროცესების სისტემურ შესრულებას დადგენილი წესებისა და სტანდარტების მიხედვით.

სისტემების გამართული მუშაობა პირდაპირ აისახება სერტიფიცირების პროცესზე. სერტიფიცირება ანუ საჰაერო ოპერატორისათვის სერტიფიკატის (AOC) მინიჭება მოითხოვს, რომ ორგანიზაცია არამხოლოდ ფორმალურად აკმაყოფილებდეს მოთხოვნებს, არამედ სისტემურად მუდმივად ახორციელებდეს თვითშეფასებას.

ხაზგასასმელია ის ფაქტი, რომ ევროპის საავიაციო უსაფრთხოების სააგენტოს მიერ შემუშავებული განმარტებითი დოკუმენტები მიმართულია რეგულაციების უკეთ გასაგებად ოპერატორებისთვის. რეგულაცია ORO.GEN.200 პირდაპირ მოითხოვს შესაბამისობის ფუნქციის ქონას. დოკუმენტში ხაზგასმულია ფუნქციის დამოუკიდებლობა, აღწერს რომ აუდიტი არ უნდა შესრულდეს უშუალოდ მათ მიერ, ვინც ყოველდღიურად არიან ჩართული ოპერაციებში. ამით მოხდება ინტერესთა კონფლიქტის აცილება. ეს პრინციპი მნიშვნელოვანი იქნება საქართველოს კანონმდებლობაში გათვალისწინებისას, რათა არ დაირღვეს ფუნქციის პრინციპი და არ მოექცეს ფუნქცია შიდა გავლენის ქვეშ.

ქართულ რეალობაში შესაბამისობის მონიტორინგის საკითხზე საკვანძო დოკუმენტად შეგვიძლია მივიჩნიოთ სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს დირექტორის 2019 წლის 12 ივნისის №119 ბრძანებით დამტკიცებული "სააერონავიგაციო მომსახურების სერტიფიცირების წესი" [9]. ამ წესის მუხლი 29 სპეციალურად ეხება მოთხოვნებთან შესაბამისობის კონტროლს, რაც ფაქტობრივად წარმოადგენს შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის ფორმალურ განსაზღვრას. აქედან გამომდინარე, სააერონავიგაციო მომსახურების საწარმოს, კერძოდ შპს „საქაერონავიგაციას“, დაეკისრა შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის დანერგვის ვალდებულება. შპს „საქაერონავიგაციის“ სისტემის გასაცნობად ინტერვიუ ჩატარდა შესაბამისობის მონიტორინგის მენეჯერთან, დარიუს ვალასთან. იგი პირველივე დღიდან მონაწილეობდა ამ სისტემის ჩამოყალიბებასა და დანერგვაში.

2019 წელს დაიწყო ევროკავშირის 373-ე რეგულაციის გადმოტანა და დანერგვა, რამაც მოითხოვა შპს „საქაერონავიგაციის“ რესერტიფიცირება. სწორედ ამ რეგულაციის საფუძველზე გახდა საჭირო შესაბამისობის მონიტორინგის ფუნქციის გადმოტანა. შეიქმნა სამუშაო ჯგუფი, რომელმაც იმუშავა ფუნქციის ინტეგრაციაზე არსებულ სისტემასთან. დარიუს ვალასს შესაბამისობის სახელმძღვანელოს შესაქმნელად დასჭირდა 9 თვე. სახელმძღვანელო მოიცავს 10 ძირითად მომსახურებას, რომელიც დაყოფილია 17 მიმართულებად. თითოეულზე განსაზღვრულია მუშაობის არეალი, აუდიტი და პასუხისმგებელი პირი. სისტემის განსახორციელებლად აუცილებელია ყოველწლიური აუდიტების ჩატარება და კოორდინაცია სამსახურებთან ერთად. სახელმძღვანელოში გაწერილია აუდიტის ვადები თუ რომელ სამსახურს, წლის რომელ თვეს უწევს შემოწმება. შესაბამისად, ისინი მომზადებულიები ხვდებიან პროცესს. საგულისხმოა, შეუსაბამობის დადგენის შემთხვევაში გამოსასწორებელი ვადები, რომელიც ნაწილდება შემუშავებული სისტემით. ეს გულისხმობს, ერთგვარ კლასიფიკაციას, რომელიც შესაბამისობას ახარისხებს დონეების მიხედვითა და პერიოდულობის პრინციპით.

დასკვნა

შპს “საქაერონავიგაციის” მაგალითის საფუძველზე გამოიყოფა მთავარი ასპექტები. პირველი მიუხედავად გამოუცდელობისა და არ არსებული ბაზისა ახალი სისტემის. ფუნქცია წარმატებით ინტეგრირდა, რაც კარგ მაგალითს წარმოადგენს სხვა ოპერატორებისთვის. დავინახეთ რა პროცესები იყო გავლილი: კანონმდებლობის შეჯერება, შემდგომ სახელმძღვანელოს შემუშავება, სამსახურებთან აქტიური თანამშრომლობა. გამოიკვეთა მნიშვნელოვანი ასპექტები ადამიანური რესურსების გათვალისწინება, შეუსაბამობის კლასიფიკაციის მექანიზმის შემუშავება.

რეკომენდაციები საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სექტორისთვის:

- პირველ რიგში, საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირების წესში უნდა დაემატოს შესაბამისობის ვალდებულება;

- ფუნქცია უნდა იქცეს მექანიზმად და არა მხოლოდ ფორმალურ ნაწილად ოპერატორებში, როგორც სერტიფიკატის შენარჩუნების წინაპირობა;

- არსებული პრაქტიკის შპს “საქაერონავიგაციის” მაგალითის გაზიარება, სახელმძღვანელოს შემუშავების რეკომენდაციები და ორგანიზაციულ სტრუქტურაში ადაპტაციის გზები;

- ტექნოლოგიური განვითარება, საერთაშორისო პრაქტიკის ინტეგრირება, ევროკონტროლის მიერ შემუშავებული სისტემების ან მის საფუძველზე მსგავსი ბაზის შექმნა, რომელიც გაადვილებს მონაცემთა მიმოცვლას.

შესაბამისობის ფუნქცია სწორედ იმ მექანიზმად იქცევა, რომელიც ოპერატორს საშუალებას აძლევს დროულად აღმოაჩინოს ხარვეზი, დანერგოს გაუმჯობესებაზე ორიენტირებული სამუშაო ციკლი და პროდუქტიულად ითანამშრომლოს მარეგულირებელთან. შესაბამისად, მისი სისტემური დანერგვა აუცილებელია არა მხოლოდ რეგულაციების დასაკმაყოფილებლად, არამედ უფრო უსაფრთხო, გამჭვირვალე და გამართული პროცესების უზრუნველსაყოფად.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტო. „საჰაერო ხომალდის ექსპლუატანტის სერტიფიცირების წესის დამტკიცების შესახებ“ ბრძანება №142 თბილისი, 2013.
<https://gcaa.ge/wp-content/uploads/2024/12/Aircraft-Operator-Certification-Rule-GCAA.pdf>;
2. CAA Agreement, Common Aviation Area Agreement - შეთანხმება საქართველოსა და ევროკავშირისა და მის წევრ სახელმწიფოებს შორის ერთიანი საჰაერო სივრცის შესახებ;
3. European Union. *Regulation (EU) 2018/1139 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Union Aviation Safety Agency*. Official Journal of the European Union, 2018;
4. Easy Access Rules for Air Operations AMC/GM, Part ORO.GEN.200. In *Acceptable Means of Compliance and Guidance Material to Regulation (EU) No 965/2012 on Air Operations*. EASA, 2023;
5. საქართველოს საჰაერო კოდექსი, 1996
6. ICAO, Operation of Aircraft - annex 6, 2018

7. Manual of Procedures for Operations Inspection, Certification and Continued Surveillance (Doc 8335), 6th Edition 2022.
8. საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტო. სამოქალაქო საავიაციო საქმიანობის ინსპექტირების წესის დამტკიცების შესახებ ბრძანება №166. თბილისი: 2018;
9. საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს დირექტორის 2019 წლის 12 ივნისის №119 "სააერონავიგაციო მომსახურების სერტიფიცირების წესი".

The Importance of the Compliance Monitoring Function in Ensuring Aircraft Operators' Certification Requirements

Nino Khitalishvili¹, Davit Lomadze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedoplati Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This article examines the role of the compliance monitoring function in ensuring aircraft operators meet certification requirements in Georgia. While the Common Aviation Area Agreement between Georgia and the European Union establishes obligations for the transposition of EU aviation regulations, the national framework still lacks full alignment with European standards. The paper outlines international practices, regulatory foundations, and the advantages of implementing compliance monitoring at the operator level, highlighting its contribution to safety management and certification sustainability. As a practical case, the study reviews the implementation of compliance monitoring within LTD "SAKAERONAVIGATSIA", the first precedent in Georgia. The analysis demonstrates the process of developing a compliance manual, integrating it into existing management systems, and adapting it to the organizational culture. The findings emphasize that operator-level compliance monitoring strengthens regulatory oversight, reduces reliance on inspections alone and promotes a collaborative approach between operators and authorities. The article concludes with recommendations for integrating compliance monitoring into certification rules, ensuring its role as both a regulatory requirement and a mechanism for safer, more transparent, and efficient aviation operations in Georgia.*

Keywords: *Compliance monitoring function, aircraft operator, certification requirements, civil aviation regulation, safety management system.*

საჰაერო ხომალდის ჩატვირთვის კონტროლისა და წონა/ბალანსის სტაბილურობის გათვალისწინება ფრენისათვის მგზავრთა რეგისტრაციის ეტაპზე

ბადრი ნადარაია

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში წარმოდგენილია თანამედროვე კომერციული ავიაციის მგზავრთა ნაკადის გამტარუნარიანობის პოტენციალის სრული ათვისების და სამომავლო ტენდენციების დაკმაყოფილების გზები დღევანდელი მოწინავე ინჟინერიის ხელოვნურ ინტელექტში ინტეგრირებულ კომბინატორიკულ და ალბათურ მოდელებზე დაყრდნობით.

ასევე ასახულია საჰაერო ხომალდზე მგზავრთა მიღება-დაშვების და თვითმფრინავის წონა/ბალანსთან დაკავშირებული საკითხების ერთმანეთთან ინტეგრირება, რაც ხელსაყრელია დროის დაზოგვის, ფინანსური სარგებლიანობის და დამატებითი, რიგგარეშე ადამიანური ფაქტორის ეფექტურობის გათვალისწინების თვალსაზრისით.

საკვანძო სიტყვები: კომერციული ავიაცია, მგზავრთა რეგისტრაცია, აეროპორტი, ავიაბაჟანი.

შესავალი

მგზავრთა საჰაერო ხომალდზე მიღების, თვითმფრინავის წონითი ბალანსის შეზღუდვების და ქვემოთ ნაჩვენები საკითხების გაუმჯობესების და დახვეწის მიზნით თბილისის საერთაშორისო აეროპორტის მაგალითზე აღწერილია გასამგზავრებლად მოსული პირის და საჰაერო ხომალდის მომსახურების პროცესი; პუნქტებად ნაჩვენებია ყოველი საკვანძო, მნიშვნელოვანი ეტაპი, რის შემდგომაც შემოთავაზებული სიახლის საფუძველზე გაკეთებულია დასკვნა წამოჭრილ საკითხთან მიმართებაში.

ქვემოთ პუნქტებად ნაჩვენები სამოქმედო პროცესების გაუმჯობესების მიზნით მიზანშეწონილია AI (Artificial Intelligence) - ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება პროგრამული უზრუნველყოფის სახით არსებულ სისტემებში. აღნიშნული კონცეპტუალური მიდგომა მოგვცემს შესაძლებლობას დაცული იქნას საჰაერო ხომალდის წონითი შეზღუდვები და ბალანსი მგზავრების მიღების საწყის ეტაპზე. აქვე აღსანიშნავია, რომ თვითმფრინავის წონითი ბალანსის რაციონალიზაცია გვამღევს შეტევის კუთხის

ოპტიმიზაციას, რაც პოზიტიურად აისახება საწვავის მოხმარებაზე. ეს კი პირდაპირ პროპორციულად უზრუნველყოფს მგზავრის მხრიდან ფრენისათვის გაღებული ფინანსური ღირებულების შემცირებას.

1. მგზავრთა მიღება (რეგისტრაცია)

1.1. აეროპორტის გაფრენის ტერმინალში შემოსული მგზავრი მიემართება ავიაკომპანიის მიერ არჩეულ სარეგისტრაციო დახლთან, რომელთანაც (გაფრენამდე 2-3 საათით ადრე) დაწყებულია რეგისტრაცია.

1.2. წარადგენს რა მგზავრი სამგზავრო დოკუმენტაციას, მომსახურე პერსონალი (მგზავრთა მომსახურების აგენტი) ხელთ არსებული საბუთების საფუძველზე იწყებს მგზავრის სამგზავროდ რეგისტრაციას.

1.2.1. საფუძვლიანად ხდება პიროვნების იდენტიფიცირება და სამგზავრო დოკუმენტების შემოწმება ტრანზიტული თუ დანიშნულების სახელმწიფოს მოთხოვნებისა და კანონმდებლობის შესაბამისად. დაკმაყოფილების შემთხვევაში მგზავრი დაიშვება ფრენისათვის.

1.2.2. აგენტი ვიზუალურად აფასებს (ფიზიკური შესაძლებლობებისა და დამატებითი მოთხოვნების არსებობიდან გამომდინარე) მგზავრს. მიანიჭებს რა, შესაბამის ადგილს საჰაერო ხომალდზე, იწყებს მგზავრის ჩასაბარებელი ბარგისა და ხელბარგის რეგისტრაციას ავიაკომპანიის მიერ განსაზღვრული წესების შესაბამისად.

1.2.3. მგზავრისათვის განკუთვნილი ჩასაბარებელი ბარგის/ხელბარგის რაოდენობა, მოცულობა (გაბარიტები) და წონა განსაზღვრულია ნაყიდ სამგზავრო ბილეთში წინასწარ, თუმცა აუცილებლად გადასამოწმებელია და დასაზუსტებელია მისი შესაბამისობა რეალურთან მიმართებით.

1.3. მგზავრისადმი საჰაერო ხომალდზე კონკრეტული ადგილის მინიჭება, აგენტის კომპეტენციის ფარგლებში, მართვადი პროცესია. აგენტი ეყრდნობა მგზავრის ფიზიკურ შესაძლებლობებს, ავიაკომპანიისა და უშუალოდ მგზავრის ბილეთში გაწერილ მონაცემებს.

მაშასადამე, მგზავრის რეგისტრაცია გულისხმობს, მისი სრულუნარიანობის გაანალიზებას საჰაერო ხომალდზე კონკრეტული ადგილის მინიჭების მიზნით, ხელბარგის, ჩასაბარებელი ბარგის გადამოწმებას ბილეთსა და განსაზღვრულ ნორმატივებთან მიმართებაში, აგრეთვე სამგზავრო დოკუმენტაციის დანიშნულების ადგილზე მისასვლელად შესაბამისობაში არსებობის გადამოწმებას.

აღნიშნული ეტაპების დაკმაყოფილების შემდგომ, მგზავრი გადის საიმეგრაციო და საავიაციო უსაფრთხოების კონტროლს, რის შემდგომაც ელოდება ჩასხდომის დაწყებას წინასწარ განსაზღვრულ დარბაზში.

2. საჰაერო ხომალდის მომსახურება (მოფრენა-გაფრენის ეტაპი)

2.1. მოახლოებული თვითმფრინავის დაფრენის ეტაპზე გადასვლისას გამოითხოვს რა ხომალდის მეთაური შესაბამის ეშელონს, ავიაბაქნის კომპურის მეთვალყურე სახმელეთო მომსახურების პერსონალს წინასწარ (15-20 წუთით ადრე დაფრენამდე) გადასცემს ინფორმაციას მისაღები ბორტის კატეგორიის, რეისის ნომერის, გამოფრენის ადგილმდებარეობისა და სადგომის პოზიციის შესახებ.

2.2. საჰაერო ხომალდის ჩამოფრენის გამოცხადებისთანავე სადგომზე მობილიზდება ავიაბაქნის და ფრენების ოპერირების სამსახურის თანამშრომლები, აკონტროლებენ მგზავრების რაოდენობის შესაბამის ტრანსპორტს, ტრაპების საჭირო რაოდენობას, საწვავგამმართველისა და სახანძრო ბრიგადის ადგილზე ყოფნას (საჭიროების შემთხვევაში), ამოწმებენ სადგომს არასანქცირებული ნივთების არსებობაზე. გამყოლი მანქანისა და მარშალერის მიერ ხომალდის სადგომზე შემოყვანის შემდგომ იწყება ე.წ. „Turnaround Time“ (*TAT - მინიმალური დრო, რომელიც ესაჭიროება საჰაერო ხომალდს სრული მომსახურებისათვის გაჩერებიდან დაძვრამდე*) - დროის ათვლა. *(ყოველ ავიაკომპანიას თვითმფრინავის კლასიდან გამომდინარე წინასწარ აქვს შეთანხმებული სახმელეთო მომსახურების პერსონალთან, რომელიც ზოგად წარმოსადგენ მასშტაბებში 20 წუთიდან იწყება და მეტწილ 60 წუთამდე გრძელდება).*[4].

2.3. საჰაერო ხომალდიდან მგზავრთა გადმოსმის დაწყებისთანავე, ხომალდის მეთაური ფრენების ოპერირების ჩატვირთვის კონტროლისა და კომუნიკაციის აგენტს წერილობით (ან ელექტრონულად, დისტანციურად) გადასცემს გასამგზავრებლად საჭირო მონაცემებს ე.წ. „Trip Info“ დოკუმენტის სახით, რომელშიც ძირითადად ასახულია მარშრუტისათვის საჭირო საწვავის ოდენობა და წონითი შეზღუდვები.

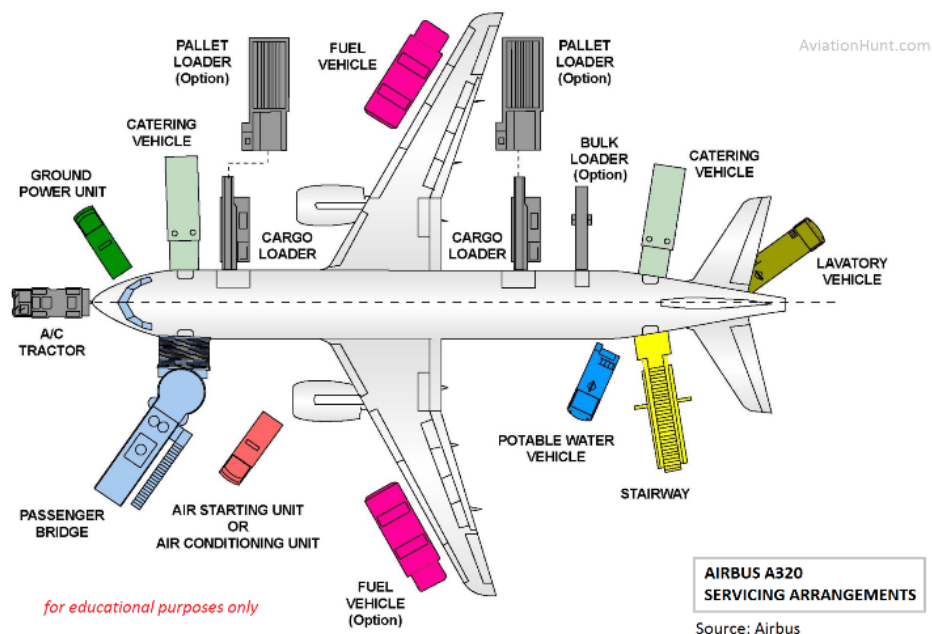
2.3.1. მგზავრების გადმოსმასთან ერთად იწყება თვითმფრინავის საბარგულებიდან ბარგის გადმოტვირთვა. აღნიშნული პროცესი მეტად საყურადღებოა ხომალდის ხმელეთზე სტაბილურობის შესანარჩუნებლად. ამიტომ ბარგის გადმოცლა (წონასთან მიმართებაში) ყოველთვის იწყება უკანა საბარგულიდან და მოყვება წინა საბარგულისკენ. პროცედურის დარღვევამ შეიძლება გამოიწვიოს ხომალდის სადგომზე დგომის დისბალანსი, როგორც ეს ნაჩვენებია სურ. 1-ზე [1].



სურ. 1. საჰაერო ხომალდიდან მგზავრების გადმოსმის და ბარგის არასწორი გადმოტვირთვის შედეგად მიღებული წონითი დისბალანსი

მნიშვნელოვანია კოორდინატორი აგენტი დროულად ღებულობდეს ავიაკომპანიისაგან CPM (Container Pallet Message) ან/და LDM (Load Distribution Message) შეტყობინებებს.

2.3.2. სახმელეთო მომსახურების კოორდინატორი კურიერებს და ორგანიზებას უწევს საჰაერო ხომალდის სერვისებს შესაბამისი ტექნიკის და პასუხისმგებელ პირებთან შეთანხმებით. მომსახურების ტექნიკური საშუალებები და მათი პოზიცირება ხომალდთან მიმართებაში ნაჩვენებია სურ. 2-ზე.



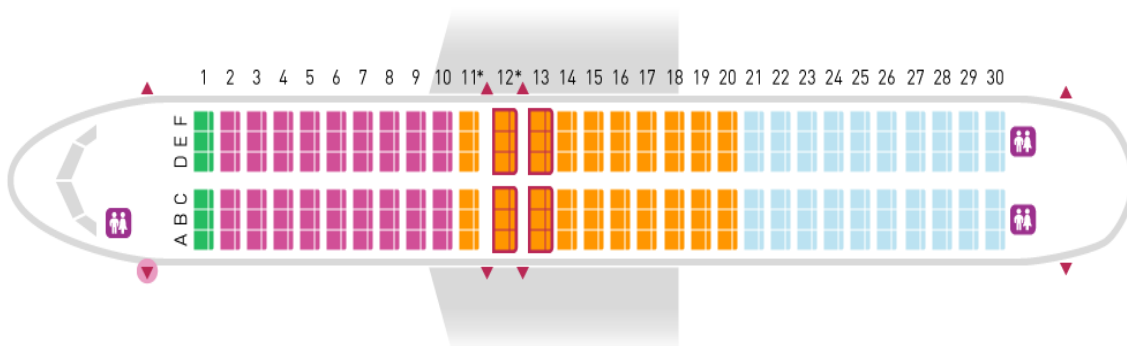
სურ. 2 საჰაერო ხომალდის სახმელეთო მომსახურების ტექნიკის განლაგება თვითმფრინავთან მიმართებაში

2.4. მგზავრთა რეგისტრაციის დასრულებისთანავე (მეტად მნიშვნელოვანია რეგლამენტით გაწერილი დროითი შეზღუდვების გათვალისწინება) ფრენების ოპერირების სამსახურის აგენტი (იგივე LCC - Load Control and Communication ან TRC - Turnaround Coordinator) იწყებს მისთვის ხელთარსებული მონაცემების ერთიანად თავმოყრას საჰაერო ხომალდის სახეობიდან გამომდინარე [3].

2.4.1. აღსანიშნავია და ყურადსაღებია მგზავრთა კლასიფიკაცია მამრობითი და მდედრობითი სქესის მიხედვით, აგრეთვე ბავშვებისა და 2 წლამდე ბავშვების ბორტზე ყოფნით. საქმე იმაში მდგომარეობს, რომ კონკრეტულ მგზავრზე მისადაგებულია საშუალო წონა. ასე მაგალითად კაცი - 80/85/88 კგ, ქალი - 70/75 კგ, ბავშვები - 30/35 კგ, 2 წლამდე ბავშვები - 0/10/15 კგ კონკრეტული ავიაკომპანიის წესდების შესაბამისად [1,2].

2.4.2. ჩასატვირთი ბარგისა და უშუალოდ ტვირთის კატეგორიები განსაზღვრულია პრიორიტეტების მიხედვით და შეიძლება იყოს ტრანსფერული, პირდაპირი, სწრაფი/ხანგრძლივი ტრანსფერული, ბიზნეს ან და პრიორიტეტული (სადგურზე ჩაფრენისთანავე ბორტზე მისაწოდებელი). თითოეული კლასიფიკაციისა და მარკირების ბარგი თუ ტვირთი უნდა აღმოჩნდეს საჰაერო ხომალდის შესაბამის საბარგულში ისე, რომ არ დაირღვეს თვითმფრინავის საფრენი წონითი შეზღუდვები და წონითი ბალანსი ხომალდის განივ ღერძსა და სიმძიმის ცენტრთან მიმართებაში.

2.4.3. საჰაერო ხომალდზე მგზავრთა განთავსების ზოგადი რუკა იხილეთ სურ. 3-ზე, ხოლო საბარგულების განთავსება ნაჩვენებია სურ. 4-ზე.



სურ. 3 საჰაერო ხომალდზე მგზავრთა განთავსების პოზიციები



სურ. 4 საჰაერო ხომალდზე სამგზავრო სალონის, წინა და უკანა საბარგულების განთავსების პოზიციები

2.5. საჰაერო ხომალდის ჩატვირთვის კონტროლს აწარმოებს ე.წ. LCC (Load Control and Communication) პირი ზემოხსენებული 2.4.2. და 2.4.3. პუნქტების შეჯამება-გათვალისწინებით სპეციალურ ელექტრონულ-კომპიუტერულ სისტემაში, რომლის ალგორითმი ითვალისწინებს თვითმფრინავის მახასიათებლებს, სამარშრუტო წონით თუ საწვავის მონაცემებს, ასაფრენ წონასა და ხომალდის სახმელეთო თუ საფრენოსნო მდგრადობა/სტაბილიზაციას.

2.6. ჩატვირთვის კონტროლის ელექტრონული სისტემის ზოგადი ინტერფეისი წარმოდგენილია ქვემოთ მოყვანილი ილუსტრაციების სახით.

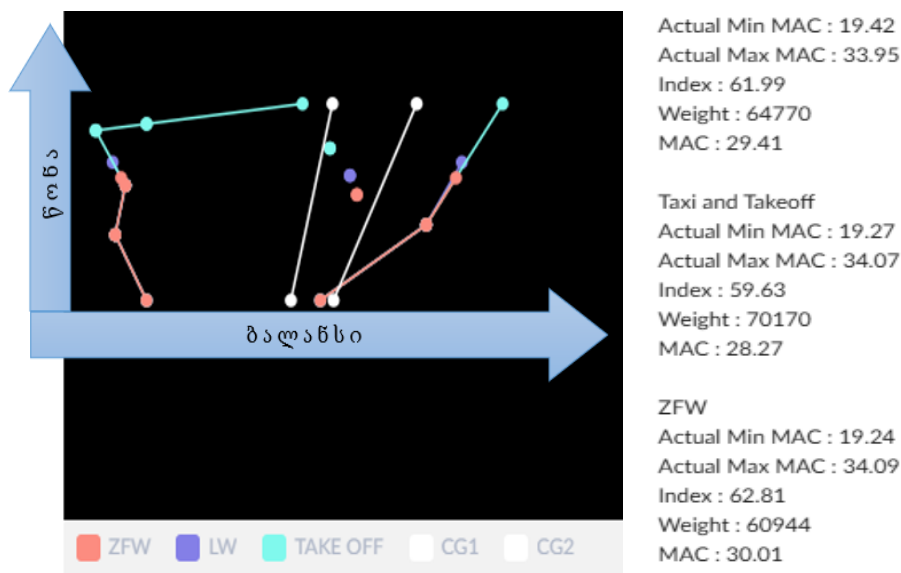
Version 00	Weight Unit KG	Passenger Mass Type M/F	Crew 2/4	Pantry INT
---------------	-------------------	----------------------------	-------------	---------------

Weight Info Dow 44411 Doi 50.95 Maltow 79000 Mallw 67400 Avg.Bag.Wt. 13 Bag/Pass. 1.2	Fuel Info Block Fuel 9500 Taxi Fuel 274 Trip Fuel 5400	User Info Checked By Approved By
--	---	---

სურ. 5 Trip Info – წონითი შეზღუდვებისა და საწვავის მნიშვნელობები

NUMBER OF PASSENGERS						WEIGHT DISTRIBUTION										
M	F	Ch	Inf	DHC	CBBG	TR	Count	T.	H1	3402	H3	2426	H4	2110	H5	500
97	83	4				BI	110	1120	60	610	50	510				
T.M	T.F	T.Ch	T.Inf	T.Dhc	T.Wei	BT	50	857					50	857		
97	83	4	0	0	0	U	10	70							10	70
T.M	T.F	T.Ch	T.Inf	T.Dhc	T.Wei	All Total	All Total			All Total		All Total		All Total		
97	83	4	0	0	0	2047	610			510		857		70		
Total Passenger Count						Total Passenger Weight										
184						14486										

სურ. 6 მგზავრებისა და ტვირთის შემადგამელი ველი 2.4.2. და 2.4.3 პუნქტების მნიშვნელობების გათვალისწინებით



სურ. 7 წონა/ბალანსის შეზღუდვებისა და ეფექტურობის დიაგრამა

ZFW (Zero Fuel Weight) - სრულიად დატვირთული საჰაერო ხომალდი ყველანაირი წონის გათვალისწინებით გარდა საწვავის წონისა.

LW (Landing Weight) - სრულიად დატვირთული საჰაერო ხომალდის დასაფრენი წონა.

TOW (Take Off Weight) - სრულიად დატვირთული საჰაერო ხომალდის ასაფრენი წონა.

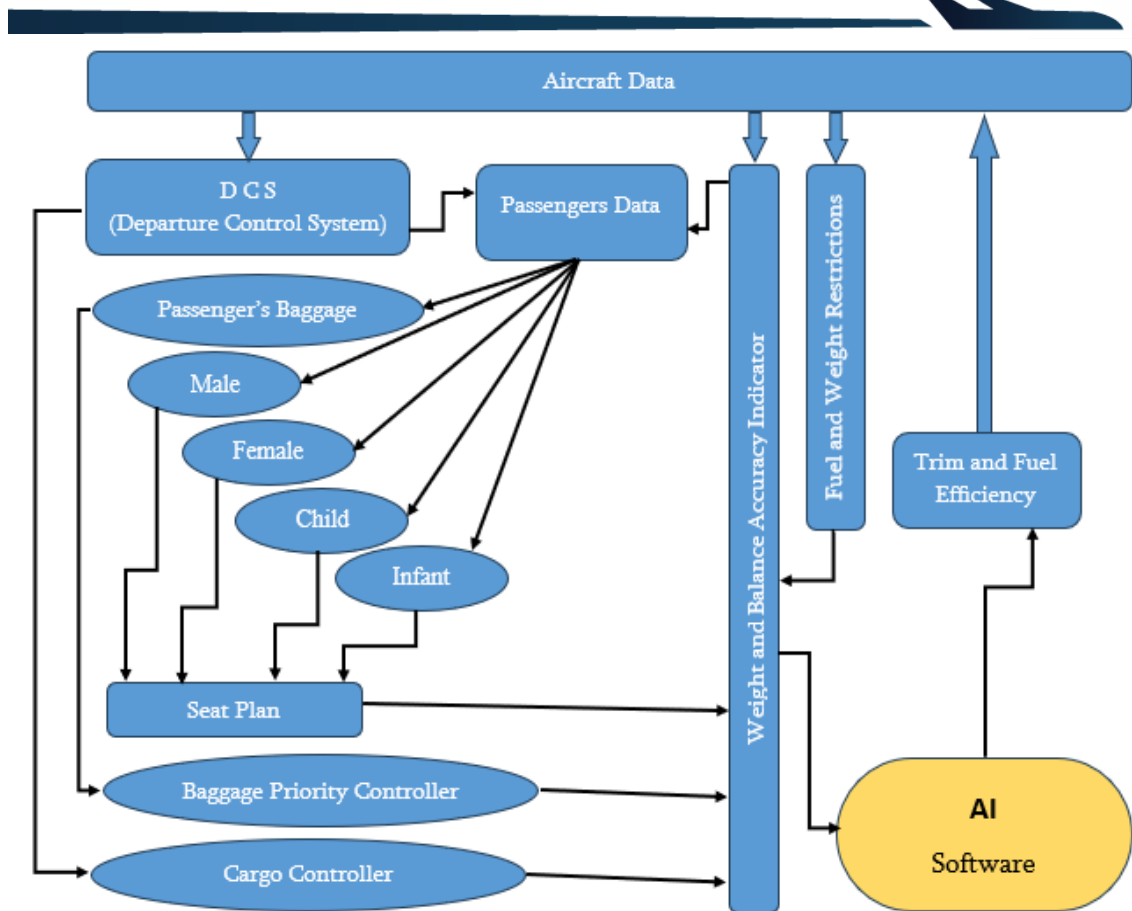
დიაგრამაზე თეთრ მონაკვეთებს შორის მოქცეული წონა/ბალანსის მაჩვენებლები (ZFW, LW და TOW) ცხადყოფს საჰაერო ხომალდის იდეალურ ბალანსსა და მდგრადობას საწვავის გარეშე, დაფრენისა თუ აფრენის ეტაპებზე [2].

ZFW, LW და Take Off მაჩვენებლების კონტროლი შესაძლებელია სავარაუდო, წინასწარი გეგმარებითი ჯავშნებისა და მოსალოდნელი ბარგისა და ტვირთების გათვალისწინებით.

ჭეშმარიტი მონაცემების საფუძველზე, რომელიც დროის რეალურ რეჟიმში ცვალებადია მგზავრებისა და მათი ბარგის საჰაერო ხომალდზე ჩატვირთვისთანავე, შესაძლებელი ხდება საჰაერო ხომალდის მდგრადობა/სტაბილიზაციისა და წონების კონტროლი უშუალოდ სარეგისტრაციო დახლოდან. მგზავრების საჰაერო ხომალდზე დაშვების პასუხისმგებელ პირს დროის რეალურ რეჟიმში ეცოდინება მგზავრთა რაციონალური განთავსების ადგილები თვითმფრინავში, აგრეთვე მხედველობაში მიიღება ბარგის, ტვირთის რაოდენობა და წონა. ერთმანეთის მონაცვლეობით (პრიორიტეტების გათვალისწინებით. პუნქტი 2.4.2.) პასუხისმგებელ პირს ექნება ზუსტი ინფორმაცია საჰაერო ხომალდის რომელ საბარგულში განთავსოს კონკრეტული ტვირთი.

თანამედროვე ხელოვნური ინტელექტის დაპროგრამება შესაბამისი ალგორითმებით არ წარმოადგენს სირთულეს. შესაბამისად, საქმე მარტივდება ადამიანური ფაქტორის გამორიცხვის, საწვავის რაციონალური ხარჯვის და წონა/ბალანსის იდეალური ნიშნულის შენარჩუნების ხარჯზე.

მოქმედების პრინციპის ზოგადი ილუსტრაციისათვის ნაჩვენებია სქემა სურათზე 8.



სურ. 8 საჰაერო ხომალდის წონისა და ბალანსის შენარჩუნების ზოგადი სქემა შემადგენელი კომპონენტებისა და AI-ის გამოყენებით

დასკვნა

საჰაერო ხომალდის წონისა და წონითი ბალანსის დაცვა კომერციული, საინჟინრო და აგრეთვე უსაფრთხოების მაღალეფექტურობის, ადამიანური ფაქტორისა და რაციონალური დროის მართვის საკითხიდან გამომდინარე უმჯობესია დაცული იყოს თავდაპირველ ეტაპებზე - მგზავრის და ბარგის ფრენაზე მიღებისთანავე.

მგზავრის ფრენაზე რეგისტრაციისთანავე ნათელია ხომალდის რეალური წონა/ბალანსი და შესაბამისად, პირველივე პასუხისმგებელი ინსტანციისათვის ხელმისაწვდომი ხდება ადრეულ ეტაპებზე ამ საკითხის მართვა და კორექცია. აქვე მკვეთრად მატულობს თვითმფრინავის ხმელეთზე მდგრადობის შესახებ ინფორმაცია გადმოტვირთვის და მგზავრების გადმოსმის შემთხვევაში.

ჩასხდომა/ჩატვირთვის ეტაპი კი გაცილებით ეფექტური ხდება დროითი დანაკარგების თავიდან აცილების თვალსაზრისით, იმდენად, რამდენადაც დროის რეალურ რეჟიმში (ან რეგისტრაციის დასრულებისთანავე) საჰაერო ხომალდის ჩამტვირთავს ზუსტად ეცოდინება სად და რომელი ბარგი განათავსოს. ხელოვნური ინტელექტის და საჭირო პროგრამული უზრუნველყოფის გათვალისწინებით მცირდება TAT მაჩვენებელი, რაც პერსპექტივაში რაციონალურს ხდის ავიაკომპანიების ფინასურ ხარჯებს დროის ფაქტორთან მიმართებაში და ზრდის აეროპორტის საჰაერო ხომალდების გამტარუნარიანობას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. "Aircraft Weight and Balance Handbook" - *FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (2016)*.
2. "WEIGHT, BALANCE AND PERFORMANCE" - *UK Civil Aviation Authority (2024)*.
3. "Airport Management" - *Daniel Prather (2015)*.
4. "PRINCIPLES OF AIRLINE AND AIRPORT MANAGEMENT" – *Institute of Management Studies (2015)*.

Passenger Boarding on an Aircraft Considering Load Control and Weight/Balance Stability

Badri Nadaraia

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedoplis Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The article presents ways to fully harness the potential of passenger flow capacity in modern commercial aviation and meet future trends based on combinatorial and probabilistic models integrated with today's or advanced engineering's artificial intelligence. The article also reflects the integration of issues related to passenger boarding and disembarkation on the aircraft and the weight/balance of the airplane, which is beneficial in terms of saving time, financial utility, and considering the effectiveness of additional, extraordinary human factors.*

Keywords: *Commercial aviation, passenger check-in, airport, apron.*

ოპტიკური კომპიუტერები და მათი გამოყენების პერსპექტივები ავიაციაში

დემურ ვეფხვაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი № 16, 0103, თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: თანამედროვე ელექტრონულმა კომპიუტერებმა, რომლებიც დაფუძნებული არიან ელექტრონების მოძრაობაზე მიაღწიეს მწარმოებლურობის მეტად მაღალ დონეს, თუმცა მათი შემდგომი განვითარების დინამიკამ მინიატურიზაციისა და ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარის ზრდის თვალსაზრისით მიაღწია პრაქტიკულ ზღვარს, რაც იმას ნიშნავს, რომ კომპიუტერების მწარმოებლურობის შემდგომი ამაღლებისათვის საჭიროა მათი დამუშავებისათვის პრინციპულად ახალი მიდგომების ძიება. ამ მიდგომებიდან დღეს ერთ-ერთ ძირითად მიდგომად ითვლება ოპტიკური კომპიუტერების დამუშავება, რომლებიც თავის მუშაობისას იყენებენ არა ელექტრონებს, არამედ ფოტონებს.

დღეს ოპტიკური კომპიუტერების დამუშავების აქტუალობა განპირობებულია ისეთი მნიშვნელოვანი ამოცანების გადაწყვეტის უზრუნველყოფაში როგორებიცაა - ხელოვნური ინტელექტის და ნეიროქსელების, მოდელირების, რთული სისტემების მართვის, გამოსახულებების და მონაცემების დიდი მასივების პარალელური დამუშავების ამოცანები და, რა თქმა უნდა, ავიაციის სფეროში არსებული აქტუალური ამოცანების გადაწყვეტა.

ნაშრომში განხილულია თანამედროვე ელექტრონული კომპიუტერების მთავარი პრობლემები მათში სიგნალების გავრცელების სიჩქარის, ტრანზისტორების მინიატურიზაციის ფიზიკური ზღვარის და ენერგომოხმარების თვალსაზრისით. მოცემულია ოპტიკური კომპიუტერის პრინციპული სქემა და მუშაობის პრინციპი, მოყვანილია მისი შემადგენელი ცალკეული ბლოკების დანიშნულება და მუშაობის ანალიზი. ელექტრონული კომპიუტერების მთავარი პრობლემების განხილვის საფუძველზე ნაჩვენებია ამ პრობლემების გადაწყვეტის შესაძლებლობები ოპტიკური კომპიუტერების გამოყენების შემთხვევაში, მოცემულია ოპტიკური კომპიუტერების ელექტრონულ კომპიუტერებთან შედარებითი დახასიათება და ნაჩვენებია ოპტიკური კომპიუტერების უპირატესობა მათთან შედარებით, ნაგარაუდევია ოპტიკური კომპიუტერების განვითარების და გამოყენების პერსპექტივები, შემოთავაზებულია ავიაციაში ოპტიკური კომპიუტერების გამოყენების შემთხვევაში მთელი რიგი საავიაციო ამოცანების წარმატებით გადაწყვეტის შესაძლებლობები და პრინციპები.

საკვანძო სიტყვები: ოპტიკური კომპიუტერი, ფოტონი, ინტერფერენცია, ჰოლოგრაფიული მეხსიერება, ოპტიკური სენსორი.

შესავალი

1964 წელს რუსმა მეცნიერებმა ა. პროხოროვმა და ნ. ბასოვმა ამერიკელ ჩარლზ თაუნსთან ერთად მიიღეს ნობელის პრემია ოპტიკური კვანტური გენერატორების აღმოჩენისათვის. 1971 წელს კი უნგრელ - ბრიტანელმა ფიზიკოსმა დენის გაბორმა მიიღო ნობელის პრემია ჰოლოგრაფიული მეთოდის აღმოჩენისათვის. მოხდა მთელი რიგი ბრწყინვალე მიღწევები ფურიე - ოპტიკის სფეროში. ყოველივე ამან განაპირობა დაწყებულიყო ფიქრი ოპტიკური კომპიუტერების დამუშავებასა და შექმნაზე, რომელთა მწარმოებლურობა მთელი რიგით მაღალი იქნებოდა არსებულ ელექტრონულ კომპიუტერებთან შედარებით. ოპტიკური კომპიუტერის შექმნისათვის მუშაობა დაიწყო გასული საუკუნის 80 - იან წლებში, თუმცა მაშინ მიზანი არ ისახავდა სილიციუმური ტექნოლოგია შეცვლილიყო სხვა უფრო სრულყოფილი ტექნოლოგიით. დღეისათვის ეს მიდგომა რადიკალურადაა შეცვლილი და მიზნად ისახავს ფართომასშტაბიან, პერმანენტულ, მიზანმიმართულ კვლევებს და მუშაობას იმისათვის, რომ მოხდეს ელექტრონული კომპიუტერების ჩანაცვლება ოპტიკური კომპიუტერებით, რომლებსაც შეეძლება ფართო სპექტრის რთული ამოცანების გადაწყვეტა უფრო სწრაფად, ვიდრე ეს შეუძლიათ ელექტრონულ კომპიუტერებს.

ძირითადი ნაწილი

ოპტიკური კომპიუტერები - ეს არის კომპიუტერები, რომელებიც ჩვეულებრივი ელექტრონული კომპიუტერებისგან განსხვავებით, რომლებიც დაფუძნებულია ელექტრონულ ტექნოლოგიებზე და გამოთვლითი ოპერაციები სრულდება ელექტრონების დახმარებით, ოპტიკური კომპიუტერები გამოთვლებს ახორციელებენ ფოტონების გამოყენებით, რაც საშუალებას აძლევს მათ მიღწეულ იქნეს გამოთვლების დიდი სისწრაფე და მწარმოებლურობა ოპტიკური გამოსხივების ნაკადებზე მანიპულირების გზით (ინტერფერენცია, დიფრაქცია, არაწრფივი ოპტიკა).

დღეს არსებულ ელექტრონულ კომპიუტერებში ციფრული ინფორმაციის ყველაზე მცირე ერთეულის ბიტის შემნახველი არის ტრანზისტორი. ტრანზისტორების რაოდენობა ელექტრონულ კომპიუტერებში კი ასეულ მილიონს აღწევს. თანამედროვე კომპიუტერების მწარმოებლურობის ზრდა ეყრდნობა გორდონ მურის კანონს, რომლის თანახმად ორჯერ გაზრდილი ტრანზისტორების რაოდენობა მიკროჩიპში იძლევა მწარმოებლურობის ექსპონენციურ ზრდას, თუმცა ამ ზრდის გზის ბოლოს კი შეიძლება დიდი რაოდენობით ტრანზისტორებმა საერთოდ შეაფერხონ კიდევ პროცესორის მუშაობის სიჩქარე. გარდა ამისა, ტრანზისტორს აქვს ფიზიკური ზომის შეზღუდვა, რომლის იქით შეუძლებელი იქნება მათი შექმნა. ასევე რაც მეტია ტრანზისტორების რაოდენობა, მით უფრო მეტი ელექტრული ენერგიაა საჭირო მათი მუშაობისათვის, მეტი ენერგია კი განაპირობებს მაღალ ტემპერატურას, რაც ტრანზისტორების მუშაობის შემაფერხებელი ფაქტორია.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნული (სიგნალების გადაცემის სიჩქარე, მაღალი ტემპერატურა, ენერგომომხმარება, ტრანზისტორების მინიატურიზაციის ფიზიკური ზღვარი) ხაზს უსვამს

ელექტრონული კომპიუტერების მთავარ პრობლემებს და მოითხოვს მათი გადაწყვეტის გზების ძიებას. ამ თვალსაზრისით ამ ყველაფრის თავიდან აცილების მიზნით ერთ - ერთ ალტერნატივას წარმოადგენს სწორედ სრულად ოპტიკური კომპიუტერების ან ელექტრონულ - ოპტიკური კომპიუტერების ჰიბრიდული ვარიანტის შექმნა [1, 5, 6, 7].

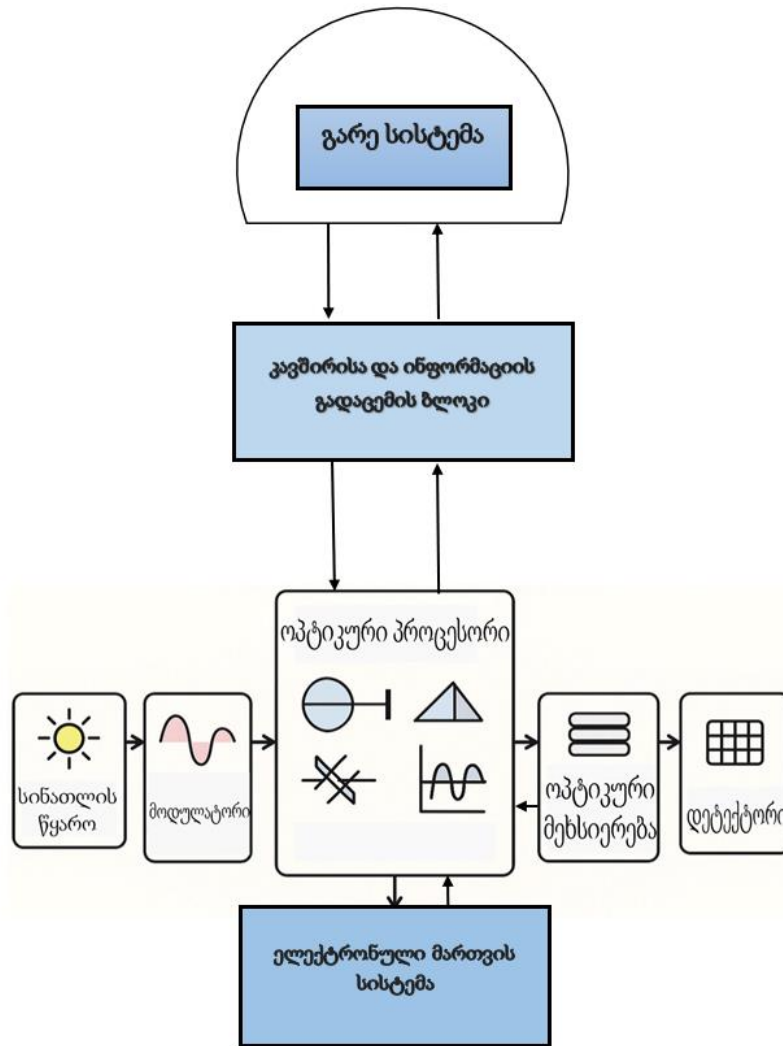
განვიხილოთ თუ რატომ და რის გამო არის დღეს ოპტიკური კომპიუტერები აქტუალური დამუშავებისა და შექმნის თვალსაზრისით: უპირველეს ყოვლისა უნდა აღინიშნოს, რომ მათში ინფორმაციის გადატანა ხდება ფოტონების მოძრაობის შედეგად სინათლის სიჩქარით, რაც საშუალებას იძლევა მოხდეს მათში ინფორმაციის დამუშავება და გადაცემა პრინციპულად უფრო მაღალი სიჩქარით, ვიდრე ეს შესაძლებელია ელექტრონულ კომპიუტერებში; მინიმალურია ენერგიის დანაკარგები, რადგან ფოტონები არ ათბობენ (ახურებენ) მასალებს ისე როგორც ელექტრონები; შესაძლებელია მონაცემების პარალელური დამუშავება, რადგან სინათლეს შეუძლია ერთდროულად გამოიყენოს რამდენიმე საინფორმაციო არხი - ტალღის სიგრძის, ფაზის, პოლარიზაციის მიხედვით, ეს იძლევა ინფორმაციის დამუშავების ბუნებრივი პარალელიზმის საშუალებას, რაც მიუღწეველია ელექტრონული კომპიუტერების შემთხვევაში; თავსებადობა ოპტიკურ კავშირთან, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია, რადგან დღეს გლობალური ქსელის დიდი ნაწილი (ინტერნეტი, ტელეკომუნიკაცია) უკვე მუშაობს ოპტიკურ ბოჭკოზე; ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებების არარსებობა, რაც უმნიშვნელოვანესი გამოწვევაა კავშირისა და ნავიგაციის სისტემებში. ყოველივე ამის მიღწევა კი შესაძლებელია ოპტიკური გამოთვლების მეთოდებისა და მათი კომპონენტების წარმატებით დამუშავების და სრულყოფის გზით, რასაც დღეს განსაკუთრებულად დიდი ყურადღება ეთმობა [2,3,4].

ოპტიკური კომპიუტერის მუშაობის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია სურ. 1-ზე.

ოპტიკური კომპიუტერის სტრუქტურაში გაერთიანებული თითოეული ბლოკი ასრულებს განსაზღვრულ ფუნქციას.

სინათლის წყარო (ლაზერი, შუქდიოდი) გენერირებს კოჰერენტულ გამოსხივებას, ქმნის მძლავრ, სტაბილურ ფოტონების ნაკადს, რომელიც წარმოადგენს ინფორმაციის მატარებელს.

შეტანის ბლოკში (ოპტიკური მოდულატორები) ხდება ელექტრონული სიგნალებით წარმოდგენილი დასამუშავებელი მონაცემების ზედდება სინათლეზე და მათი შეტანა კომპიუტერში. შედეგად ხდება ელექტრონული სიგნალების სინათლის სიგნალებში გადაყვანა (იცვლება სინათლის ინტენსივობა, ფაზა, ტალღის სიგრძე ან პოლარიზაცია), რაც ნიშნავს, რომ ციფრული „0“ და „1“ გარდაიქმნებიან სინათლურ მდგომარეობაში.



სურ. 1 ოპტიკური კომპიუტერის მუშაობის პრინციპული სქემა

ოპტიკურ პროცესორში მონაცემები მიეწოდება სინათლის სახით. ხდება მათი დამუშავება სხვადასხვა ოპტიკური ელემენტების საშუალებით, რომლებშიც ფოტონების ფიზიკური თვისებები (ინტერფერენცია, დიფრაქცია, პოლარიზაცია) ახორციელებს გამოთვლებს. თითოეულ ოპტიკურ ელემენტს აკისრია განსაზღვრული ფუნქციის შესრულება, კერძოდ: ლინზები და პრიზმები ახორციელებს ფურიეს გარდაქმნებს გამოსახულებისა და სიგნალების ანალიზისათვის; ინტერფერომეტრები ახდენს სიგნალების შეკრებას და გამოკლებას, რითაც ახორციელებს არითმეტიკულ ოპერაციებს ინტერფერენციის საშუალებით; ოპტიკური გისოსები ანაწილებს შესასვლელი სიგნალის ფართო სპექტრს არხებზე ტალღის სიგრძის მიხედვით, რაც უზრუნველყოფს მონაცემების მულტიპლექსირებას და დემულტიპლექსირებას; ტალღაგამტარები გამოიყენება

როგორც კავშირის ხაზები ოპტიკური პროცესორის შიგნით და ანაწილებს (მიმართავს) სიგნალებს გამოთვლითი კვანძებისკენ; ფოტონური ჩიპები ერთ კრისტალზე აერთიანებს ტალღამატარებს, გისოსებს, რეზონატორებს, მოდულატორებს, დეტექტორებს, ასრულებს მარშრუტიზაციას და მატრიცულ ოპერაციებს; არაწრფივ კრისტალებში სინათლის ტალღები ურთიერთქმედებს ერთმანეთთან და იძლევა საშუალებას აგებულ იქნეს ოპტიკური ლოგიკური ელემენტები და შესრულდეს ლოგიკური ოპერაციები („და“, „ან“, „არა“). ოპტიკურ პროცესორში ყველაფერი ეს მიმდინარეობს პარალელურად და სინათლის სიჩქარით.

ოპტიკური მეხსიერება რეალიზებულია ჰოლოგრაფიული მეხსიერებისა და ფოტოქრომული შრეების საშუალებით.

ჰოლოგრაფიული მეხსიერება დაფუძნებულია სინათლის ინტერფერენციის მოვლენაზე, ხდება ორი ლაზერული კონის გადაკვეთა ფოტომგრძნობიარე კრისტალში (მაგალითად, LiNbO_3 - ლითიუმის ნიობატი). გადაკვეთის ადგილზე წარმოიშობა ინტერფერენციული სურათი თავისებური „სამგანზომილებიანი მესერი“, სადაც იწერება ინფორმაცია (3D-ჩაწერა). მონაცემები შეინახება კრისტალის მოცულობაში და არა მხოლოდ მის ზედაპირზე, რაც იძლევა საშუალებას ჩაწერილ იქნეს ინფორმაციის უზარმაზარი მოცულობა ინტერფერენციული სურათების სახით ლაზერის ტალღის სიგრძისა და დაცემის კუთხის ცვლილებით. ჰოლოგრაფიული მეხსიერების თვისებების გამოყენება ოპტიკურ კომპიუტერებში განაპირობებს მონაცემების დიდი ბაზების (გიგაბაიტებით და ტერაბაიტებით) შენახვას კრისტალზე, უზრუნველყოფს სწრაფ პარალელურ დაშვებას მონაცემებთან და განსაკუთრებით სასარგებლოა სახეების ამოცნობის, გამოსახულებების დამუშავების და ხელოვნური ინტელექტის ამოცანების გადაწყვეტისათვის.

ოპტიკურ კომპიუტერში ფოტოქრომული შრეებით ოპტიკური მეხსიერების წარმოდგენა დაფუძნებულია ფოტოქრომიზმის პრინციპზე, რაც გულისხმობს ზოგიერთი არაორგანული მასალების - გარდამავალი ლითონების და მათი კომპლექსების თვისებას შეიცვალოს ოპტიკური თვისებები და ფერი სინათლის სხვადასხვა სიგრძის ტალღებით დასხივების შედეგად. ეს განსაკუთრებულია შეიძლება გამოყენებულ იქნეს „0“ და „1“ კოდირებისათვის - შრე „ბნელდება“ ნიშნავს „0“-ის კოდირებას, შრე „ნათდება“ კი „1“-ის კოდირებას. ოპტიკური მეხსიერების ეს სახე ოპტიკურ კომპიუტერში გამოიყენება როგორც ბუფერული ან დროებითი მეხსიერება შუალედური მონაცემების შესანახად გამოთვლების შესრულების დროს.

გამოტანის ბლოკში დეტექტორების საშუალებით გამოსასვლელი სინათლური სიგნალები გარდაიქმნებიან უკან ელექტრულში, რომელიც შეიძლება გაიზომოს და დამუშავდეს სტანდარტული სისტემებით. მაგალითად, ფოტოდიოდები აფიქსირებენ სინათლის ინტენსივობას და გადაჰყავთ ის ციფრულ კოდში.

მართვის სისტემა ელექტრონულია. კოორდინაციას უწევს ოპტიკური ბლოკების მუშაობას (მონაცემების მიწოდება, ლაზერების და მოდულატორების რეგულირება, ოპერაციების სინქრონიზირება).

კავშირისა და ინფორმაციის გადაცემის ბლოკის საშუალებით ხორციელდება ინფორმაციის გაცვლა გარე გამოთვლით სისტემებთან კავშირის ბოჭკოვან-ოპტიკური ხაზებით.

ოპტიკურ და ელექტრონულ კომპიუტერებს შორის არსებითი განსხვავება ძირითადი მახასიათებლების მიხედვით შეიძლება წარმოდგინდეს ასეთი სახით:

პარამეტრი	ელექტრონული კომპიუტერი	ოპტიკური კომპიუტერი
ინფორმაციის მატარებელი	ელექტრონები	ფოტონები
გადაცემის სიჩქარე	ასეულ გიგა ჰერცამდე	პოტენციურად ტერა ჰერცამდე და უფრო მაღალი
პარალელურობა	შეზღუდულია არქიტექტურით	ბუნებრივი (სინათლის მრავალი არხი)
ენერგომოხმარება	მაღალი	ძალიან დაბალი
გადახურება	სერიოზული პრობლემა	თითქმის არ არსებობს
ოპტიკურბოჭკოსთან შეთავსებადობა	არა	სრული
ტექნოლოგიის სრულყოფის ხარისხი	მაღალი	აქტიური კვლევების ეტაპზე

რაც შეეხება ოპტიკური კომპიუტერების გამოყენებას ავიაციაში ეს სამომავლოდ ნამდვილად გამოიწვევს რადიკალურ ცვლილებებს. ოპტიკური კომპიუტერებისთვის პერსპექტიულ საავიაციო ამოცანებს წარმოადგენს: ახალი თაობის ფრენის მართვის სისტემების რეალიზაცია; მრავალრიცხოვანი სენსორებიდან მონაცემების დამუშავება რეალურ დროში; გამოსახულებების (ვიდეონაკადების) დამუშავება და ანალიზი; ნავიგაცია და ავტონომიური პილოტირება; კავშირი და მონაცემების გადაცემა; სიმულატორები და საავიაციო ტექნიკის დაპროექტება [1].

ახალი თაობის ფრენის მართვის სისტემების რეალიზაცია. დღეს საჰაერო ხომალდები ფრენის მართვის სისტემებში იყენებენ მართვას ელექტრული სიგნალებით. მომავალში კი ოპტიკურ კომპიუტერებში შესაძლებელი იქნება მართვა განხორციელდეს ოპტიკური არხების საშუალებით,

რაც გამოიწვევს ბრძანებების მყისიერ გადაცემას, ელექტრომაგნიტური დაბრკოლებებისგან დაცვას და საიმედოობის ამაღლებას.

მრავალრიცხოვანი სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციის დამუშავება რეალურ დროში. თანამედროვე თვითმფრინავები აღჭურვილია ათასობით გადამწოდისგან. ოპტიკურ კომპიუტერებს შეეძლება შეასრულონ ყველა გადამწოდიდან მიღებული მონაცემების დიდი მასივების ანალიზი მყისიერად, აღმოაჩინონ ანომალიები ან მოწყობილობების მტყუნებები ავარიული სიტუაციის გაჩენამდე (პროგნოზული დიაგნოსტიკა), იმუშაონ რეალური დროის რეჟიმში ინფორმაციის უზარმაზარი ნაკადების დროს.

გამოსახულებების (ვიდეონაკადების) დამუშავება და ანალიზი. პილოტირებადი და უპილოტო საფრენი აპარატებისთვის ეს მთავარი ფუნქციაა და გულისხმობს კამერებიდან და რადარებიდან მიღებული გამოსახულებების მყისიერ დამუშავებას; ობიექტების ამოცნობას; ოპტიკური მონაცემების მიხედვით ნავიგაციას ამინდის რთულ პირობებში და ცუდი ხილვადობის დროს.

ნავიგაცია და ავტონომიური პილოტირება. ფოტონური და კვანტური სენსორების შერწყმით შესაძლებელია სრულად ავტონომიური საავიაციო სისტემების შექმნა, რომელთაც შეეძლება დამოუკიდებლად მიიღონ გადაწყვეტილებები ფრენის დროს, გამოთვალონ ოპტიმალური მარშრუტი მეტეოროლოგიურ პირობების, ტურბულენტურობის და საჰაერო სივრცის შეზღუდვის პირობებში.

კავშირი და მონაცემების გადაცემა. ოპტიკურ კომპიუტერებს შეუძლიათ უზრუნველყონ ოპტიკური (ლაზერული) კავშირი თვითმფრინავებსა და თანამგზავრებს შორის, მოახდინონ მონაცემების მაღალსიჩქარული გაცვლა რადიოდაბრკოლებების გარეშე.

სიმულატორები და საავიაციო ტექნიკის დაპროექტება. ოპტიკური გამოთვლითი სისტემების საშუალებით შესაძლებელი იქნება შეიქმნას რეალისტური აეროდინამიკური სიმულაციები მილიარდობით ცვლადებით, დაჩქარდება ახალი თვითმფრინავების დამუშავება საჰაერო ნაკადების და სხვა პარამეტრების მოდელირების საშუალებით.

ფოტონიკის, გამოთვლითი ტექნიკის და ავიაციის სფეროებში მოღვაწე და მომუშავე მეცნიერებისა და სპეციალისტების აზრით პერსპექტივაში უახლოესი მომდევნო 20 – 25 წლის განმავლობაში მართვის საავიაციო სისტემები, ნავიგაცია და კავშირი გახდება ფოტონური, დამუშავდება ახალი თაობის უპილოტო საფრენი აპარატები, რომლებიც მთლიანად მართვადი იქნებიან ოპტიკური გამომთვლელებით.

დასკვნა

ოპტიკური კომპიუტერების დამუშავება წარმოადგენს გამოთვლითი ტექნიკის ევოლუციაში ერთ - ერთ ყველაზე უფრო მნიშვნელოვან მიმართულებას. ასეთ სისტემებს შეეძლება შეასრულონ ინფორმაციის დამუშავების სიჩქარის გიგანტურად გაზრდა, ენერგომოხმარების მნიშვნელოვანი შემცირება და გამოთვლების ახალი არქიტექტურის შექმნა.

მიუხედავად დღეს არსებული ტექნოლოგიური სიძნელებისა, სამეცნიერო კვლევები ფოტონური სქემების, ჰოლოგრაფიული მეხსიერების და ოპტიკური ლოგიკური ელემენტების სფეროში იძლევა იმის მტკიცების საშუალებას, რომ ოპტიკური კომპიუტერების დამუშავება და გამოყენება უდაოდ გახდება XXI საუკუნის გამოთვლითი ტექნიკის განვითარების ერთ - ერთ ძირითად და პრიორიტეტულ მიმართულებას, რომლის საშუალებით შესაძლებელი იქნება აქტუალური რთული საავიაციო ამოცანების წარმატებით გადაწყვეტა.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. დ.ვეფხვაძე. საბორტო კომპიუტერები და ინფორმაციული სისტემები, ლექციების კურსი. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, 2023. -391 გვ.
2. Pradita Maiti, Koushik Sarkar, Sudipta Banerjee. “An Overview of Optical Computing and its components : From History to modern AI application“ , LAP Lambert Academic Publishing, 2025, - 120 p.
3. Tyler Fisher, “Optical Computing”, Arcler Press, 2015.
4. H. Arsenault, T.Szoplik,, B. Macukow. “ Optical processing and Computing”. Academic Press, 2012, - 508 p.
5. Степаненко С. А. Фотонный компьютер: структура и алгоритмы, оценки параметров. Фотоника, Выпуск №7 / 2017.
6. Плюсин М.А. Особенности полностью оптических компьютеров, [https:// science forum. ru /2021/article /2018024708](https://scienceforum.ru/2021/article/2018024708).
7. Оптический компьютер : Описание, принцип работы, преимущества. abc – import.ru 07.12. 2018.

Optical computers and their application prospects in aviation

Demur Vepkhvadze

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The paper discusses the main problems of modern electronic computers in terms of the speed of signal propagation in them, the physical limit of transistor miniaturization, and power consumption. The principle scheme and principle of operation of an optical computer are given, and an analysis of the operation of its individual blocks is given. Based on the discussion of the main problems of electronic computers, the possibilities of solving these problems in the case of using optical computers are shown, a comparative characterization of optical computers with electronic computers is given, and the advantages of optical computers over them are shown. The prospects for the development and use of optical computers are assumed. The possibilities and principles of successfully solving a number of aviation tasks in the case of using optical computers in aviation are proposed.*

Keywords: *optical computer, photon, interference, holographic memory, optical sensor.*

Paradigmatic Ambiguity in Flight Deck Communication

Tea Vepkhvadze

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *In aviation communication, where accuracy and safety are crucial, any slight variation in words can have severe operational implications. This paper addresses paradigmatic ambiguity — a type of semantic ambiguity arising due to the substitutability of words within the same syntactic slot — in aviation communication. Based on paradigmatic semantics theories and pragmatic linguistics, this study investigates lexical substitutions, near-synonyms, and terminological overlaps as miscommunication causes between air traffic controllers and pilots. The study uses examples from ICAO phraseology, aviation manuals, and actual incidents to demonstrate how language choices may cause different interpretation and operational failure. It further argues that while controlled language in aviation reduces semantic vagueness, non-standard or everyday lexical substitution is a pragmatic hazard, especially under catastrophic or emergency circumstances. The article ends by proposing solutions by way of more rigorous lexical field control, targeted training in semantic awareness, and on-line communication surveillance. This interdisciplinary analysis weaves together linguistic theory and aerial safety and offers practical solutions derived from paradigmatic structure and pragmatic deployment.*

Keywords: *Air communication, paradigmatic ambiguity, Controlled Natural Language (CNL), ICAO phraseology, semantic-pragmatic analysis.*

In the complex and high-stakes environment of aviation, language plays a critical role in ensuring operational safety. Pilots, air traffic control officers (ATCOs), and flight dispatchers rely heavily on verbal communication, and any deviation from standard phraseology can introduce ambiguity with potentially severe consequences. Aviation language is not limited to be a communication tool, it is a lifeline. To counteract ambiguity, the International Civil Aviation Organization (ICAO) mandates the use of controlled language—predefined, standardized phraseology designed for clarity and brevity (ICAO, 2016). This controlled language reduces syntactic complexity and limits vocabulary to prevent confusion arising from synonymous or ambiguous word choices. However, even within this constrained linguistic framework, the possibility of paradigmatic substitution persists. One of the sources of possible communication failure originates from paradigmatic uncertainty — semantic uncertainty triggered by lexical substitution of words associated in one lexical slot.

Paradigmatic ambiguity arises from the substitutability of lexical items that occupy the same syntactic slot but differ in meaning, formality, or pragmatic interpretation. As de Saussure (1916) posited in his foundational theory of semiotics, language functions through a system of signs arranged paradigmatically and syntagmatically. The paradigmatic axis comprises sets of words that can be alternated without changing the grammatical structure of a sentence but often altering its semantic nuance (Halliday & Hasan, 1976).

In aviation, where message interpretation must be immediate and unambiguous, such alternations can compromise communication efficacy. For instance, replacing the standard phrase "Climb to FL310" with "Ascend to FL310" may appear benign but introduces terminology unfamiliar to some non-native English-speaking pilots, potentially leading to delayed comprehension or misinterpretation. Consider the two following statements as well:

(1) "Descend and maintain flight level two eight zero." (2) "Descend and hold at two eight zero."

Both sentences might superficially sound similar, but they trigger radically different processes. The difference is in the paradigmatic switch between *maintain* and *hold*, each of which carries unmistakable operating connotations. These sorts of word substitutions, if poorly known or not codified, can induce confusion, hesitation, or even lethal errors.

In everyday usage, paradigmatic variation adds variety. In high-stakes communication areas like aviation, though, this type of variation can be hazardous. A paradigmatic error is not simply a matter of grammar — it is often a semantic error with safety consequences.

Semantic ambiguity is the circumstance where a linguistic term accommodates more than one meaning. In aviation, ambiguity could occur from:

- Polysemy (one word with numerous meanings)
- Homonymy (two different words with the same form)
- Near-synonymy (different words with close meanings)
- Ellipsis or omission

Paradigmatic ambiguity is particularly dangerous since the substituting word appears correct grammatically and often becomes considered synonymous by non-native, or less able, speakers. The problem intensifies under stress, fatigue, or in the event that speakers operate within a multilingual setting with various strengths in English competence.

Pragmatically, communication meaning depends on context, speaker intent, shared knowledge, and conventional expectation. Even if a word is semantically appropriate in itself, it can be pragmatically unsuccessful if:

- diverges from normal ICAO usage

- results in delayed interpretation
- is inconsistent to the operational context

Here is an exchange:

ATC: "Maintain heading one eight zero." Pilot: "Turning one eight zero."

The phrase turning implies action, not stabilization. The paradigmatic substitution by the pilot might demonstrate understanding but pragmatically contravenes rule of response and potentially results in confusion in busy airspace.

Aviation English has been defined as a Controlled Natural Language (CNL) — a pre-fixed variety of English with limited lexicon, pre-fixed patterns, and low ambiguity. ICAO phraseology strives to eliminate paradigmatic variation by stipulating pre-fixed phrases (e.g., "Climb and maintain.", "Cleared for takeoff") and banning informal substitution.

Despite this, field studies (e.g., Prinzo et al., 2008) show that natural language frequently intrudes into radio telephony.

Pilots and controllers use non-standard expressions such as: "We're good for departure" instead of "Ready for takeoff"; "We're holding at alpha" instead of "Holding short of runway at taxiway A". These deviations often involve paradigmatic substitution that compromises the clarity and safety.

Aviation language is not a lexicon of words—it is a form dictated by function, operating need, and mental economy. Standard phraseology was promulgated by ICAO to meet the communications needs of aviation operations under stressful and high workload conditions. Phrases are chosen not merely for clarity, but also for brevity, absence of ambiguity, and international understandability.

In this system, words and phrases are assumed to be within narrow semantic fields. For example, in the altitude control field, words like "climb," "descend," "maintain," and "level off" all function in the context of a strongly controlled paradigmatic set. Replacement of one word with another—especially with informal or non-serious terminologies—can lead to ambiguity with serious ramifications in the real world.

Following are the subsequent examples taken from actual communication transcripts:

"Climb to one zero thousand" vs. "Ascend to ten thousand"; "Cleared for the approach" vs. "You're good for landing".

Both sets of phrases are functionally equivalent, but the subsequent terms (ascend, you're good) introduce paradigmatic variation that will not automatically be understood or expected in critical radio communications. Misinterpretation in this case can lead to aircraft entering controlled airspace without authorization or to a different runway being approached.

In addition, the design of aviation language involves designed redundancy. Thus, "Climb and maintain" is to be used instead of the straightforward "Climb" because it establishes a first action and a leveling instruction. Replacing one component of such a statement degrades this functional redundancy, causing increased risk of error.

In this regard, paradigmatic ambiguity tends to result not from gaps in vocabulary, but from lexical overconfidence—whereby speakers and writers assume their substitutions are like the originals when they are not.

Aviation discourse, and especially flight deck and air traffic control speech, is transactional, time-constrained, and often subject to external pressure from noise, workload, and stress. It is here that paradigmatic ambiguity is most risky.

Let us take two ATC discourse extracts:

ATC: "Cleared to cross runway two-seven at echo."

Pilot: "Crossing two-seven at echo."

Routine stuff. But:

ATC: "Hold short of runway two-seven."

Pilot: "Stopping short of runway two-seven."

While the second response is semantically accurate relative to the instruction, the expression "stopping short" is a paradigmatic replacement for "hold short"—though not official, and in some versions might not trigger an automated acknowledgement or logging function.

In another case:

ATC: "Report established on the localizer."

Pilot: "We are on the beam."

"On the beam" is a colloquialism, previously common in military aerial operations but today largely obsolete in civilian flying. The paradigmatic replacement is not required and is confusing, and can result in follow-up queries for explanation, adding to traffic on the airwaves.

The same type of deviation shows how unorthodox paradigmatic options can confuse potential expectations, slow response, or create operational distinctions. These accumulate when communication is being conducted interculturally or interlingually.

The next part of this essay addresses recorded case studies and actual events in which paradigmatic vagueness has been the focus.

Tenerife Airport Disaster (1977)

One of the best-known examples of communication failure in aviation was the Tenerife Airport Disaster, where two Boeing 747s crashed into each other on the runway, resulting in 583 passengers and

crew being killed. While there were numerous contributing causes to the accident, such as bad weather and congestion, one significant factor was lexical miscommunication.

The KLM pilot responding to ATC's "Stand by for takeoff" with "We are now at takeoff" employed a paradigmatic form outside the usual "Ready for takeoff" or "Cleared for takeoff." ATC and the flight engineer were unable to understand this phrase, syntactically acceptable but never previously having had a plain ordinary operational sense and causing a fatal misunderstanding.

Avianca Flight 52 (1990)

In this crash, Avianca 52 pilots failed to unambiguously declare a fuel emergency to ATC. Pilots used indirect paradigmatic alternatives such as "running low on fuel" instead of the expected "Mayday" or "Minimum fuel." Controllers were not used to the gravity involved with the use of the former and failed to clear the flight for landing. Such semantic vagueness resulted in fuel exhaustion and a crash off JFK Airport, with 73 fatalities.

Singapore Airlines Flight 006 (2000)

At takeoff while the plane was in typhoon weather at Taipei airport, the aircraft inadvertently tried to take off from a shut runway. Pilots read back messages with imprecise and non-standard wording. Internal crew communication, for instance, used terms such as "That should be it" and "Looks okay," which were paradigmatic approximations and not positional certainty confirmation. These lexical selections indicate the decline of terminological exactness in the midst of high-pressure situations.

Cushing's (1994) and more recent work by Barshi & Farris (2013) indicate a tendency among non-native English-speaking pilots to employ synonymous phrases that are semantically the same but operationally distinct. These are illustrated as follows: "Go ahead" instead of "Say again"; "Takeoff speed reached" instead of "V1".

Such paradigmatic variants are more liable to be misunderstood in multilingual environments, especially if the controller is requiring precise ICAO phraseology. Paradigmatic ambiguity cannot be understood apart from an analysis of its pragmatic significance—how language is deployed in interaction and how meaning is created through mutual expectation.

Speech act theory provides a useful lens through which to analyze flight deck communication. A command such as "Descend and maintain FL180" carries the illocutionary force of a directive. If a pilot replies with "We're descending to 180," this is pragmatically acceptable. However, if the reply is "We're starting down," the illocutionary intent becomes vague. The paradigmatic substitution weakens the intended directive response, increasing the potential for misalignment.

Grice's maxims of quantity, quality, relation, and manner of conversation are constantly being violated in air traffic communication. Controllers in high-density situations require answers that are brief, sincere, relevant, and transparent. Pilots' use of paradigmatic substitutes (e.g., "Looks good" instead of "Cleared to land") violates the maxim of manner by introducing ambiguity and personal inference.

Conclusion

Effective communication in aviation is critical for safety, operational efficiency, and situational awareness. This study demonstrates that even minor deviations from standardized ICAO phraseology—through paradigmatic substitution or lexical variation—can introduce semantic and pragmatic ambiguity with potentially severe consequences. Controlled Natural Language and pre-defined phraseology provide a robust framework for reducing such risks, yet natural language intrusions, stress, fatigue, and multilingual environments continue to challenge clarity.

Historical accidents, including the Tenerife Airport Disaster, Avianca Flight 52, and Singapore Airlines Flight 006, highlight the lethal consequences of imprecise communication and the failure to adhere strictly to prescribed terminology. Paradigmatic ambiguity, by allowing seemingly correct alternatives that diverge in operational meaning, underscores the importance of rigorous training, consistent enforcement of ICAO phraseology, and real-time monitoring of communications.

In sum, harmonizing linguistic theory with operational practice emphasizes that language in aviation is not merely a tool, but a lifeline. Minimizing paradigmatic ambiguity enhances pilot-controller alignment, ensures prompt comprehension, and sustains the highest standards of safety in increasingly complex and international airspace operations.

References:

1. Barshi, Immanuel, and Christine Farris. *Aviation Communication: Language and Culture in the Cockpit*. Farnham, UK: Ashgate Publishing, 2013.
2. Cushing, Steven. "Language Use in Aviation: The Effects of Non-Native English on Safety." *Journal of Air Transport Studies* 5, no. 1 (1994): 45–62.
3. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Manual on Radiotelephony*. Doc 9432 AN/925. Montreal: ICAO, 2007.
4. Prinzo, O. Veronika, et al. "Controlled Language and Aviation Safety: The Role of Standard Phraseology in Flight Deck Communication." *International Journal of Aviation Psychology* 18, no. 3 (2008): 243–260.
5. Searle, John R. *Speech Acts: An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge: Cambridge University Press, 1969.
6. Yule, George. *Pragmatics*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1996.

თეა ვეფხვაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი 16, თბილისი, საქართველო, 0103

რეზიუმე: საავიაციო კომუნიკაციაში, სადაც უსაფრთხოება და სიზუსტე უმთავრესია, თუნდაც მცირედმა გადაცდომამ და არასწორად შერჩეულმა ლექსიკურმა ერთეულმა, შესაძლოა კატასტროფულ შედეგამდეც კი მიგვიყვანოს. მოცემული კვლევა ეხება პარადიგმატულ ბუნდოვანებას, სემანტიკური მრავალმნიშვნელოვნების სახესხვაობას, რომელიც წარმოიშობა სიტყვების ერთი და იმავე სინტაქსურ პოზიციაში პარადიგმატული ჩანაცვლების შედეგად და იკვლევს მის როლს საჰაერო კომუნიკაციის პროცესში. პარადიგმატული სემანტიკის თეორიებსა და პარადიგმატული ლინგვისტიკის საფუძველზე დაყრდნობით, წინამდებარე კვლევა სწავლობს მნიშვნელობით მონაცვლე ლექსიკურ ერთეულებს, პარადიგმატულ სინონიმებსა და ტერმინოლოგიურ გადაკვეთებს, როგორც ბუნდოვანი კომუნიკაციის გამომწვევ ფაქტორებს ავიაშემთხვევებისა და მფრინავებს შორის. კვლევაში განხილულია ICAO-ს ფრაზეოლოგიის, ავიაციის ოპერაციული სახელმძღვანელოებისა და რეალური შემთხვევების მაგალითები, რათა ვაჩვენოთ, რომ სიტყვების არასტანდარტული გამოყენება ქმნის განსხვავებულ ინტერპრეტაციებს და იწვევს ოპერაციულ შეცდომებს. ხაზგასმულია, რომ სტანდარტიზებული ენა მნიშვნელოვნად ამცირებს სემანტიკურ ბუნდოვანებას. ამიტომაც, სტანდარტიზებული ფრაზების არასტანდარტული ან ყოველდღიური ლექსიკით ჩანაცვლება დიდ საფრთხეს წარმოშობს, განსაკუთრებით, კი საგანგებო სიტუაციების დროს. სტატიაში შემოთავაზებულია პრევენციული მეთოდები, როგორებიცაა ლექსიკური ველების მკაცრი კონტროლი, სემანტიკური ცნობიერების გაძლიერების ტრენინგები და კომუნიკაციის რეალურ დროში ზედამხედველობა. ეს დისციპლინათმორისი კვლევა აკავშირებს ენათმეცნიერულ თეორიასა და ავიაციის უსაფრთხოებას, გვთავაზობს პრაქტიკულ რეკომენდაციებს, რომლებიც პარადიგმატულ სტრუქტურებსა და პრაგმატულ მიდგომებზეა დაფუძნებული.

საკვანძო სიტყვები: საჰაერო კომუნიკაცია, პარადიგმატული ბუნდოვანება, სტანდარტიზებული ენა, ICAO-ს ფრაზეოლოგია, სემანტიკურ-პრაგმატული ანალიზი.

ვერტმფრენის ტიპის უპილოტო საფრენი აპარატის პროექტი

ბეჟან ჯიქია¹, ცეზარი გაბამე²

^{1, 2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია ტანდემური სქემის მქონე უპილოტო ვერტმფრენის კონცეფცია, მისი ტექნიკური და კონსტრუქციული თავისებურებები. აღნიშნული სქემა გამოირჩევა სტაბილურობით, გაზრდილი ამწეობით და ბრუნვითი მომენტის შიდა ბალანსით, რაც საშუალებას იძლევა შეიქმნას კომპაქტური, ენერგოეფექტური და მრავალფუნქციური საფრენი სისტემა. აპარატის მოდულური არქიტექტურა, კომპოზიტური მასალების გამოყენება და ელექტროძრავზე დაფუძნებული სისტემა უზრუნველყოფს საიმედო და დაბალხმაურიან მუშაობას. ტანდემური სქემის უპილოტო საფრენი ვერტმფრენი (UAV) ოპტიმალურია ლოგისტიკური, სამაშველო და სადაზვერვო ამოცანების შესრულებისთვის რთულ რელიეფსა და მეტეოროლოგიურ პირობებში. ჩატარებული ანალიზი ადასტურებს, რომ ტანდემური სქემის ინტეგრაცია უპილოტო სისტემებში წარმოადგენს პერსპექტიულ მიმართულებას თანამედროვე ავიაკონსტრუქციების განვითარებაში.

საკვანძო სიტყვები: ტანდემური სქემა, უპილოტო საფრენი აპარატი, ტვირთამწეობა, კომპლექსური მართვა.

შესავალი

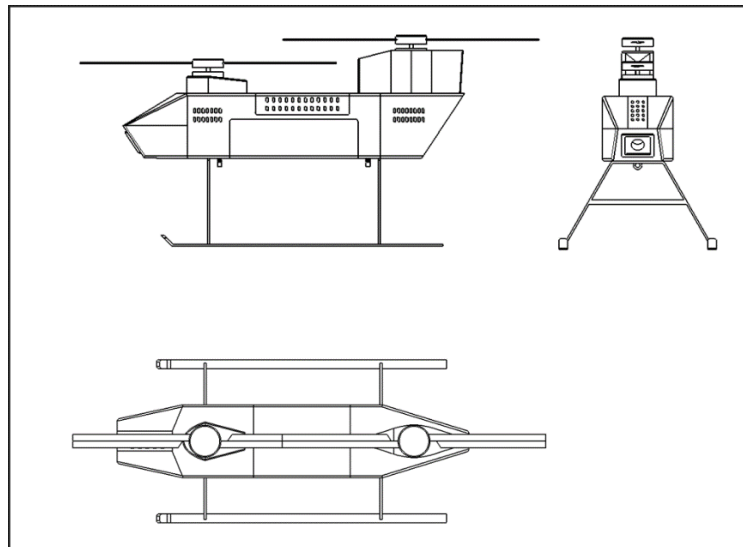
თანამედროვე ავიაკონსტრუქციების განვითარების ტენდენცია მჭიდროდ არის დაკავშირებული უპილოტო საფრენი აპარატების გავრცელებასთან. სხვადასხვა კლასის დრონები წარმატებით გამოიყენება როგორც სამოქალაქო, ისე სამხედრო სფეროებში. მიუხედავად ამისა, ტვირთის გადაზიდვის, სამიზნო-სამაშველო და რთულ მეტეოროლოგიურ პირობებში გამოყენებისათვის, საჭირო ხდება უფრო გამძლე და მძლავრი აპარატების შექმნა, რომლებიც უპირატესობას მიანიჭებენ ვერტმფრენულ სქემას ფიქსირებული ფრთის აპარატებთან შედარებით.

ტანდემური სქემის ვერტმფრენები გამოირჩევიან განსაკუთრებული სტაბილურობით და მაღალი ამწეობით, რაც მათ იდეალურ კანდიდატებად აქცევს სატრანსპორტო და ლოგისტიკური ამოცანების შესასრულებლად. ამ კონცეფციის ინტეგრაცია უპილოტო საფრენ პლატფორმაში ქმნის ტექნოლოგიურ შესაძლებლობას, შეიქმნას კომპაქტური, მრავალფუნქციური და ენერგოეფექტური საფრენი სისტემა.

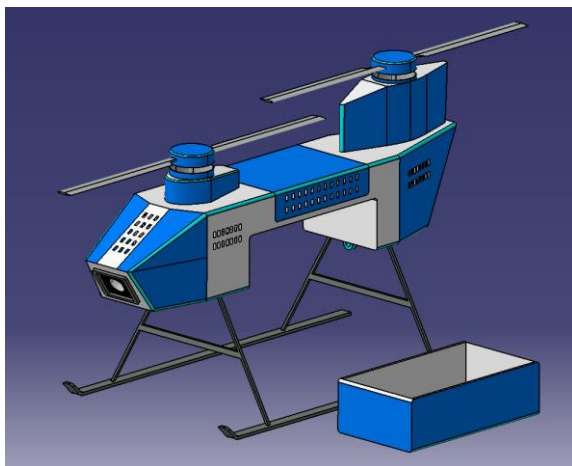
წარმოდგენილი ნაშრომის მიზანია ტანდემური სქემის მქონე უპილოტო ვერტმფრენის ტექნიკური და კონსტრუქციული თავისებურებების ანალიზი, მისი გამოყენების სფეროების განსაზღვრა და ოპტიმალური დიზაინის შესწავლა, რომელიც უზრუნველყოფს ეფექტურ მუშაობას სხვადასხვა ოპერაციულ პირობებში [1, 2, 3, 4, 5].

ძირითადი ნაწილი

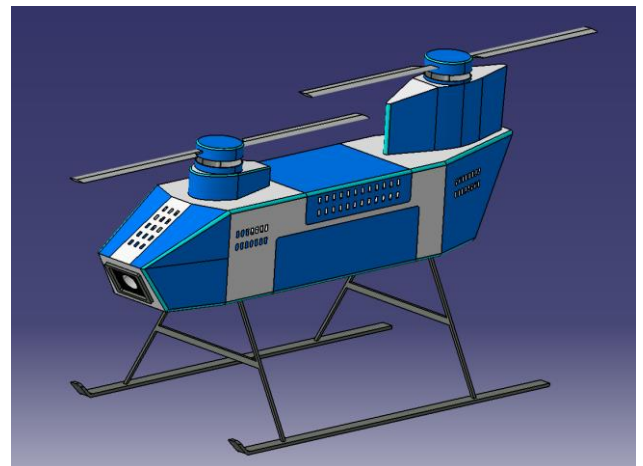
ვერტმფრენის ტანდემური სქემა (სურ.1 ა), ბ) გ)) წარმოადგენს ვერტმფრენის კონფიგურაციას, რომელშიც ორი მთავარი როტორი განლაგებულია გასწვრივ — წინა და უკანა ნაწილში. ორივე როტორი თანაბრად მონაწილეობს ამწევი ძალის წარმოქმნაში და, რაც მთავარია, ერთმანეთის ბრუნვითი მომენტის კომპენსაციას ახდენს, რის გამოც არ არის საჭირო ცალკე კუდის როტორი [7, 9].



ა)



ბ)



გ)

სურ.1 ტანდემური სქემის უპილოტო საფრენი ვერტმფრენი (UAV)

ამგვარი სქემის ძირითადი ტექნიკური მახასიათებლებია:

სტაბილურობა და ბრუნვის მომენტის ბალანსი: ორი ურთიერთსაწინააღმდეგოდ მბრუნავი როტორი უზრუნველყოფს ბრუნვითი მომენტის შინაგან ბალანსს. შედეგად, აპარატი უფრო სტაბილურად რეაგირებს მართვის ბრძანებებზე და საჭიროებს ნაკლებ ძალისხმევას სტაბილიზაციისთვის [8].

გაზრდილი ამწეობა: ორივე როტორი ქმნის ამწევ ძალას, რაც საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად გაიზარდოს ტვირთამწეობა ძრავების იმავე სიმძლავრის პირობებში. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია უპილოტო აპარატისთვის, რომელიც განკუთვნილია ლოგისტიკური ან სამაშველო დანიშნულებისთვის.

გრძივი განლაგების უპირატესობა: როტორების განლაგება გრძივ ღერძზე უზრუნველყოფს უკეთეს წონის განაწილებას და მინიმუმამდე ამცირებს ასიმეტრიულ აეროდინამიკურ ძალებს, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სწრაფი მოძრაობის ან ძლიერ ქარის პირობებში.

სტრუქტურული სიმარტივე სიჩქარის მიმართ: ტანდემური სქემა უკეთესად ეგუება ფრენის მაღალი სიჩქარის რეჟიმებს, ვინაიდან არ მოქმედებს ასიმეტრიული ძალის ეფექტი (რაც იწვევს ფლატერს კოაქსიალურ ან მონოროტორულ სქემებში).

ნაკლოვანებები, რომლებიც ასოცირდება ამ სქემასთან, მოიცავს:

გამძლეებული მექანიკური სინქრონიზაცია: ორივე როტორის მართვა და სინქრონიზაცია მოითხოვს უფრო რთულ გადაცემათა მექანიზმს ან ცალკე ელექტროძრავებს დამოუკიდებელი კონტროლით.

ზომათა ზრდა: აპარატის სიგრძე იზრდება როტორების განლაგების გამო, რაც აფერხებს მის გარკვეულ გამოყენებას, განსაკუთრებით მცირე სივრცეებში.

მართვის კომპლექსურობა: მართვის სისტემას სჭირდება დახვეწილი ალგორითმები ბრუნვის კოორდინაციისთვის, რაც რეალურ დროში დინამიკურ გათვლებს და მაღალი სიზუსტის სენსორებს მოითხოვს.

საერთო ჯამში, ტანდემური სქემა წარმოადგენს კომპრომისს ტვირთამწეობასა და სტრუქტურულ კომპლექსურობას შორის, რაც მას კონკურენტუნარიან ალტერნატივად აქცევს განსაკუთრებით იმ პირობებში, სადაც ტვირთის მოცულობა და სტაბილურობა პრიორიტეტულია [6].

ტანდემური სქემის უპილოტო ვერტმფრენის შექმნისას პრიორიტეტულად განიხილება ფუნქციური საიმედოობა, სტაბილურობა და მოდულურობა. აპარატის კონსტრუქცია ეფუძნება პრინციპს — მაქსიმალური ეფექტურობა მინიმალურ ზომებსა და წონაში.

უპილოტო ვერტმფრენი მოიცავს ორ მთავარ როტორს, რომლებიც განლაგებულია ტანდემურად ფიუზელაჟის წინა და უკანა ნაწილში. თითოეული როტორი იმართება დამოუკიდებელი ძრავით ან საერთო ენერგოაგრეგატით გადაცემათა მექანიზმების მეშვეობით. ასეთი განლაგება უზრუნველყოფს ბრუნვითი მომენტის შიდა ბალანსს და ფრენის დინამიკის გამარტივებას.

ვერტმფრენის ძალური დანადგარი არის ელექტრული ძრავა რომელიც უზრუნველყოფს დაბალ ხმაურსა და მცირე ტექნიკურ მომსახურებას.

უპილოტო აპარატი აღჭურვილია ინტეგრირებული ბორტული კონტროლერით, რომელიც ახდენს მართვის პროგრამული უზრუნველყოფას რეალურ დროში მონაცემების ანალიზს და არეგულირებს როტორების ბრუნვის სიჩქარეს, რითაც უზრუნველყოფს ფრენის სტაბილურობას და ტვირთის სწორად გადატანას დადგენილი მარშრუტით.

ფიზიკალური დამზადებულია მსუბუქი კომპოზიტური მასალებისგან (მაგ. კარბონის ბოჭკო), რაც ამცირებს საერთო წონას და ზრდის სიმტკიცეს.

ვერტმფრენის სტრუქტურა შედგება შემდეგი ძირითადი ელემენტებისგან:

- როტორული სისტემა (წინა და უკანა);
- ძრავის/ბატარეის განყოფილება;
- ელექტრონული მოდულების ბლოკი;
- ტვირთის პლატფორმა და სპეციალური საკიდები.

დიზაინი მოფიქრებულია ისე, რომ მოხდეს მისი სწრაფი ტექნიკური მომსახურება და მოდულების შეცვლა იყოს მაქსიმალურად ეფექტური.

ტანდემური სქემის უპილოტო ვერტმფრენის კონსტრუქცია და ტექნიკური პარამეტრები ქმნის ფართო შესაძლებლობებს სხვადასხვა დარგში მის ინტეგრირებისთვის. მაღალი ამწეობა, სტაბილურობა და ფრენის შედარებით ხანგრძლივი დრო, მნიშვნელოვან უპირატესობას ანიჭებს მას ტრადიციულ ერთხრახნიან (ანუ კლასიკული სქემა) ან კვადროკოპტერის ტიპის აპარატებთან შედარებით.

უპილოტო ტანდემური ვერტმფრენი ოპტიმალურია ტვირთის გადაზიდვისთვის ისეთ ლოკაციებზე, სადაც ჩვეულებრივი სატრანსპორტო საშუალებები ვერ აღწევენ:

- მთიანი და რთული რელიეფის ზონები;
- პლატფორმები ზღვაზე (ნავთობმომპოვებელი ობიექტები);
- პოსტკატასტროფული ზონები (მიწისძვრები, წყალდიდობები).

მოწყობილობა შეიძლება აღიჭურვოს სტანდარტიზებული კონტეინერების დამჭერით ან მორგებული ტვირთგადამტანი სისტემით. ეს ხელს უწყობს მიწოდების სისწრაფესა და სიზუსტეს, განსაკუთრებით ჰუმანიტარულ ოპერაციებში, სადაც კრიტიკულია დროში მოქმედება.

ტანდემური სქემის სტაბილურობა და მობილურობა საშუალებას იძლევა ვერტმფრენი გამოიყენონ:

- დაზარალებულების სამივლად და სამედიცინო ტვირთის გადაზიდვისთვის;
- დამწვარი ან დაზინძურებული ტერიტორიების ზედამხედველობისთვის;
- სამეთვალყურეო კამერებისა და სენსორების ტრანსპორტირებისთვის.

მოწყობილობის მაღალი მანევრულობა და ავტონომია მნიშვნელოვნად ზრდის რეაგირების ეფექტიანობას გადაუდებელ სიტუაციებში.

სამოქალაქო სფეროში იგი შეიძლება გამოყენებულ იქნას:

- ინფრასტრუქტურის მონიტორინგისთვის (ხიდები, ელექტროგადამცემი ხაზები, რკინიგზა);
- სოფლის მეურნეობაში (მცენარეთა მონიტორინგი, სასუქის დისტრიბუცია);
- ქალაქის ლოგისტიკაში (მაგ. პაკეტების სწრაფი მიწოდება დასახლებულ რაიონებში).

ტანდემური სქემის მქონე უპილოტო აპარატს გააჩნია შემდეგი პრაქტიკული უპირატესობები: მაღალი წონის ტვირთის გადაზიდვის უნარი მცირე ზომისა და წონის პირობებში, ფართო პლატფორმა ტვირთის მარტივად დასამაგრებლად, დაბალი ფრენის სიჩქარე სიზუსტის შესანარჩუნებლად (ჰაერში ერთ ადგილას გაჩერებისას) და ფუნქციონირება რთულ მეტეოროლოგიურ პირობებში, სადაც მსუბუქი დრონები მწყობრიდან გამოდის.

ტანდემური სქემის უპილოტო ვერტმფრენის კონცეფცია წარმოადგენს პერსპექტიულ მიმართულებას თანამედროვე ავიაკონსტრუქციების განვითარების პროცესში. აღნიშნული სქემის გამოყენება საშუალებას იძლევა ერთდროულად გაიზარდოს ტვირთამწეობა, სტაბილურობა და მანევრულობა, რაც მნიშვნელოვან უპირატესობას ქმნის სამოქალაქო დანიშნულების მისიის შესრულებისას.

მოწყობილობის მოდულური არქიტექტურა, მრავალფეროვანი ენერგოსისტემების ინტეგრირების შესაძლებლობა და ავტონომიური მართვის ალგორითმები უზრუნველყოფს მაღალი საიმედოობისა და ეფექტიანობის პლატფორმას. ლოგისტიკური ამოცანების შესრულებისას ტანდემური სქემა საშუალებას იძლევა დაფარვის მომსახურების არეალი გაიზარდოს, ხოლო დანახარჯები შემცირდეს, განსაკუთრებით რთულად მისადგომ რეგიონებში.

შესწავლილი მონაცემები აჩვენებს, რომ ტანდემური სქემის ინტეგრაცია უპილოტო სისტემებში შეიძლება გახდეს მნიშვნელოვანი ეტაპი ისეთი აპარატების შექმნისათვის, რომლებიც გამოირჩევა როგორც გამძლეობითა და ენერგოეფექტურობით, ასევე ფუნქციური მოქნილობით.

მომავალში შესაძლებელია ამ სისტემების კიდევ უფრო დახვეწა, მათ შორის, აეროდინამიკური ფორმების ოპტიმიზაცია, ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია მართვის სისტემაში და მასობრივი წარმოებისთვის ადაპტირება [10].

დასკვნა

ტანდემური სქემის მქონე უპილოტო ვერტმფრენის პროექტი აჩვენებს, რომ აღნიშნული კონფიგურაცია ეფექტურად აერთიანებს მაღალი ტვირთამწეობის, სტაბილურობისა და მანევრულობის უპირატესობებს კომპაქტურ ზომებთან და ენერგოეფექტურობასთან ერთად. ასეთი სისტემები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი გახდება იმ სფეროებში, სადაც საჭიროა ზუსტი ტვირთმიწოდება, სწრაფი რეაგირება და საიმედო მუშაობა რთულ გარემოში. პერსპექტივაში, პროექტის განვითარება შეიძლება მოიცავდეს აეროდინამიკური ფორმების ოპტიმიზაციას, ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაციას საბორტო მართვის სისტემაში და მოდელების მასობრივი წარმოებისთვის ადაპტაციას. ეს ნაბიჯები გააძლიერებს ტექნოლოგიურ პოტენციალს და ხელს შეუწყობს ქვეყნის საავიაციო ინჟინერიის სფეროს პროგრესს.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. ტექნიკური უნივერსიტეტი. (2022). აეროდინამიკის საფუძვლები და პრაქტიკული ინჟინერია. თბილისი: ტექნიკური გამომცემლობა;
2. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი. (2023). უპილოტო საფრენი აპარატების ტექნოლოგიების მიმოხილვა. თბილისი;
3. Mil, M. L., Nekrasov, A. V., Braverman, A. S., Grodtko, L. N., and Leikand, M. A. *Helicopters: Calculation and Design. Vol. 1: Aerodynamics*. Moscow, 1966;
4. Yatsunovich, M. S. *Aerodynamics of the Mi-4 Helicopter*. Moscow, 1968;
5. Romasevich, V. F., and Samoilov, G. A. *Practical Aerodynamics of Helicopters*. Moscow: Military Publishing House, 1980;
6. McCormick, B. W. (1995). *Aerodynamics of V/STOL Flight*. Dover Publications.
7. Leishman, J. G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press;
8. Padfield, G. D. (2007). *Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling*. Wiley;
9. Johnson, W. (2013). *Helicopter Theory*. Dover Publications;
10. Anderson, J. D. (2017). *Introduction to Flight*. McGraw-Hill Education

Project of a Helicopter-Type Unmanned Aerial Vehicle

Bezhan Jikia¹, Tsezar Gabadze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The presented work focuses on the design and analysis of a tandem-rotor unmanned helicopter. The paper highlights the aerodynamic and structural advantages of the tandem configuration, which offers high lifting capacity, improved stability, and enhanced maneuverability compared to conventional rotorcraft or quadcopter systems. The proposed UAV employs lightweight composite materials and an electric propulsion system to achieve energy efficiency and low noise. Equipped with an integrated flight control unit and modular payload system, it is designed for logistics, rescue, and surveillance operations in complex environments. The study concludes that the tandem configuration can significantly improve the operational flexibility and reliability of unmanned aerial platforms in both civilian and defense applications.*

Keywords: *tandem configuration, unmanned aerial vehicle, payload capacity, integrated control system.*

ფენოვანი კონსტრუქციების რღვევის ფორმები

ბეჟან ჯიქია

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომი შეეხება მრავალფენიანი კომპოზიტური კონსტრუქციების მექანიკურ ქცევას, მათი გამოთვლითი მოდელების თავისებურებებსა და რღვევის მექანიზმებს. ფენოვანი სტრუქტურები ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ინჟინერიაში მცირე წონისა და მაღალი სიმტკიცე-სიხისტის კომბინაციის ოპტიმალურობის გამო. აქ განხილულია სამშრიანი (სენდვიჩის ტიპის) კონსტრუქციები, რომელთა შემავსებლის როლს ხშირად ასრულებს ფიჭური სტრუქტურა. მოცემულია ფენოვანი კონსტრუქციების გამოთვლითი მოდელების ორი ძირითადი მიდგომა: პირველი ეფუძნება მთელ პაკეტს, როგორც ერთიან სისტემას, ხოლო მეორე თითოეული ფენისთვის ინდივიდუალური ჰიპოთეზის გამოყენებას და ფენებს შორის კონტაქტური პირობების გათვალისწინებას.

სტატიაში აღწერილია რღვევის ძირითადი ფორმები: შემონაკერის გაგლეჯვა, მზიდი ფენების ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვა, ფიჭური შემავსებლის კუმშვითი ან ძვრითი რღვევები, აგლეჯვადი დაზიანებები და დეფორმაციის რთული კომბინაციები, რომლებიც განსაკუთრებით ხშირად ვლინდება ფიჭურ სტრუქტურებში. ნაჩვენებია, რომ რღვევის უმრავლესობა განისაზღვრება არა მხოლოდ გარე ფენების თვისებებით, არამედ ფიჭური შემავსებლის გეომეტრიული პარამეტრებით (უჯრედის სიგანე, კედლის სისქე), ელასტიური და მექანიკური მოდულებით და ფენებს შორის შეერთების ხარისხით.

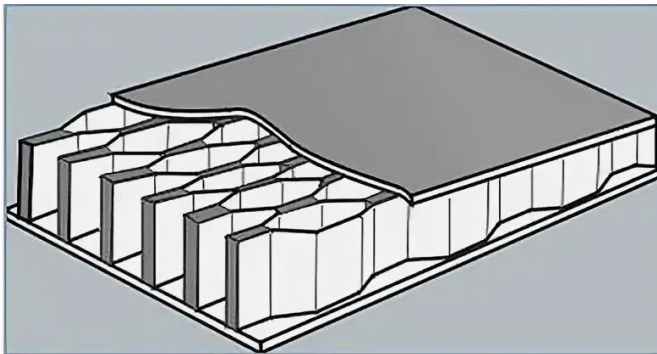
ასევე განხილულია კრიტიკული დატვირთვების შეფასების მეთოდები და ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვის პირობები, რაც აუცილებელ საფუძველს ქმნის ფიჭური პანელების ოპტიმალური დიზაინისთვის. მიღებული შედეგები მნიშვნელოვან პრაქტიკულ მნიშვნელობას იძენს საავიაციო, კოსმოსურ, სამშენებლო და მექანიკურ ინჟინერიაში.

საკვანძო სიტყვები: ფენა, შემავსებელი, რღვევის ფორმები, გაგლეჯვა, ძვრა.

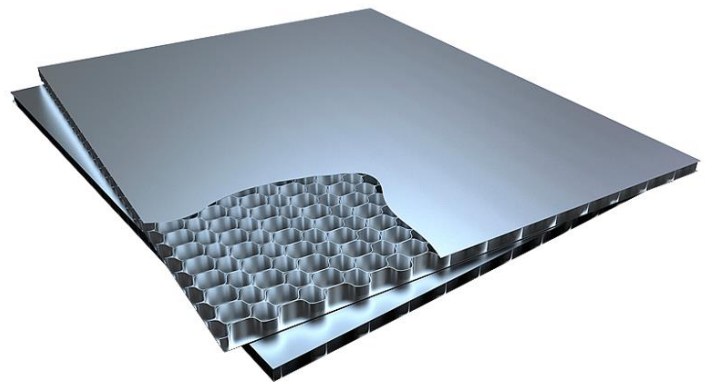
შესავალი

თანამედროვე სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში, მექანიკურ ინჟინერიაში, აეროკოსმოსურ ინჟინერიაში, გემთმშენებლობაში და სხვა დარგებში ფართოდ გამოიყენება გარსისებრი და ფირფიტისებრი კონსტრუქციები. ეს კონსტრუქციები უნდა აკმაყოფილებდეს მაღალი სიმტკიცის, სიხისტის და საიმედოობის მოთხოვნებს, ამავდროულად უნდა ინარჩუნებდეს მცირე წონას. ამიტომ, ბოლო დროს მნიშვნელოვნად გაიზარდა ინტერესი ფენოვანი სისტემების მიმართ. ეს სისტემები შედგება მასალებისგან, რომლებიც მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ფიზიკურ - მექანიკური თვისებებით. დატვირთვის მიმდებ (მზიდ) ფენებში იყენებენ მასალებს მაღალი სიმტკიცის და სიხისტის მქონე მახასიათებლებით; ეს ფენები განკუთვნილია მექანიკური დატვირთვებისათვის, ხოლო დამაკავშირებელი ფენა (შემავსებელი) ემსახურება სტრუქტურული

მთლიანობის უზრუნველყოფას (მონოლითურობას), რაც გულისხმობს დატვირთვის გადანაწილებას მზიდ ფენებს შორის. ფენების ეს განლაგება, დაბალი წონის შენარჩუნებით, უზრუნველყოფს მაღალ სიმტკიცესა და სიხისტეს. ფენოვანი სტრუქტურების ქცევა მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთგვაროვანი სისტემებისგან, განსაკუთრებით ძვრის დეფორმაცია, არაერთგვაროვანი დეფორმაცია და ცალკეული ფენების მოძრაობით გამოწვეული ინერციული ეფექტი. ეს მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სისტემის დაძაბულობა-დეფორმაციის მდგომარეობაზე (დ.დ.მ). არსებობს ვრცელი ლიტერატურა მრავალფენიანი სისტემების გამოთვლით მოდელურ სხვადასხვა დაშვებების შესახებ და სხვადასხვა ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებისთვის მქონე ფენებისათვის [1, 2, 3, 4]. სურ. 1-ზე წარმოდგენილია ფიჭური კონსტრუქციების მაგალითები:



ა)



ბ)



გ)

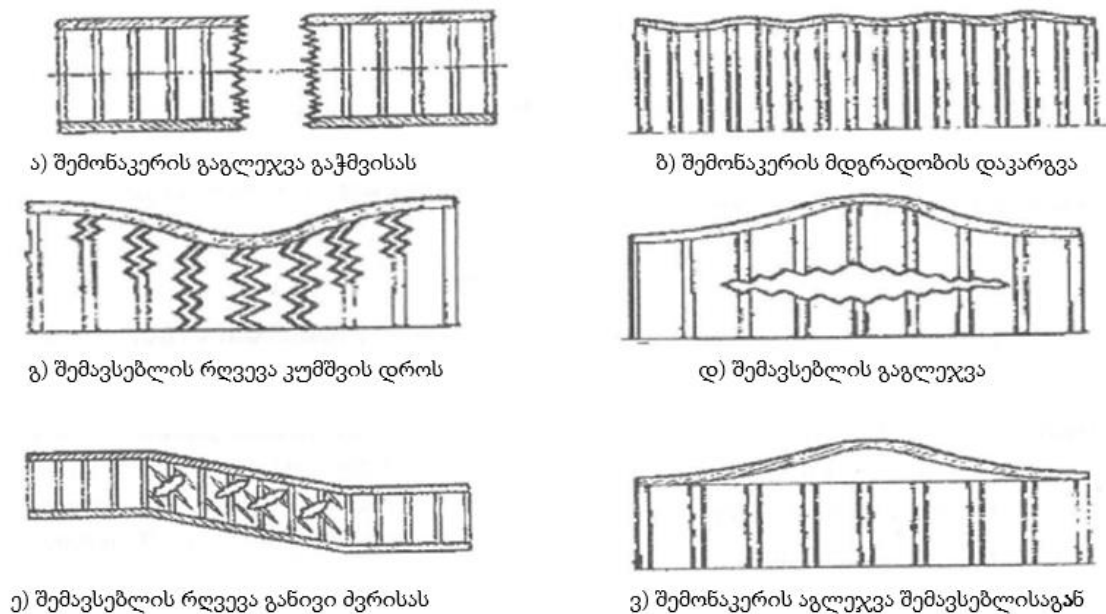
სურ. 1 ფიჭური კონსტრუქციის მაგალითები

ძირითადი ნაწილი

ფენოვანი სისტემების გამოთვლითი მოდელების შესაქმნელად, როგორც წესი, გამოიყენება შემდეგი მიდგომა: თითოეული ფენისთვის მიიღება დრეკადობის განტოლებები, ფენების საზღვრებზე სასაზღვრო პირობებისა და „კონტაქტის“ პირობების გათვალისწინებით. ეს მიდგომა შესაძლებელია ფენების შეზღუდული რაოდენობისთვის. ფენოვანი კონსტრუქციების რეალური მოდელები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად. პირველი ჯგუფი მოიცავს მოდელებს, რომლებიც, ჰიპოთეზის მიხედვით, ეფუძნება მთელ პაკეტს, როგორც ერთ მთლიანს. ამ შემთხვევაში, ამოსახსნელი განტოლებების სისტემა არ არის დაკავშირებული ფენების რაოდენობასთან. ასეთი მოდელების მასშტაბები შეზღუდულია და ისინი გამოიყენება მაშინ, როდესაც ფენებს აქვთ მსგავსი თვისებები ან მრავალშრიან პაკეტს აქვს რეგულარული სტრუქტურა. მეორე ჯგუფის მოდელები მოიცავს თეორიებს, რომლებშიც თითოეული ფენისთვის შემოღებულია ჰიპოთეზა; ეს არის გაწყვეტილი ხაზის ჰიპოთეზა [2].

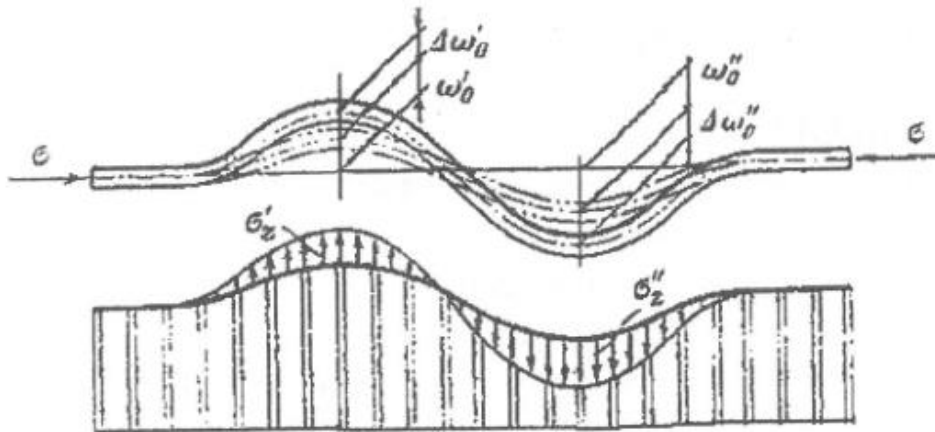
როგორც წესი, გამოიყენება სამშრიანი სტრუქტურები (ორი არამყარი ფენა და შემავსებელი). ამ ტიპის კონსტრუქციები ოპტიმალურია ღუნვაზე მუშაობის დროს. უნდა აღინიშნოს, რომ თანამედროვე საავიაციო და სარაკეტო-კოსმოსურ ინჟინერიაში შემავსებელის სახით ძალიან ხშირად გამოიყენება ფიჭური შემავსებელი.

როგორც ცნობილია, ფიჭურ კონსტრუქციებში გვხვდება ელემენტების გარკვეული რღვევის ფორმები, რომელთა ტიპებიც ცნობილია. ზოგადად, ძალიან ხშირ შემთხვევაში ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის შემდეგ ძნელია დეფორმაციის ძირითადი ფორმების დადგენა, ასევე რთულია პირველადი დეფორმაციის რეჟიმების დადგენაც. სურ. 2-ზე წარმოდგენილია ზოგიერთი ფორმის ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის მაგალითები:



სურ. 2 ზოგიერთი ფორმის ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის მაგალითები

სურ. 2 გ), დ) და ვ)-ზე ნაჩვენები ფორმები წარმოიქმნება შემონაკერის გრძივი კუმშვისას, რომელსაც აქვს ტალღოვანი ან ჩაზნექილი ზედაპირი. სურათზე ნაჩვენები ფორმები ურთიერთდაკავშირებულია და გავლენას ახდენენ ერთმანეთზე, ძალიან ხშირად ფიჭურ კონსტრუქციებში ერთი შეხედვით რთულია დეფორმაციის ძირითადი ფორმის დადგენა. შეკუმშვის შემთხვევაში ძაბვები (σ), ჯერ გადანაწილდება მოხრილი მზიდის ფენის წერტილებზე და შემდეგ მოქმედებენ შემავსებელზე. შემონაკერის არათანაბარ ზონაში ω'' დეფორმაცია, რომელიც შიგნით არის მიმართული, იწვევს შემავსებლის σ_z'' შეკუმშვას, ხოლო ზონაში ω' დეფორმაცია, რომელიც გარეთ არის მიმართული, იწვევს გაჭიმვას ω' სიდიდეზე (იხ. სურ. 3).



სურ. 3 ფიჭური შემავსებლის დაძაბული მდგომარეობა

მზიდი ფენის შეერთება შემავსებელთან მუშაობს აგლეჯვაზე. ფიჭურ კონსტრუქციებში ტალღოვნების წარმოქმნა შესაძლებელია მრავალი მიზეზის გამო. უნდა აღინიშნოს, რომ უფრო სავარაუდოა, მოხდეს ჩაღუნვა, რომელიც მიმართულია შემავსებლისკენ, ვიდრე საპირისპირო მიმართულებით, რადგან $\omega'' > \omega'$ და მზიდ ფენაზე მოქმედებს გარე ძალები (მაგ., წნევა, დარტყმა და ა.შ.), ეს ფაქტორები უნდა იქნას გათვალისწინებული ფიჭური შემავსებლის სიმტკიცისა და სიხისტის მახასიათებლების არჩევისას. ფიჭურ კონსტრუქციის მზიდი ფენა წარმოადგენს ფირფიტას, დრეკად საყრდენზე კი შემავსებელს.

როდესაც კონსტრუქცია ლოკალურად მოქმედი ძალის ზემოქმედების ქვეშ მოექცევა, ძალის მოდების ადგილას შესაძლოა განვითარდეს მზიდი ფენის ადგილობრივი ღუნვა. ამის საფუძველზე, წერტილში მოქმედი ძალის შემთხვევაში, ფიჭური კონსტრუქციის შემონაკერზე უნდა იყოს უზრუნველყოფილი მზიდი ფენის სავალდებულო მინიმალური სისქე, ხოლო შემავსებელი თავად უნდა იყოს საკმარისად ხისტი და დრეკადი, რათა კონსტრუქციამ წინააღმდეგობა გაუწიოს გარე ადგილობრივი ძალების მოქმედებას, რაც უზრუნველყოფილია საკმარისად მაღალი ნორმალური დრეკადობის E მოდულით.

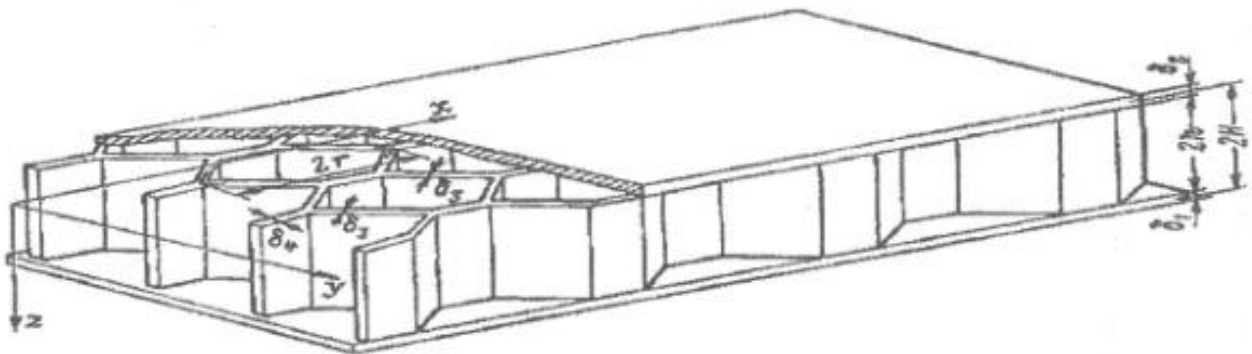
სურ.2 ე)-ზე ნაჩვენები რღვევის ფორმა განისაზღვრება შემავსებლის სიმტკიცით ძვრაზე, ხოლო ბ)-ზე ნაჩვენები ფორმა დამოკიდებულია ნორმალურ მოდულზე შეკუმშვის დროს. სურ.2 ა)-ზე

ნაჩვენები ფორმა კი, გავლენას ახდენს შემონაკერის გაჭიმვის სიმტკიცეზე. შეიძლება ითქვას, რომ ფიჭური კონსტრუქციების რღვევის ფორმის აბსოლუტური უმრავლესობა დამოკიდებულია ფიჭურ შემავსებლებზე და მათთან შემონაკერის შეერთების გეომეტრიულ, სიმტკიცისა და სიხისტის მახასიათებლებზე. ამიტომ, ფიჭური კონსტრუქციებისათვის ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრების შერჩევა აუცილებელია.

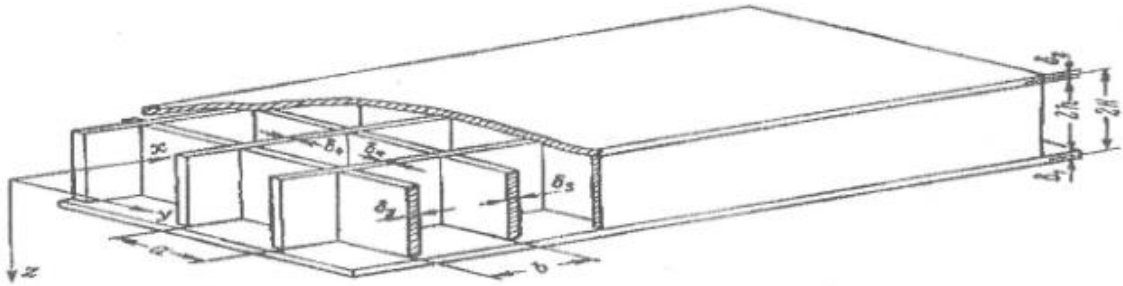
შემავსებლის $\sigma_{კუმ.}$, $\sigma_{გაგ.}$, $\sigma_{გლ.}$, სიმტკიცის მახასიათებლების ცოდნით, შესაძლებელია იმის მითითება, თუ რომელ ფორმებში (იხ. სურ. 2 გ), დ), ვ)) მოხდება შემონაკერის ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგა გრძივი შეკუმშვის დროს. კრიტიკული ძაბვა ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვის ბ)-ზე მოცემული ფორმების მიხედვით განისაზღვრება საცნობარო ლიტერატურიდან [5, 6, 7].

ექვსკუთხა სტრუქტურის მქონე ფიჭური შემავსებლის სიმტკიცე განისაზღვრება კრიტიკული შეკუმშვის ძაბვებით $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$, კედლების სისქით δ_3 და $2\delta_3 = \delta_4$ სიგანით r (იხ. სურ. 4, 5). კედლების კრიტიკული შეკუმშვის ძაბვები განისაზღვრება δ_3/r თანაფარდობით. მაქსიმალური თანაფარდობა δ_3/r უნდა შეირჩეს ისე, რომ $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$ ახლოს იყოს ფოლგის მასალის დენადობის ზღვართან $\sigma_{0.2}$, რადგან δ_3/r -ის შემდგომი ზრდით $\sigma_{კრ1}$ და $\sigma_{კრ2}$ -ის მნიშვნელობები პრაქტიკულად არ იზრდება და იწვევს შემავსებლის მოცულობითი მასის გაზრდას.

შემავსებლის უჯრედის ზომა r მინიმალური უნდა იყოს, რადგან შემონაკერის შექმნა შემავსებლიანი კედლით მოცემული სიმტკიცისთვის, უჯრედის მხარეების შემცირებისას გაზრდის შემავსებლიანი შემონაკერის საერთო სიმტკიცეს აგლეჯვაზე, თუ გაიზრდება შეწყებების ან შედუღების პერიმეტრი. გარდა ამისა, r -ის შემცირება ზრდის კრიტიკულ ძაბვებს $\sigma_{კრ}$.



სურ. 4 სამფენიანი ფირფიტა ექვსკუთხა ფორმის შემავსებლით



სურ. 5 სამფენიანი ფირფიტა ოთხკუთხა ფორმის შემავსებლით

მთლიანი კრიტიკული დატვირთვა სამშრიანი ფირფიტის, $T_{xk.3\phi.}$ -ისა და $T_{yk.3\phi.}$ -ის სიგანის ერთეულზე, რომელიც შეესაბამება როგორც ორივე გარე ფენების, ასევე ფიჭური ელემენტების ადგილობრივი მდგრადობის დაკარგვას, განისაზღვრება როგორც ორივე გარე ფენაზე ასევე ფიჭური ელემენტზე კრიტიკული დატვირთვების შეჯამებით. თუმცა, სხვადასხვა სისქის გარე ფენების შემთხვევაში, ფირფიტა პრაქტიკულად კარგავს მზიდუნარიანობას, ნაკლებად ხისტი გარე ფენის მდგრადობის დაკარგვით. იმის გათვალისწინებით, რომ ფენებს შორის დატვირთვები ნაწილდება მათი სიხისტის პროპორციულად, ვიღებთ [8, 9,].

$$\begin{cases} T_{xk.3\phi.} = T_{xk.1} \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + T_{xk.c}; \\ T_{yk.3\phi.} = T_{yk.1} \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + T_{yk.c}; \end{cases} \quad (1)$$

სადაც:

- $B_i = \frac{E_i \delta_i}{1 - \mu_i^2}$ არის გარეთა ფენების სიხისტე გაჭიმვის სიგანის ერთეულზე ($i = 1, 2$);
- δ_i არის ფირფიტის სისქე ($i = 1, 2, 3, 4$);
- E_i, μ_i - შესაბამისად, დრეკადობის მოდული და პუანსონის კოეფიციენტი, გარე ფენების მასალების ($i = 1, 2$) და ფიჭური ელემენტების ($i = 3, 4$);
- T_{xk}, T_{yk} - არის შეკუმშვის კრიტიკული დატვირთვები.

აქ, ინდექსი "1" აღნიშნავს ნაკლებად ხისტ გარე ფენას. თხელი ფოლგისგან დამზადებული ფიჭური პანელებისთვის, დატვირთვა, რომელსაც იღებს შემავსებელი, შეადგენს მთლიან ფირფიტაზე მოქმედი ძალის მცირე ნაწილს [10].

დასკვნა

მოცემულ კვლევაში განხილულია მრავალფენიანი კომპოზიტური კონსტრუქციების მექანიკური ქცევა, მათი სტრუქტურული თავისებურებები და რღვევის ძირითად მექანიზმებზე მოქმედი ფაქტორები. შესრულებული ანალიზი ადასტურებს, რომ ფენოვანი სისტემების სიმტკიცე

და საიმედოობა მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება როგორც გარე მზიდი ფენების, ისე ფიჭური ტიპის შემავსებლის გეომეტრიული, ელასტიური და მექანიკური მახასიათებლებით.

დადგინდა, რომ რღვევის კრიტიკული ფორმები, მათ შორის მასობრივი მდგრადობის დაკარგვა, გაგლეჯვა, აგლეჯვა და ძვრის დაზიანებები, უმეტესწილად უკავშირდება ფენებს შორის დატვირთვის გადანაწილების არასაკმარის ეფექტურობას და შემავსებლისა და შემონაკერის შეერთების თვისებებს. კვლევამ აჩვენა, რომ ფიჭური სტრუქტურის უჯრედის ზომა, კედლის სისქე და ელასტიური მოდულები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მთლიან სისტემაზე მოქმედ კრიტიკულ მაბევებზე და დეფორმაციის რეჟიმებზე.

ასევე დასტურდება, რომ გამოთვლითი მოდელების შერჩევა უნდა ეფუძნებოდეს ფენების განსხვავებულ მექანიკურ ბუნებასა და კონსტრუქციის რეალურ დატვირთვებს. პრაქტიკული შედეგები მიუთითებს, რომ სტრუქტურის ოპტიმალური პარამეტრების სწორად შერჩევა მნიშვნელოვნად ზრდის ფენოვანი პანელების მდგრადობას და გამძლეობას.

ამრიგად, მიღებული დასკვნები წარმოადგენს მნიშვნელოვან საფუძველს საავიაციო, კოსმოსური და სხვა მაღალი დატვირთვის საინჟინრო დარგებში ფენოვანი კომპოზიტური კონსტრუქციების სწორად დაგეგმვისა და უსაფრთხო ექსპლუატაციისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Bolotin, V. V., and Yu. N. Novichkov. 1980. Mechanics of Multilayer Structures. Moscow: Mashinostroenie.
2. Grigolyuk, E. I., and P. P. Chulkov. 1973. Stability and Vibrations of Three-Layer Shells. Moscow: Mashinostroenie.
3. Christensen, R. 1982. Introduction to the Mechanics of Composite Materials. Moscow: Mir.
4. Piskunov, V. G., et al. 1986. Analysis of Nonuniform Shallow Shells and Plates by FEM. Kiev: Vyscha Shkola.
5. Alexandrov, A. Ya., L. E. Bryukker, L. M. Kurshin, and A. P. Prusakov. 1960. Analysis of Three-Layer Panels. Moscow: Oborongiz.
6. Birger, I. A., and Ya. G. Panovko. 1968. Strength, Stability, and Vibrations. Moscow: Mashinostroenie.
7. Allen, H. G. 1969. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels. Oxford: Pergamon Press.
8. Zenkert, Dan. 1995. An Introduction to Sandwich Construction. London: Engineering Materials Advisory Services.
9. Daniel, Isaac M., and Ori Ishai. 2006. Engineering Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
10. Gibson, Lorna J., and Michael F. Ashby. 1997. Cellular Solids: Structure and Properties. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Failure Modes of Layered Structures

Bezhan Jikia

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This study examines the mechanical behavior of multilayer composite structures, the specific features of their computational modeling, and the predominant mechanisms of structural failure. Layered systems are widely used in modern engineering due to their favorable combination of low weight and high stiffness–strength characteristics. The paper focuses on three-layer (sandwich-type) constructions in which the core is frequently formed by a honeycomb structure.*

Two principal approaches to the computational modeling of layered structures are presented: the first treats the entire laminate as a single integrated system, whereas the second approach applies individual hypotheses to each layer, taking into account interlayer contact and boundary conditions. The paper describes the primary failure modes observed in such systems, including face-sheet debonding, local buckling of load-bearing layers, compressive or shear failure of the honeycomb core, peel-type debonding, and complex combined deformation modes that are especially characteristic of honeycomb structures. It is demonstrated that most failure modes are governed not only by the properties of the outer face sheets but also by the geometric characteristics of the honeycomb core (cell size, wall thickness), its elastic and mechanical parameters, and the quality of the face–core bonding.

Methods for evaluating critical loads and conditions for local instability are also discussed, providing an essential basis for the optimal design of honeycomb sandwich panels. The findings have significant practical relevance for aerospace, space technology, civil engineering, and mechanical engineering applications.

Keywords: *Layer, core, failure modes, debonding, shear.*

უპილოტო საფრენი აპარატების ხელოვნური ინტელექტის როლი გარემოსდაცვითი და აგრარული მონაცემების შეგროვებასა და ანალიზში

გიორგი თაყაძე

ალტე უნივერსიტეტი, უნივერსიტეტის ქუჩა N2, თბილისი 0177, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომი ეძღვნება უპილოტო საჰაერო სისტემების დინამიკურ განვითარებას და მათ ტრანსფორმაციას სამხედრო ტექნოლოგიიდან მრავალფუნქციურ სამოქალაქო და სამეცნიერო ინსტრუმენტად. ხაზგასმულია ამ სფეროს ინტერდისციპლინური ფუნქციები, რომელიც მექანიკის, ელექტრონიკისა და პროგრამირების სინთეზს ეფუძნება. განხილულია დრონების გამოყენების ფართო სპექტრი, გარემოს მონიტორინგიდან და ლოგისტიკიდან პრეციზიულ სოფლის მეურნეობამდე. ნაშრომში ასევე აღწერილია დრონის ტექნიკური სტრუქტურა, მათ შორის კონტროლერისა და თანამედროვე სენსორული სისტემების (GPS, კამერები, ინერციული ერთეულები) კოორდინირებული მუშაობა. ნაჩვენებია, რომ ეს კომპონენტები დრონს აქცევს არა უბრალოდ მფრინავ აპარატად, არამედ კომპლექსურ ინტელექტუალურ პლატფორმად, რომელსაც მონაცემების რეალურ დროში შეგროვება, დამუშავება და ანალიზი შეუძლია.

საკვანძო სიტყვები: უპილოტო საჰაერო სისტემა (UAS), გეორეფერენცირებული რუკები (GIS), მულტისპექტრული ანალიზი / NDVI, ხელოვნური ინტელექტი (AI)

შესავალი

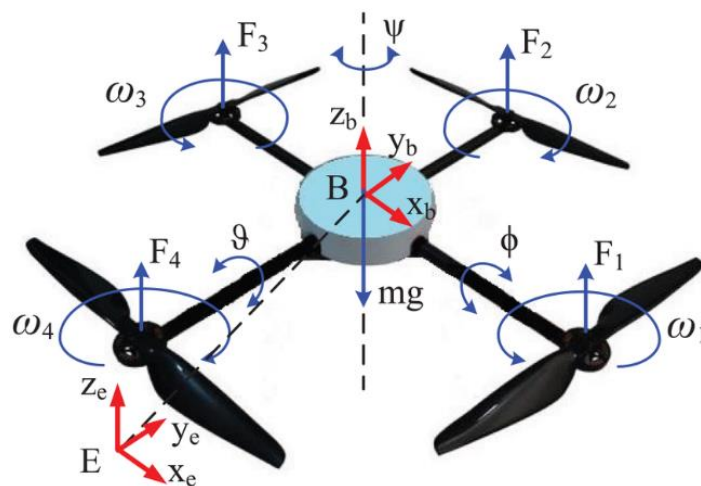
ბოლო ათწლეულში უპილოტო საჰაერო სისტემებმა (UAS) მნიშვნელოვანი ტრანსფორმაცია განიცადა. სამხედრო დანიშნულების ტექნოლოგიიდან ისინი ჩამოყალიბდა, როგორც მრავალფუნქციური სამოქალაქო, სამეცნიერო და ინდუსტრიული ინსტრუმენტები. თანამედროვე საინჟინრო და მონაცემთა მეცნიერული პრაქტიკები მათ აქცევს პლატფორმებად, რომლებიც აერთიანებს აეროდინამიკას, სენსორულ სისტემებს, ალგორითმულ მართვასა და ხელოვნურ ინტელექტს (AI). ამ ტექნოლოგიების სინთეზი განაპირობებს დრონების უნარს, მაღალი სიზუსტით შეაგროვონ, დაამუშაონ და გაანალიზონ გარემოსდაცვითი და აგრარული მონაცემები, რაც ამარტივებს რთულ სამეცნიერო და პრაქტიკულ ამოცანებს.

დრონების მექანიკური სტრუქტურა და ფრენის პრინციპები ეფუძნება ფიზიკისა და აეროდინამიკის კანონებს, ხოლო ფრენის კონტროლი ხორციელდება ინტელექტუალური ალგორითმებით, როგორიცაა PID რეგულაცია, რომელიც სისტემას სტაბილურობასა და ზუსტ მანევრირებას უზრუნველყოფს. თანამედროვე სენსორების GNSS, RTK/PPK მოდულების, ოპტიკური და მულტისპექტრული კამერების — გამოყენება საშუალებას იძლევა შეიქმნას გეორეფერენცირებული გამოსახულებები და ორთომოზაიკალური რუკები, რაც გარემოს სივრცით ანალიზს ახალ ხარისხობრივ დონეზე აყენებს.

მონაცემთა მოცულობასთან ერთად იზრდება მათი ინტერპრეტაციის სირთულეც, რაც ზრდის AI-მოდელების მნიშვნელობას. ნეირონულ ქსელებზე დაფუძნებული ანალიტიკა უზრუნველყოფს სოფლის მეურნეობაში მცენარეთა ჯანმრთელობის ავტომატურ შეფასებას, სტრესის ზონების გამოვლენას და მოსავლიანობის პროგნოზირებას, ხოლო გარემოს კვლევაში ეკოსისტემური ცვლილებების დროულ მონიტორინგს.

ძირითადი ნაწილი

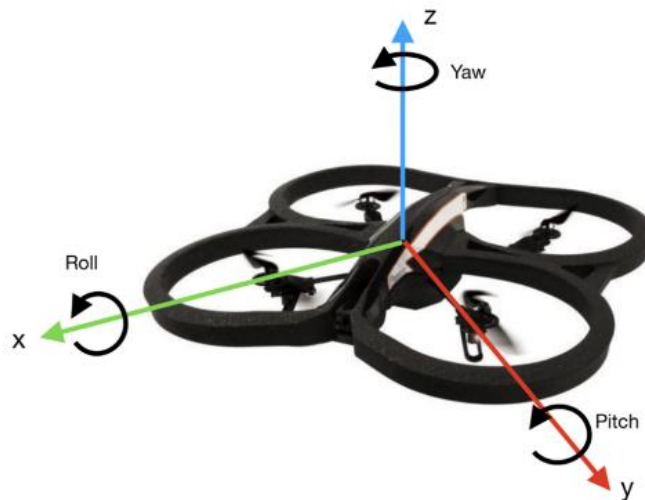
დრონის ფრენა ეფუძნება აეროდინამიკისა და ფიზიკის კანონებს, რომლებიც განსაზღვრავენ, როგორ იქმნება ამწევი ძალა, როგორ მოძრაობს ჰაერი საჰაერო ხრახნის ირგვლივ და როგორ ინარჩუნებს სისტემა სტაბილურობას. მიუხედავად იმისა, რომ დრონი პატარა მოწყობილობაა, ის იმავე პრინციპებით დაფრინავს, რითაც თვითმფრინავი ან ვერტმფრენი. იქნება ამწევი ძალა (Lift), რომელიც გადააჭარბებს სიმძიმის ძალას და შეინარჩუნებს ბალანსს. ბერნულის პრინციპის მიხედვით, რაც უფრო სწრაფად მიედინება ჰაერი, მით უფრო დაბალია წნევა. ხრახნები ისეა ფორმირებული, რომ მის ზემოთ ჰაერი სწრაფად გადის, ხოლო მის ქვემოთ კი ნელა, რის შედეგადაც იქმნება წნევის სხვაობა და ამწევი ძალა რითაც დრონი იწევა ზემოთ.



სურ. 1 კვადროკოპტერის სქემა

ფრენის სტაბილურობა მიიღწევა კვადროკოპტერის პროპელერის ბალანსით (სურ. 1): ორი ბრუნავს საათის ისრის მიმართულებით, ორი — საწინააღმდეგოდ, რათა ტორკის ეფექტი გაუქმდეს (ტორკის ეფექტი ჩნდება მაშინ, როდესაც ძრავის მბრუნებელი მოქმედება წარმოქმნის მექანიკურ მომენტს, რომელიც აპარატში იწვევს საპირისპირო მიმართულებით თვითბრუნვას და საჭიროებს კომპენსაციას სტაბილური ფრენის უზრუნველსაყოფად). თითოეული ხრახნის სიჩქარის მცირე ცვლილება განსაზღვრავს მოძრაობის მიმართულებას: წინ, უკან, გვერდით ან ღერძის გარშემო ბრუნვას. მთელი პროცესი იმართება ფრენის კონტროლერის მიერ, რომელიც წამში ასეულობით სიგნალს ამუშავებს გიროსკოპიდან, აქსელერომეტრიდან და ბარომეტრიდან [1]. ის მუდმივად

ასწორებს ძრავების ბრუნვას, რათა დრონმა შეინარჩუნოს პოზიცია ქარში ან ტურბულენტურ გარემოში. ამაში ეხმარება PID ალგორითმი (Proportional-Integral-Derivative) — მექანიზმი, რომელიც ადარებს სასურველ პოზიციას რეალურ მონაცემებს და ასწორებს შეცდომას წამიერად. შედეგად, დრონის ფრენა არის ფიზიკის, მექანიკისა და ალგორითმების ერთობლივი მოქმედება. ჰაერის ნაკადის დინამიკა ქმნის ამწევ ძალას, სინქრონიზებული ძრავები უზრუნველყოფენ ბალანსს, ხოლო PID კონტროლი არის ალგორითმი, რომელიც მექანიკური ან ელექტრონული სისტემის სტაბილურობისა და სიზუსტის შენარჩუნებას უზრუნველყოფს. ის მუდმივად ადარებს სასურველ მდგომარეობას რეალურ მონაცემებს და ასწორებს გადახრას სამი მდგენელის მეშვეობით - PID კონტროლი ინარჩუნებს სტაბილურობას. სწორედ ამ ელემენტების სინთეზი აქცევს დრონს ზუსტ, მოქნილ და ინტელექტუალურად მართულ მფრინავ სისტემად.



სურ. 2 ბალანსის და კორექციის მექანიზმები PID სისტემაში

დრონების ფრენის მექანიკა, რომელიც ბერნულის პრინციპზე, ჰაერის ნაკადზე და PID კონტროლზეა დაფუძნებული, მხოლოდ საწყისი საფეხურია იმ კომპლექსური სისტემისა, რაც მათ ზუსტ სამეცნიერო ინსტრუმენტებად აქცევს (სურ. 2) [2]. თანამედროვე დრონები აღარ გამოიყენება მხოლოდ აერო გადაღებისთვის, ისინი აგროვებენ და ამუშავებენ სივრცულ მონაცემებს, ქმნიან ზუსტ გეოგრაფიულ რუკებს და რეალურ სამყაროს გარდაქმნიან ანალიტიკურ მოდელად. დრონის მიერ გადაღებული თითოეული ფოტო ხდება georeferenced გამოსახულება, (Georeferenced არის მონაცემი ან გამოსახულება, რომელსაც ზუსტად მიეკუთვნება მისი გეოგრაფიული მდებარეობა - სურ. 3) სადაც ყოველი პიქსელი დაკავშირებულია გრძედთან, განედთან და სიმაღლესთან. ამისთვის გამოიყენება GNSS, RTK და PPK პოზიციონირების სისტემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ სანტიმეტრიან სიზუსტესაც კი. შედეგად, ვიზუალური გამოსახულება გარდაიქმნება ზუსტ სივრცულ მონაცემად. მიღებული მასალა სტრუქტურირდება და ინახება მეტამონაცემებთან ერთად. გადაღების დრო, სენსორის პარამეტრები, სიმაღლე და სხვა დეტალები. ამ მონაცემებზე დაფუძნებით იქმნება ორთომოზიკალური რუკები, სადაც ასობით ფოტო ზუსტად გადაეფარება ერთმანეთს, რაც

შესაძლებელს ხდის გარემოს აღწერას სანტიმეტრიან სიზუსტით [3]. სოფლის მეურნეობაში ეს მეთოდი გამოიყენება მოსავლიანობის შეფასებისთვის, მცენარეთა სტრუქტურის ან დაავადების ამოსაცნობად, ხოლო გარემოს კვლევაში გეომორფოლოგიური ცვლილებების მონიტორინგისთვის.

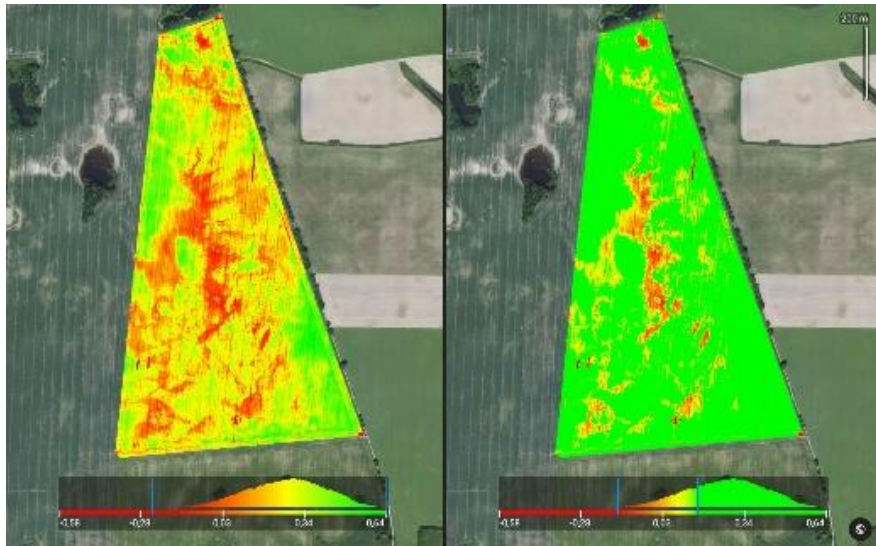


სურ. 3 გეორეფერენცირებული გამოსახულების შექმნის პროცესი

მულტისპექტრული კამერებით მიღებული ინფორმაცია საშუალებას იძლევა გამოითვალოს NDVI ინდექსი (NDVI ინდექსი არის მცენარეების ჯანმრთელობის მაჩვენებელი, რომელიც გამოითვლება წითელი და ახლო ინფრაწითელი სინათლის ანარეკლის შედარებით), რომელიც ასახავს მცენარეთა ჯანმრთელობის მდგომარეობას. მონაცემთა მოცულობის ზრდასთან ერთად, მნიშვნელოვანი ხდება მათი შენახვა და გაზიარება [2]. მცირე პროექტებში გამოიყენება ლოკალური სერვერები, ხოლო მასშტაბურებში — ღრუბლოვანი პლატფორმები, როგორიცაა Google Earth Engine, Pix4D Cloud ან ArcGIS Online. ეს პლატფორმები უზრუნველყოფს უსაფრთხო შენახვას, ავტომატურ დამუშავებას და ერთიან წვდომას მრავალ რეგიონში.

ამრიგად, დრონი არის სისტემათა სინთეზი — მექანიკის, ფიზიკის, პროგრამირების და მონაცემთა მეცნიერების [4]. ის იწყებს ფრენას ფიზიკური პრინციპებით და ასრულებს მონაცემთა გარდაქმნით ცოდნად — ქმნის ერთიან ჯაჭვს, რომელიც აერთიანებს ელექტრონულ კომპონენტებს, ხელოვნურ ინტელექტს (AI) და GIS-ს თანამედროვე მეცნიერების სერვისში. ხელოვნური ინტელექტი (AI) ხშირად აღიქმება როგორც „გონიერი“ ან თვითშემეცნებითი სისტემა, თუმცა სინამდვილეში ის მხოლოდ გამოთვლითი ინსტრუმენტია, ალგორითმების ერთობლიობა, რომელიც ადამიანის ინტელექტის გარკვეულ მახასიათებლებს იმიტირებს, მაგრამ არ ფიქრობს, არ აქვს მიზნები და არ იღებს გადაწყვეტილებებს ემოციების ან ნებელობის საფუძველზე [5]. მისი დანიშნულება არის ინფორმაციის დამუშავება, კავშირის პოვნა მონაცემებს შორის და კონკრეტული ამოცანის შესრულება ისე, როგორც ამას ადამიანი გააკეთებდა, მაგრამ გაცილებით სწრაფად და ობიექტურად. AI-ის სტრუქტურა იერარქიულია: ყველაზე ფართო ცნებაა თავად ხელოვნური ინტელექტი, მის ქვედა დონეს წარმოადგენს მანქანური სწავლება (Machine Learning), ხოლო ყველაზე ღრმა დონე — ღრმა ნეირონული ქსელები (Deep Learning). ყველა Deep Learning მოდელი არის Machine Learning-ის

ნაწილი, ხოლო ყველა Machine Learning არის AI-ის მაგალითი, მაგრამ არა ყველა AI წარმოადგენს Machine Learning-ს [6]. მაგალითად, თუ დრონი უბრალოდ იღებს ტენიანობის მაჩვენებელს და ალგორითმის მიხედვით ასრულებს მოქმედებას, ეს უკვე AI-ის მაგალითია. თუ დრონი სწავლობს წარსულ მონაცემებზე დაყრდნობით და პროგნოზირებს მოსავალს, ეს Machine Learning-ის შემთხვევაა, ხოლო თუ ის იყენებს ნეირონულ ქსელს სურათების ანალიზისთვის, ეს უკვე Deep Learning-ის დარგია, ხელოვნური ინტელექტის სწავლების პროცესი იწყება მონაცემთა შეგროვებით და მათი სწორად ანოტირებით, ანუ თითოეულ მონაცემზე ხელით მონიშვნით, რა არის გამოსახული და რა მნიშვნელობა აქვს მას. ამის შემდეგ მოდელი გადის ტრენინგის ეტაპს, სადაც ის სწავლობს შაბლონებსა და კანონზომიერებებს ამ მონაცემებში. პროცესის მსვლელობისას მონაცემთა ნაწილი გამოიყენება ვალიდაციისთვის რათა შეფასდეს, რამდენად სწორად სწავლობს მოდელი, ხოლო ბოლოს ტესტირების ნაკრები ამოწმებს მის რეალურ უნარს ახალი, არასდროს ნანახი მონაცემების გაანალიზებისას.



სურ. 4 მულტისპექტრული მონაცემების AI-ანალიზი აგრარული მონიტორინგისთვის

ამგვარად, AI არ ქმნის ცოდნას თავად, ის მხოლოდ აღმოაჩენს მათემატიკურ კავშირებს და აფორმებს მათ გადაწყვეტილებად. სოფლის მეურნეობაში ხელოვნური ინტელექტი უკვე გახდა შეუცვლელი ინსტრუმენტი. დრონებით მიღებული გამოსახულებები, როდესაც დამუშავებულია AI მოდელებით, საშუალებას იძლევა ავტომატურად ამოიცნოს მცენარეთა დაავადებები, განასხვავოს სარეველა კულტურებისგან და შეაფასოს მოსავლის რაოდენობა ან ხარისხი. ამ სისტემებს შეუძლიათ იპოვონ მცირედი ფერის ან ტექსტურის ცვლილებები, რომლებიც ადამიანის თვალისთვის შეუმჩნეველია და დროულად გააფრთხილონ ფერმერი პრობლემურ ზონებზე (სურ. 4) [7]. გარემოს კვლევაში AI-ს გამოყენება ფართო მასშტაბს აღწევს, ის ეხმარება მეცნიერებს მიწის ეროზიის პროცესების პროგნოზირებაში, ტენიანობის დინამიკის ანალიზში და ბიომრავალფეროვნების

ავტომატურ მონიტორინგში. დრონზე დამონტაჟებული კამერები და სენსორები აგროვებენ მონაცემებს, ხოლო ნეირონული მოდელები სწავლობენ გარემოს პათერნებს, რათა დროულად გამოავლინონ ცვლილებები, იქნება ეს ტყის დეგრადაცია, ტბის წყლის დონის ვარდნა თუ მცენარეული საფარის ცვლილება [8]. ამრიგად, ხელოვნური ინტელექტი რეალურად წარმოადგენს ადამიანის ინტელექტის ციფრულ გამეორებას, არა ფიქრს, არამედ გამოთვლით და სტატისტიკურ მოდელირებას. მისი ძალა იმაში მდგომარეობს, რომ შეუძლია მონაცემების დანახვა იმგვარად, როგორც ადამიანი ვერ ხედავს, და სწორედ ამით ცვლის მეცნიერების, სოფლის მეურნეობისა და გარემოს დაცვის ტრადიციულ მიდგომებს უფრო ზუსტ, ოპერატიულ და პროგნოზირებად სისტემებად.

დასკვნა

დრონები დღეს მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ თანამედროვე მონაცემთა მეცნიერებაში, ისინი აკავშირებენ ფიზიკურ გარემოსა და ციფრულ ანალიტიკას. ყოველი ფრენა იქცევა მონაცემთა შეგროვების პროცესად, სადაც სენსორებით მიღებული ინფორმაცია გადაიქცევა ზუსტ გეოგრაფიულ და ანალიტიკურ მოდელად. დრონების ეფექტიანობა სწორედ ინტეგრირებულ მიდგომაშია, **hardware**, **AI** და **GIS** ერთიან სისტემად მუშაობს. ტექნიკური ნაწილი უზრუნველყოფს სიზუსტეს, ხელოვნური ინტელექტი ამუშავებს მონაცემებს, ხოლო GIS აძლევს მათ სივრცით მნიშვნელობას. ეს აერთიანებს ინჟინერიას, მონაცემთა მეცნიერებასა და გარემოს კვლევას ერთ ტექნოლოგიურ ჩარჩოში. მომავლის ტენდენციებია ავტონომიური და დრონების სისტემები სადაც არის მრავალი დრონის ერთობლივი ქსელი სადაც აპარატები კოორდინირებულად მუშაობენ როგორც ერთი მთლიანობა, რომლებიც დამოუკიდებლად აგროვებენ და ამუშავებენ მონაცემს, რეალურ დროში იღებენ გადაწყვეტილებებს და ერთმანეთთან კოორდინირებულად მოქმედებენ.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Höfer, R. et al. „Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies and Challenges“. *Drones (MDPI)*, 8(11), 686 (2024). [MDPI+1](#)
2. Raihan, A., Tuspekova, M. “A Systematic Review of Geographic Information Systems (GIS) in Agriculture for Evidence-Based Decision Making and Sustainability”. *Global Sustainability Research*, Vol. 3 No. 1, Jan 2024. [ResearchGate](#)
3. “Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis”. *Science of The Total Environment*, 2022. [ScienceDirect](#)
4. Skripka, K. et al. “Transforming Farming: A Review of AI-Powered UAV Technologies in Precision Agriculture”. *Drones (MDPI)*, 8(11), 664 (2024). [MDPI+1](#)
5. Giordano, F., Gatto, A. “A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture”. *Information*, 10(11), 349 (2019). [MDPI+1](#)
6. Uzunović, A. et al. “Artificial Intelligence and its Applications in Agriculture: A Review.” *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, (2024) (or similar). [ResearchGate+1](#)

7. “Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture”. *Environmental & Sustainability Journal*, (2025) — covers multispectral/hyperspectral sensors, drones, AI. link.springer.com
8. Pal, O. K., Hossain Shovon, M. S., Mridha, M. F., Shin, J. “A Comprehensive Review of AI-enabled Unmanned Aerial Vehicle: Trends, Vision, and Challenges.” arXiv pre-print, Oct 2023.

The Role of Artificial Intelligence in Unmanned Aerial Vehicles for the Collection and Analysis of Environmental and Agricultural Data

Giorgi Takadze

Alte University, University Street N2, Tbilisi 0177, Georgia

Abstract: *This paper examines the dynamic development of Unmanned Aerial Systems (UAS) and their transformation from military-oriented technologies into multifunctional civilian and scientific instruments. The study highlights the interdisciplinary nature of the field, which relies on the integration of mechanics, electronics, and software engineering. A broad spectrum of drone applications is discussed—from environmental monitoring and logistics to precision agriculture. The paper also outlines the technical architecture of drones, including the coordinated operation of flight controllers and modern sensor systems such as GPS modules, cameras, and inertial measurement units. It is demonstrated that these components transform a drone from a simple flying device into a complex intelligent platform capable of collecting, processing, and analyzing data in real time.*

Keywords: *Unmanned aerial system (UAS), georeferenced mapping (GIS), multispectral analysis / NDVI, artificial intelligence (AI).*

თბილისის საერთაშორისო აეროპორტში საჰაერო ხომალდების მომსახურე სატრანსპორტო საშუალებების ექსპლუატაციის ეკონომიკური და ეკოლოგიური საკითხების კვლევა

ბიძინა აბესაძე¹, ლუკა ქურდაძე², ოთარ ბრეგაძე³

^{1, 2, 3}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია (თვითმფრინავების მიწისზედა მომსახურების საშუალებები (GSE) ოპერაციებთან დაკავშირებულ ეკონომიკურ ხარჯები და გარემოსდაცვითი საკითხები. კვლევის მიზანია შეფასდეს არსებული ვითარება თბილისის საერთაშორისო აეროპორტის მაგალითზე, სადაც გაანალიზებულია 2025 წლის აპრილის თვის GSE-ის საწვავის მოხმარებისა და გამონახოლქვის მონაცემები. ნაშრომში დეტალურად დათვლილია საწვავის ხარჯები და შეფასებულია ემისიების დონე, გარემოსდაცვით ნორმებთან შედარებით. მიღებული შედეგები ცხადყოფს, რომ GSE ოპერაციები მნიშვნელოვან ფინანსურ საკითხებთან და გარემოს დაბინძურებასთან არის დაკავშირებული. ამ გამოწვევების საპასუხოდ, შემოთავაზებულია კონკრეტულ სტრატეგიები, მათ შორის ელექტრო ან წყალბადის საწვავზე მომუშავე GSE-ზე გადასვლის თვალსაზრისით. ასეთი GSE-ის დანერგვა გამოიწვევს საწვავის ხარჯების მნიშვნელოვან დანაზოგს და თითქმის ნულოვან ნახშირბადის ემისიებს, რაც ხელს შეუწყობს აეროპორტის მდგრად და ეფექტურ განვითარებას. საბოლოოდ, ნაშრომი წარმოადგენს საფუძვლიან ანალიზს და პრაქტიკულ რეკომენდაციებს თბილისის აეროპორტის სახმელეთო ოპერაციების ეკოლოგიური კვალის შესამცირებლად და საოპერაციო ეფექტურობის გასაუმჯობესებლად.

საკვანძო სიტყვები: აირების ემისია, ჰაერის დაბინძურება, გამონახოლქვი აირები.

შესავალი

თანამედროვე საავიაციო ინფრასტრუქტურაში აეროპორტების ეფექტური ფუნქციონირება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მიწისზედა მომსახურების ტექნიკის — Ground Support Equipment (GSE)-ის ოპერაციულ შესაძლებლობებზე. აღნიშნული საშუალებები უზრუნველყოფენ თვითმფრინავების სრულ ტექნიკურ მომსახურებას მიწაზე, მათ შორის ბარგისა და ტვირთის გადაზიდვას, საწვავის შევსებას, სალონის დასუფთავებას, ენერგომომარაგებას, მგზავრების ტრანსპორტირებასა და სხვა აუცილებელ ოპერაციებს. მიუხედავად იმისა, რომ ფრენის ციკლის უმთავრესად ხილვად ფაზად მიიჩნევა აფრენა და დაფრენა, რეალურად საჰაერო ხომალდის მომზადებისა და ოპერაციული უსაფრთხოების მნიშვნელოვანი ნაწილი სწორედ მიწისზედა სეგმენტზეა დამოკიდებული.

თბილისის საერთაშორისო აეროპორტი, როგორც საქართველოს მთავარი საავიაციო კვანძი, ემსახურება წლიურად თითქმის ხუთ მილიონ მგზავრსა და ათასობით რეისს. ასეთი დატვირთვის პირობებში მიწისზედა სატრანსპორტო საშუალებების ეკონომიკური ეფექტიანობა და ეკოლოგიური მდგრადობა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი ხდება. ბოლო წლებში საერთაშორისო სამოქალაქო ავიაციის ორგანიზაცია (ICAO) განსაკუთრებულ ყურადღებას ამახვილებს აეროპორტებში ენერგოეფექტურობისა და გამონახოლქვის შემცირების პოლიტიკაზე, რაც მოიცავს არა მხოლოდ თვითმფრინავის ძრავების, არამედ მიწისზედა მომსახურების საშუალებების ზემოქმედების შემცირებასაც [8].

GSE ტექნიკა ძირითადად დიზელზე ან ბენზინზე მომუშავე შიდაწვის ძრავებს იყენებს. შედეგად, ისინი წარმოადგენენ მნიშვნელოვანი რაოდენობის ნახშირორჟანგის (CO_2), აზოტის ოქსიდების (NO_x), ნახშირჟანგის (CO) და მყარი ნაწილაკების (PM) ემისიის წყაროს. აღნიშნული გამონახოლქვები პირდაპირ მოქმედებს აეროპორტის მახლობლად ჰაერის ხარისხზე, აეროპორტის პერსონალისა და მგზავრების ჯანმრთელობაზე, აგრეთვე გლობალურ კლიმატურ ცვლილებებზე. კვლევებით დადგენილია, რომ ზოგიერთ ევროპულ აეროპორტში GSE ტექნიკის წილი NO_x -ის საერთო ემისიებში 60–70%-ს აღწევს. ეს მონაცემები ადასტურებს, რომ ეკოლოგიური ზემოქმედების შემცირება მხოლოდ თვითმფრინავების „გამწვანებით“ ვერ მიიღწევა, აუცილებელია მიწისზედა სეგმენტის მოდერნიზაცია [12, 14].

ეკონომიკური თვალსაზრისით, დიზელზე მომუშავე ტექნიკის შენახვა და ექსპლუატაცია აეროპორტისთვის წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ხარჯიან კომპონენტს. საწვავის მაღალი ფასი, ტექნიკური მომსახურების ინტენსივობა, ძრავების ცვეთა და გარემოსდაცვითი გადასახადები ერთობლივად ქმნის ეკონომიკურ ტვირთს ოპერატორისთვის. სწორედ ამიტომ, მრავალი ქვეყანა უკვე ახორციელებს „Green Airport“ პოლიტიკას, რომელიც გულისხმობს ელექტრო ან ჰიბრიდული GSE ტექნიკის დანერგვას, ენერგოეფექტურ ინფრასტრუქტურასთან ინტეგრაციით. მაგალითისთვის, ნორვეგიის ოსლოს აეროპორტში 2023 წლიდან ბარგის ტრაქტორების 85% ელექტრიფიცირებულია, ხოლო კალიფორნიის საერთაშორისო აეროპორტებში მოქმედებს რეგულაცია, რომლის თანახმად 2034 წლიდან ყველა GSE უნდა იყოს ნულოვანი ემისიის მქონე (CARB, 2021) [2, 7, 11, 15].

საქართველოს საავიაციო სექტორი აქტიურად ვითარდება და ქვეყნის ეკონომიკის ზრდასთან ერთად აეროპორტების დატვირთვაც იზრდება. თუმცა, ტექნოლოგიური მოდერნიზაცია ხშირად უფრო ნელი ტემპით მიმდინარეობს, რაც განპირობებულია როგორც ფინანსური, ისე ინფრასტრუქტურული შეზღუდვებით. თბილისის საერთაშორისო აეროპორტში მოქმედი მიწისზედა სატრანსპორტო პარკის უდიდესი ნაწილი კვლავ შიდაწვის ძრავზე მუშაობს, რაც ზრდის საწვავის დანახარჯს და გამონახოლქვის მოცულობას. 2025 წლის მონაცემებით, აეროპორტის GSE პარკი მოიხმარს დაახლოებით 14000 ლიტრ დიზელს თვეში, რაც ატმოსფეროში 37 ტონა ნახშირორჟანგის გამოყოფის ექვივალენტურია [13, 19].

აღნიშნული მაჩვენებლები ქმნის აუცილებლობას, ჩატარდეს ეკონომიკურ-ეკოლოგიური შეფასება, რათა დადგინდეს — რომელ კატეგორიებს აქვთ ყველაზე მაღალი საწვავის მოხმარება და გამონახოლქვი, სად არის ოპტიმიზაციის ყველაზე დიდი პოტენციალი და რა ზომებია საჭირო აეროპორტის ტექნიკური რესურსების განახლებისთვის. კვლევის შედეგები აჩვენებს, რომ თბილისის აეროპორტში საწვავის მოხმარების უდიდესი წილი მოდის მიწის ენერგომომარაგების აგრეგატებზე

(GPU), რომლებიც დიზელის ძრავებზე მუშაობენ და თვითმფრინავებს ელექტროენერგიას აწვდიან მათ გაჩერებულ მდგომარეობაში. მეორე რიგში დგას ბარგის ტრაქტორები და კატერინგის სატვირთოები, რომლებიც ასევე გამოირჩევა მაღალი საწვავის ხარჯვით და ინტენსიური გამოყენებით.

ეკოლოგიური ზემოქმედების თვალსაზრისით, აღნიშნული კატეგორიების მიერ წარმოქმნილი ემისიები წარმოადგენს არა მხოლოდ გარემოს დაბინძურების, არამედ საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის პრობლემასაც.

საერთაშორისო გამოცდილება მიუთითებს, რომ ელექტრიფიკაციისა და ჰიბრიდიზაციის პროცესები არა მხოლოდ ეკოლოგიურ სარგებელს იძლევა, არამედ გრძელვადიან ეკონომიკურ შედეგებსაც. კვლევების თანახმად (Ajayi et al., 2023; ICAO, 2022), ელექტრო GSE ტექნიკა საშუალოდ 30–50%-ით ამცირებს ექსპლუატაციის ხარჯებს დიზელთან შედარებით, მიუხედავად იმისა, რომ საწყისი ინვესტიცია მაღალია. ეკონომიკური ანალიზის გათვალისწინებით, თბილისის აეროპორტისთვის ასეთ მოდელზე გადასვლა საშუალო ვადიან პერიოდში შეიძლება გახდეს ფინანსურად გამართლებული, განსაკუთრებით თუ გათვალისწინებული იქნება საწვავის ფასების ზრდის ტენდენცია და ტექნიკის მოვლის შემცირებული ხარჯები.

ძირითადი ნაწილი

1. ეკონომიკური ანალიზი – GSE ტექნიკის ეფექტიანობის შეფასება

აეროპორტის მიწისზედა სატრანსპორტო საშუალებების ეკონომიკური ეფექტიანობა პირდაპირ განსაზღვრავს ოპერაციული ხარჯების დონესა და ავიაკომპანიების მომსახურების ღირებულებას. GSE ტექნიკა, რომელიც მოიცავს ბარგის ტრაქტორებს, ტვირთამწეებს, სამგზავრო ტრაპებს, ბორტკვების სატვირთოებს, ენერგომომარაგების აგრეგატებს და სხვა სპეციალიზებულ ერთეულებს, მოიხმარს მნიშვნელოვან რაოდენობის საწვავს ყოველდღიურ ოპერაციებში.

თბილისის საერთაშორისო აეროპორტში ჩატარებულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ 2025 წლის აპრილში GSE პარკის მიერ მოხმარებული დიზელის საწვავის საერთო მოცულობა შეადგენდა **14277 ლიტრს**, რაც დაახლოებით **476 ლიტრია დღეში**. აღნიშნული მაჩვენებელი დაფიქსირდა 20–30 სხვადასხვა ტიპის ერთეულის მონაცემებზე დაყრდნობით.

ყველაზე დიდი ენერგომომხმარებელი აღმოჩნდა მიწის ენერგომომარაგების აგრეგატები (Ground Power Units, GPU), რომლებიც უზრუნველყოფენ თვითმფრინავის ელექტროენერგიით მომარაგებას პარკირებისას. GPU-ებზე მოდის მთლიანი საწვავის მოხმარების **დაახლოებით 39%**, რაც მიუთითებს მათ ეკონომიკურ ტვირთზე.



სურ. 1 გარე ენერგომომსახურების აგრეგატები (Conditioned Air Units & Ground Power Units)

მეორე ყველაზე მაღალი ხარჯვის კატეგორიაა **ბარგის ტრაქტორები** (13–14%), **კატერინგის სატერითები** (17–18%) და **სამგზავრო ავტობუსები** (5–6%).

ეკონომიკური შეფასებისას გათვალისწინებულია დიზელის საწვავის საშუალო ფასი საქართველოში (2025 წლის მონაცემებით – 3.5 ლარი/ლიტრი). შესაბამისად, თბილისის აეროპორტის GSE პარკის თვიური საწვავის ხარჯი შეადგენს დაახლოებით 50,000 ლარს, ხოლო წლიური ხარჯი — 600,000 ლარის ოდენობას.

თუ ვიანგარიშებთ საშუალო საწვავის მოხმარებას ერთ რეისზე, გამომდინარე იქედან, რომ აეროპორტში დღეში სრულდება საშუალოდ 60 რეისი, თითო ფრენის მომსახურებაზე მოდის დაახლოებით 8 ლიტრი დიზელი. მიუხედავად იმისა, რომ ეს მაჩვენებელი მცირე ჩანს თვითმფრინავის საწვავის ხარჯთან შედარებით, ოპერაციული ეკონომიკის თვალსაზრისით ის მაინც არსებითია, რადგან აეროპორტის ტექნიკური და სერვისული განყოფილებების ბიუჯეტში GSE საწვავის ხარჯი ერთ-ერთ ყველაზე სტაბილურ და განმეორებად მუხლად გვევლინება.

ეკონომიკური ანალიზის შემდგომმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ თუ თბილისის აეროპორტი ეტაპობრივად ჩაანაცვლებს დიზელზე მომუშავე GSE ერთეულების 40%-ს ელექტრო ან ჰიბრიდული სისტემებით, საერთო საწვავის მოხმარება შეიძლება შემცირდეს **30–35%-ით**. ეს ნიშნავს წლიურ დანაზოგს დაახლოებით **200,000 ლარის ფარგლებში** და პარალელურად ტექნიკური მომსახურების ხარჯების 20%-ით კლებას (ელექტრო ძრავები ნაკლებად საჭიროებს ზეთის შეცვლას, ფილტრაციას და ძრავის ნაწილების ცვლას).

საერთაშორისო გამოცდილება ადასტურებს, რომ მსგავსი პროგრამების ეკონომიკური სარგებელი გრძელვადიან პერსპექტივაში მნიშვნელოვნად აღემატება საწყის ინვესტიციებს. მაგალითად, **ლონდონის ჰითროუს აეროპორტში** (Heathrow Airport, 2023) ბარგის ელექტრო ტრაქტორების დანერგვამ შეამცირა საწვავის ხარჯი 42%-ით და ყოველწლიურად დაზოგა დაახლოებით £1.2 მილიონი სტერლინგი. მსგავსი მოდელი თბილისის აეროპორტისთვისაც შესაძლოა ეკონომიკურად გამართლებული იყოს 5–7 წლიან პერიოდზე, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, თუ გათვალისწინებული იქნება ელექტროენერგიის შედარებით დაბალი ტარიფი და ტექნიკის დაბალი მოვლის ხარჯები.

2. ეკოლოგიური ზემოქმედება და ემისიების შეფასება

ეკონომიკური ფაქტორების პარალელურად, არანაკლებ მნიშვნელოვანია GSE ტექნიკის გარემოზე ზემოქმედების შეფასება. დიზელის ძრავების მიერ გამოყოფილი გამონაბოლქვი შეიცავს სათბურის ეფექტის გაზებს (GHG), ძირითადად ნახშირორჟანგს (CO_2), ასევე აზოტის ოქსიდებს (NO_x), ნახშირჟანგს (CO), გოგირდის ოქსიდებს (SO_x) და მყარ ნაწილაკებს (PM) [12, 16].

აეროპორტის ტერიტორიაზე ეს ემისიები იწვევს ადგილობრივი ჰაერის ხარისხის გაუარესებას და უშუალოდ მოქმედებს პერსონალის ჯანმრთელობაზე. კვლევებით დადასტურებულია, რომ ბაქანის (ბაქნის) ზონაში NO_x და PM კონცენტრაციის გაზრდა დაკავშირებულია რესპირატორული დაავადებების რისკის ზრდასთან (EPA, 2021) [14].

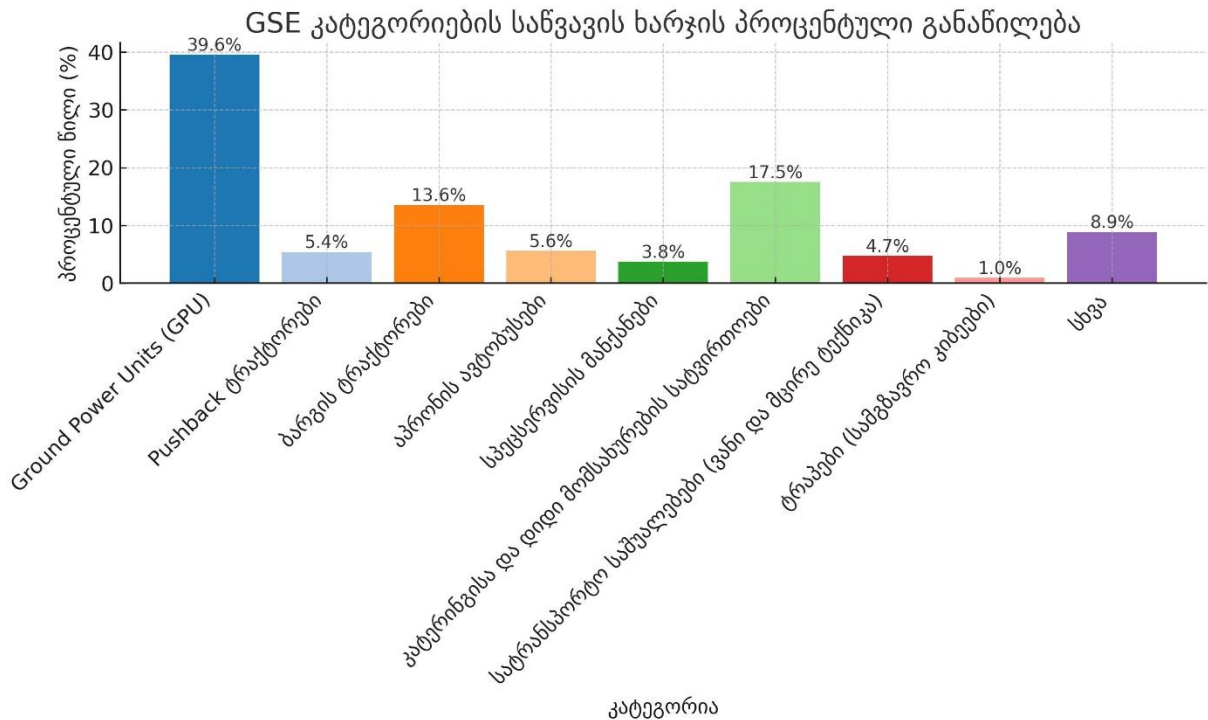
ეკოლოგიური ანალიზის ფარგლებში გამოიყენა ემისიების ფაქტორებზე დაფუძნებული მოდელი, რომლის მიხედვითაც:

- თითოეული ლიტრი დიზელის სრულ წვაზე გამოყოფს 2.64 კგ ნახშირორჟანგს (CO_2) (IPCC, 2019) [9];
- აზოტის ჟანგეულებს (NO_x)-ის საშუალო ემისია შეადგენს 40 გ/ლ;
- ნახშირჟანგს (CO) — 10 გ/ლ;
- მტვრის ნაწილაკებს (PM) — 2 გ/ლ.

ამრიგად, თბილისის აეროპორტის აპრილის თვის მონაცემებით, 14277 ლიტრი დიზელის წვა წარმოქმნის დაახლოებით:

- 37.7 ტონა CO_2 -ს;
- 571 კგ NO_x -ს;
- 143 კგ CO -ს;
- 28 კგ PM-ს.

ეს მონაცემები აჩვენებს, რომ თბილისის აეროპორტის GSE პარკის ეკოლოგიური დაბინძურება საკმაოდ მაღალია, განსაკუთრებით მაშინ, როცა აეროპორტის საერთო ტერიტორია შეზღუდულია და გამონაბოლქვი კონცენტრირდება მცირე სივრცეში.



სურ. 2 GSE კატეგორიების საწვავის ხარჯის პროცენტული განაწილება

გარდა ატმოსფერული ემისიებისა, GSE ტექნიკის ეკოლოგიური ზემოქმედება მოიცავს ხმაურს, ვიბრაციას და ნიადაგის დაბინძურებას (საწვავის ან ზეთის გაჟონვის შემთხვევაში). ევროპული საავიაციო კონფერენციის (ECAC, 2023) მონაცემებით, აეროპორტის ხმაურის საერთო ფონზე მიწისზედა ტექნიკის წილი დაახლოებით 10–15%-ს შეადგენს ღამის ოპერაციებში.

ეკოლოგიური პრობლემების საპასუხოდ, მსოფლიოს წამყვანი აეროპორტები აქტიურად ახორციელებენ ტექნიკის ელექტრიფიკაციას და ალტერნატიული საწვავის გამოყენებას (ბიოდირექტი, წყალბადი, საწვავის ელემენტები). ციურიხის აეროპორტში 2022 წლიდან მოქმედებს პროგრამა „e-Airport Fleet“, რომლის მიზანია 2030 წლამდე 100%-იანი ელექტრიფიკაცია.

თბილისის საერთაშორისო აეროპორტისთვის, არსებული მონაცემების გათვალისწინებით, ეკოლოგიურად ყველაზე მიზანშეწონილია GPU და ბარგის ტრაქტორების ელექტრიფიკაცია, რაც მთლიან ემისიას შეამცირებს მინიმუმ 35–40%-ით. გარდა ამისა, რეკომენდებულია ძრავების პერიოდული ტექნიკური ინსპექცია, ფილტრაციის სისტემების (DPF, SCR) დაყენება და idle-time-ის ავტომატური გათიშვის ფუნქციის დანერგვა, რაც საწვავის ეკონომიასა და ემისიების შემცირებას ერთდროულად უზრუნველყოფს.

3. საერთაშორისო შედარება და განვითარების სტრატეგიები

საერთაშორისო პრაქტიკა აჩვენებს, რომ აეროპორტების ეკოლოგიური პოლიტიკა ბოლო ათწლეულში მნიშვნელოვნად გამკაცრდა. ევროკავშირის სტრატეგიის თანახმად, 2030 წლამდე უნდა შემცირდეს საავიაციო სექტორის საერთო ემისიები 55%-ით. ეს მიზანი მოიცავს არა მხოლოდ თვითმფრინავების, არამედ GSE ტექნიკის მოდერნიზაციასაც.

მრავალი აეროპორტი უკვე ახორციელებს Green Airport Accreditation პროგრამებს (Airport Council International – ACI), რომლებიც ითვალისწინებს ეკოლოგიური მენეჯმენტის სისტემის დანერგვას, ენერგოეფექტური ტექნოლოგიების გამოყენებას და ემისიების ყოველწლიურ ინვენტარიზაციას [1, 4, 10, 17].

შედარებისთვის:

- **კოპენჰაგენის აეროპორტში (CPH)** NO_x-ის ემისიების 63% მოდის GSE ტექნიკაზე, მაგრამ აეროპორტმა 2025 წლამდე მიზნად დაისახა ელექტრო GSE პარკის 70%-ით განახლება.
- **ლონდონის ლუტონის აეროპორტში (LTN)** GSE-ის წილი მთლიან გამონაბოლქვში მხოლოდ 11%-ია, რაც მიღწეულია მაღალი ეფექტიანობის მართვის პოლიტიკით და ელექტრო ენერგიის ფართო გამოყენებით.
- **ტალინის აეროპორტში (TLL)** 2023 წელს ამოქმედდა ჰიბრიდული pushback სისტემები, რომლებმაც საწვავის ხარჯი 28%-ით შეამცირა.

თბილისის აეროპორტის სტრუქტურა მსგავსია საშუალო ზომის ევროპული აეროპორტების მოდელთან, სადაც GSE პარკი შედგება დაახლოებით 30–40 ერთეულისგან. შესაბამისად, ეკოლოგიური მოდერნიზაციის მსგავსი პროგრამა აქაც შეიძლება განხორციელდეს ეტაპობრივად:

1. **პირველი ეტაპი (2025–2027):** ძველი დიზელური GPU-ების ჩანაცვლება ელექტრო მოდელებით; idle-shutdown სისტემის დანერგვა.
2. **მეორე ეტაპი (2027–2030):** ბარგის ტრაქტორებისა და ავტობუსების ელექტრიფიკაცია; დამტენების ინფრასტრუქტურის მოწყობა.
3. **მესამე ეტაპი (2030–2035):** ჰიბრიდული ან წყალბადზე მომუშავე მძიმე სატვირთოებისა და pushback ტრაქტორების დანერგვა.

ეს სტრატეგია შესაბამისობაშია ICAO-ს გლობალურ გეგმასთან (ICAO Environmental Report, 2022), რომელიც მიზნად ისახავს აეროპორტების ოპერაციული გამონაბოლქვის ნულოვან დონემდე დაყვანას 2050 წლისთვის.

დასკვნა და რეკომენდაციები

მიწისზედა მომსახურების სატრანსპორტო საშუალებები (GSE) არის აეროპორტის ოპერაციების მნიშვნელოვანი ელემენტი, რომელთა ეფექტიანობა გავლენას ახდენს როგორც ეკონომიკურ დანახარჯებზე, ისე გარემოს ეკოლოგიურ მდგრადობაზე. თბილისის საერთაშორისო აეროპორტის მაგალითზე ჩატარებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ აღნიშნული მიმართულება საქართველოში ჯერ კიდევ არასაკმარისადაა განვითარებული.

გამოყენებული ტექნიკის საერთო თვიური საწვავის მოხმარება შეადგენს დაახლოებით 14277 ლიტრს, რაც იწვევს 37.7 ტონა CO₂-ის ემისიას. ყველაზე დიდი წილი მოდის GPU-ზე, ბარგის ტრაქტორებსა და კატერინგის სატვირთოებზე. ეს სეგმენტი ლოკალური გამონახოლქვის 25–30%-მდე წილს შეიძლება შეადგენდეს.

ეკონომიკურად, GSE ტექნიკის წლიური საწვავისა და ტექნიკური ხარჯები 700–750 ათას ლარს აღწევს. ელექტრო ან ჰიბრიდული ალტერნატივების დანერგვით შესაძლებელია ხარჯების 30–35%-ით შემცირება და პარალელურად ემისიების კლება NO_x/PM კომპონენტებში, რაც ასევე ამცირებს ხმაურს და აუმჯობესებს სამუშაო გარემოს.

ელექტრიფიკაცია რეკომენდებულია ეტაპობრივად. 2025 წლიდან შესაძლებელია პილოტური ჩანაცვლება GPU-სა და ბარგის ტრაქტორებში, სადაც მუშაობის რადიუსი მცირეა. საჭირო არის დამტენი ინფრასტრუქტურის მოწყობა, ემისიებისა და მოხმარების მონიტორინგის ციფრული პლატფორმა, პერსონალის გადამზადება და ეკონომიკური სტიმულების დანერგვა. მიზნობრივი გეგმა უნდა ითვალისწინებდეს GSE პარკის 60%-ით ელექტრიფიკაციას 2030 წლამდე და სრულ გადასვლას დაბალ ან ნულოვანი ემისიის მქონე ტექნოლოგიებზე 2035-მდე.

მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც მეთოდოლოგიური საფუძველი სხვა აეროპორტებისთვისაც და პრაქტიკული გზამკვლევი „მწვანე“ ტექნოლოგიების დაგეგმვისას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Airport Council International (ACI). 2023. Airport Carbon Accreditation: Annual Report 2023. Montréal: ACI World.
2. California Air Resources Board (CARB). 2021. Zero-Emission Airport Ground Support Equipment Regulation. Sacramento: CARB Publications.
3. Civil Aviation Authority of the United Kingdom (CAA). 2022. Airside Operations and GSE Environmental Standards. London: CAA Reports.
4. European Civil Aviation Conference (ECAC). 2023. Noise and Emissions at Airports: Annual Statistical Report. Paris: ECAC Secretariat.
5. European Commission. 2021. Fit for 55: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality. Brussels: European Union.

6. Federal Aviation Administration (FAA). 2022. Airport Sustainability and Low-Emission Vehicle Programs. Washington, DC: FAA Office of Environment & Energy.
7. Heathrow Airport. 2023. Sustainability Report: GSE Electrification Progress and Performance Indicators. London: Heathrow Holdings Ltd.
8. International Civil Aviation Organization (ICAO). 2022. Environmental Report 2022: Aviation and the Environment. Montréal: ICAO.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy. Geneva: United Nations.
10. MDPI. 2022. Advances in Green Airport Technologies. Sustainability 14(19): 12566.
11. Oslo Airport. 2023. Green Airport Program: Transition to Electric GSE. Oslo: Avinor ASA.
12. Sznajderman, M., Kowalska, J., & Nowak, T. 2022. Airside Emission Assessment of Ground Support Equipment at European Airports. Transportation Research Part D 108: 103291.
13. Tbilisi International Airport. 2024. Operational and Environmental Data Report. TAV Georgia Internal Publication.
14. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2021. Health and Environmental Impacts of Diesel Emissions in Airport Operations. Washington, DC: EPA Office of Transportation and Air Quality.
15. Zürich Airport. 2022. e-Airport Fleet Initiative: Electrification of Ground Support Equipment. Zürich: Flughafen Zürich AG.
16. Airport Cooperative Research Program (ACRP). 2020. Handbook for Evaluating GSE Energy and Emissions Performance. Washington, DC: Transportation Research Board.
17. International Energy Agency (IEA). 2023. Tracking Aviation 2023: CO₂ Emissions and Energy Efficiency Trends. Paris: IEA Publications.
18. United Nations Environment Programme (UNEP). 2022. Green Mobility and Airport Sustainability Practices. Nairobi: UNEP Transport Division.
19. Georgian Civil Aviation Agency (GCAA). 2024. Aviation Environmental Performance Report of Georgia. Tbilisi: Ministry of Economy and Sustainable Development.

Economic and Environmental Assessment of Ground Support Vehicles Serving Aircraft at Tbilisi International Airport

Bidzina Abesadze¹, Luka Kurdadze², Otar Bregadze³

^{1, 2, 3} Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The study examines the economic costs and environmental issues associated with Ground Support Equipment (GSE) operations at airports. The primary aim of the research is to assess the current situation using Tbilisi International Airport as a case study, where fuel consumption and emission data for April 2025 have been analyzed. The paper provides detailed calculations of fuel expenditures and evaluates emission levels in comparison with environmental standards. The findings indicate that GSE operations are linked to significant financial implications and notable environmental pollution. In response to these challenges, specific strategies are proposed, including the transition to electric or hydrogen fuel-cell-powered GSE. The implementation of such technologies would result in substantial fuel cost savings and near-zero carbon emissions, contributing to the sustainable and efficient development of the airport. Ultimately, the study offers a comprehensive analysis and practical recommendations aimed at reducing the ecological footprint of ground operations and improving overall operational efficiency at Tbilisi International Airport.*

Keywords: *Gas emissions, air pollution, exhaust gases.*

Increasing the Flight Safety of Coastal Rescue Drones and Helicopters with Protective Devices from Bird Strikes

Zurab Kopaleishvili

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The use of modern drones, or unmanned aerial vehicles (UAVs), is rapidly increasing in both civilian and military fields. Drones are used for topographic surveying, infrastructure monitoring, emergency rescue operations, and many other important tasks. The successful operation of these mechanisms largely depends on increased flight safety.*

One of the serious risks when flying at low altitudes, in cities, in rural areas, especially along coastlines or near forests, is bird strikes. Bird strikes between drones and birds are a growing threat that not only cause damage to the drone itself, but can also result in bird fragments being thrown by the propeller onto a person or structure, creating potential for harm. Their aerodynamic stability, engine power, flight route selection. Therefore, the safe operation of drones requires not only a high technological level and management, but also the implementation of environmentally friendly and intelligent protection systems. Prevention of collisions with birds is one of the priority tasks, which is becoming more and more relevant today, given the widespread use of drones.

Keywords: *Drone, protection systems, birds, helicopter.*

The problem

According to statistics, the demand for search and rescue helicopters and drones has increased significantly in the world. In the recent past, many different types of search and rescue operations have been carried out in our country. Unfortunately, some of them have not been successful, because the crew members encountered problems while trying to save people's lives, which made the operation high-risk. These risks are significantly due to the increased probability of birds getting into the engines of the aircraft. There is significant bird activity in the coastal zone of the sea (seagulls, birds, ducks, etc.) [8].



Fig. 1 Bird strike on aircraft propeller

Introduction

As ICAO (International Civil Aviation Organization) and EASA (European Union Aviation Safety Agency) point out, priority should be given to the safe flight of aircraft, especially to reduce risks such as collisions with birds [1].

The implementation of a bird collision protection system for drones may become mandatory for certain classes of drones, especially those used for the following purposes:

- Surveillance on passenger routes
- In public places.
- For multicopters, emergency medical services (MED-UAV)
- Monitoring the area around airports for safety purposes.
- Monitoring infrastructure (bridges, dams, power lines) during inspections, especially near cities and settlements.
- For fire-fighting drones operating in forest areas and natural protected areas where bird diversity is high.
- For agrodromes, from which large agricultural areas are worked and the risk of collision with birds is frequent.
- For monitoring transport corridors (for example, supervision of railways or motorways).
- In rescue operations in mountainous and natural landscapes, where bird migration routes pass.
- During television and film filming, when drones are used from high altitudes and fly over populated areas.

Technical means of protection against foreign bodies

Various types of engine protection devices are found in information sources. Given the relevance of the issue, technical information and achievements that are currently implemented and presented on the Internet were searched.



Fig. 2 Various technical means of protecting drones and their engines from birds

A drone and air taxi with impeller-type ducted engines, on which various types of protective devices can be installed:



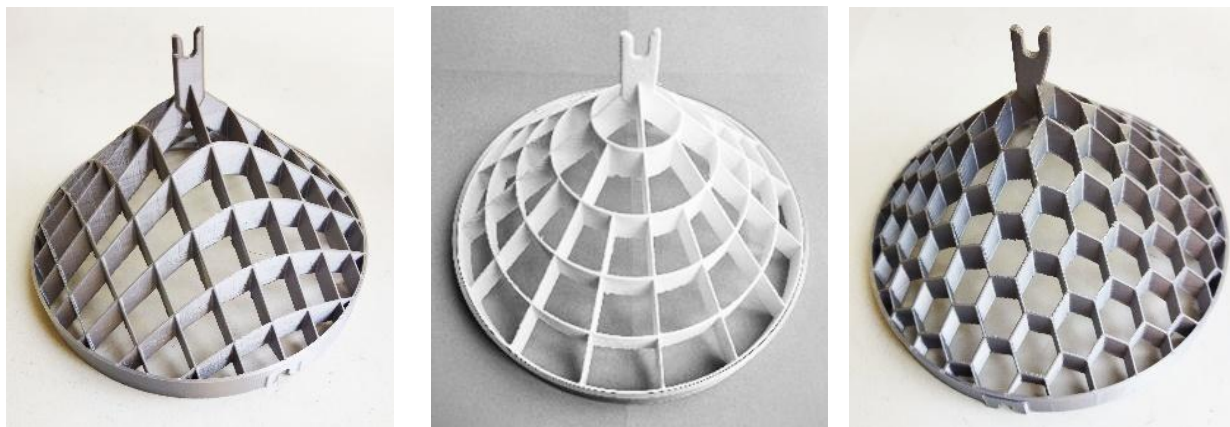
Fig. 3 Drones equipped with impeller-type ducted engines

When creating protective devices, a list of technical requirements was drawn up in advance, which the structures developed by the project must meet:

- Stability in the event of a collision
- Lightweight and strong materials
- Aerodynamic resistance
- Multi-segment cellular structure
- Modularity and quick replacement
- High level of protection in the event of a collision with birds
- Technological simplicity and cheapness of manufacture

In order to identify cones of protective honeycomb construction with the best technical characteristics, three types of constructions were developed that fully meet the listed technical requirements for protective devices.

Cone-type protective honeycomb constructions:



A

B

C

Fig. 4 Protective cone honeycomb structures: A-with hexagonal cells, B-with square cells, C-with arcuate cells

Materials used for the manufacture of protective equipment

PA-6 CARBON FIBER REINFORCED NYLON, a nylon-type plastic containing short carbon fibers.

Carbon Fiber Reinforced Polycarbonate (CFRP) and polyethylene terephthalate (PET) carbon fiber reinforced filament are also distinguished by similar acceptable properties. It is one of the most common polymers, which is widely used in many different industries. Of the above materials, carbon-infused nylon is considered the strongest material.

Aerodynamic tests

For the purpose of aerodynamic tests, 3D models of the protective cellular structure were made of plastic material according to the preliminary design drawings. The models have the same height, base diameter (200 mm), box area (370 mm²) and wall thickness (2 mm).

The structures were mounted on an aerodynamic tube, on a special sting-balance device, which is distinguished by high sensitivity and measurement accuracy.

In order to install the protective system on the aerodynamic tube and evaluate their aerodynamic resistance, it was necessary to design and manufacture a special mounting bracket.

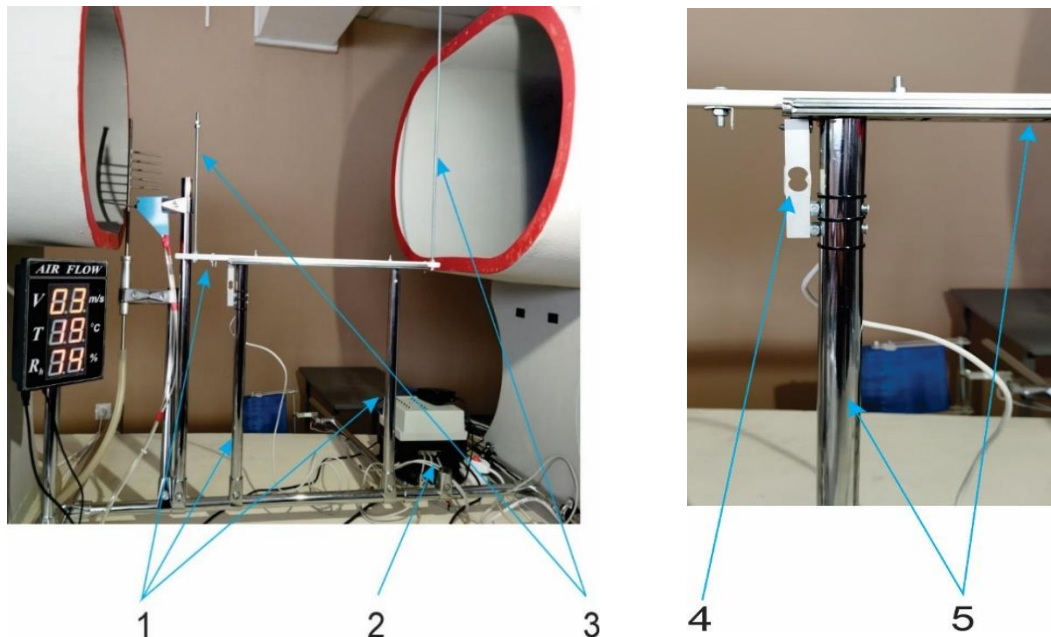


Fig. 5 Sting Balance assembled mounting and clamping device for testing a protective honeycomb-cone and mesh on a wind tunnel: 1, 5-clamping bracket; 2-controller; 3-angled rod; 4-force sensor.

The cones of the protective shell structure were tested in a wind tunnel at an air flow velocity of $V=20$ m/s and their aerodynamic drag forces were determined. The tests showed that the square-type tray-type protective device has the lowest drag force and it was determined that it showed the best results in the results of comparative experiments.

Conclusion

Bird strikes are one of the most common and serious threats to unmanned aerial vehicles (UAVs). In response to this problem, this study investigated the effectiveness of conical cellular protective structures around the engine as an innovative way to reduce damage from bird strikes.

The "Sting-Balance" system used in the study allowed for precise force and moment testing, which allowed us to understand the detailed assessment of aerodynamic parameters. The data obtained indicate that the addition of a protective structure increases energy consumption by an average of 10-12%, although this cost is much smaller than the damage that a collision with a bird may cause.

It can be said that the conical protection system with a cellular structure is a technologically sound and proven solution for protecting drone engines. In addition, it can be implemented on both civilian and military, rescue or scientific drones, where flight safety is important.

Acknowledgements

This work was supported by Shota Rustaveli National Science Foundation of Georgia (SRNSFG) [PHDF-24-3549, Increasing the flight safety of rescue drones and helicopter with a device to prevent birds from getting into the engines].

References:

1. European Union Aviation Safety Agency (EASA). *Bird Strike Risk to Drones – Safety Information Bulletin (SIB)*. Cologne: EASA, n.d;
2. Federal Aviation Administration (FAA). *Wildlife Hazards and Bird Strike Data*. Washington, D.C.: FAA, n.d;
3. DJI. *Product Safety and Protective Accessories*. DJI Official Website. Accessed November 13, 2025;
4. “Drone Protective Cages and Propeller Guards.” DJI Official Website. Accessed November 13, 2025;
5. 3Dnatives. *Material Comparison for Drone Parts (CF Nylon, PETG, PC-CF)*. Accessed November 13, 2025. <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-materials-comparison-280120215/>;
6. 3Dnatives. *Best Materials for Drone Design & Crash Protection*. Accessed November 13, 2025. <https://www.3dnatives.com/en/>;
7. Georgian Aviation University. *Drone Safety Research Project, 2023–2025*. Scientific and Technical Research and Internal Research Materials. Tbilisi: Georgian Aviation University, 2025;
8. El-Sayed, Ahmed F. *Bird Strike in Aviation: Statistics, Analysis and Management*. 2019;
9. Wikipedia. “List of Birds of Georgia.” Accessed November 13, 2025; [https://ka.wikipedia.org/wiki/საქართველოს_ფრინველების_სია](https://ka.wikipedia.org/wiki/საქართველოს_ფრინველების_სია;);
10. Adjara Tourism and Resorts Department. *Bird Migration*. Batumi: Adjara Department of Tourism and Resorts, 2018, 3rd Quarter;
11. Abesadze, Bidzina, and Andro Maisuradze. “Theoretical Study of the Conditions of Bird Fragmentation on Protective Meshes of Aviation Gas-Turbine Engines.” *Air Transport* 1(15) (2021). Tbilisi: Georgian Aviation University.

სანაპირო ზოლში მომუშავე სამაშველო შვეულმფრენების და დრონების ფრენის უსაფრთხოების გაზრდა ძრავებში ფრინველების მოხვედრისგან დამცავი მოწყობილობების გამოყენებით.

ზურაბ კოპალეიშვილი
საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი
ქეთევან დედოფლის გამზირი № 16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: თანამედროვე დრონების, ანუ უპილოტო საფრენი აპარატების (UAV – Unmanned Aerial Vehicle), გამოყენება სწრაფად იზრდება როგორც სამოქალაქო, ისე სამხედრო სფეროებში. დრონების მეშვეობით ხორციელდება ტოპოგრაფიული გადაღება, ინფრასტრუქტურის მონიტორინგი, გადაუდებელი სამაშველო ოპერაციები და სხვა მრავალი მნიშვნელოვანი ამოცანა. ამ მექანიზმების წარმატებული ოპერირება დიდწილად დამოკიდებულია ფრენის გაზრდილ უსაფრთხოებაზე, მათ აეროდინამიკურ სტაბილურობაზე, ძრავების სიმძლავრეზე, საფრენი მარშრუტის შერჩევაზე და სხვა მრავალ ფაქტორზე.

ერთ-ერთი სერიოზული რისკ-ფაქტორი დაბალ სიმაღლეზე ფრენისას, ქალაქში, ქალაქგარეთ, განსაკუთრებით სანაპირო ზოლებში ან ტყის მასივებთან არის ფრინველებთან შეჯახება. დრონებისა და ფრინველების შეჯახება (Bird Strike) წარმოადგენს მზარდ საფრთხეს, რომელიც არა მხოლოდ თვითონ დრონის დაზიანებას იწვევს, არამედ შესაძლოა გამოიწვიოს პროპელერის მიერ ფრინველის ფრაგმენტების მოხვედრა ადამიანზე ან სტრუქტურაზე, რაც ქმნის მოსალოდნელ პოტენციურ ზიანის რისკს.

ამრიგად, დრონების უსაფრთხო ექსპლუატაცია მოითხოვს არამხოლოდ ტექნოლოგიურად მაღალ დონეს და მენეჯმენტს, არამედ გარემოსთან ადაპტირებული და ინტელექტუალური დაცვის სისტემების დანერგვას. ფრინველებთან შეჯახების პრევენცია კი ერთ-ერთი პრიორიტეტული ამოცანაა, რაც დღეისათვის, დრონების ფართო გამოყენების პირობებში, უფრო და უფრო აქტუალური ხდება.

საკვანძო სიტყვები: დრონი, დამცავი მოწყობილობა, ფრინველები, შვეულმფრენი

ძაბვათა კონცენტრაციის შესწავლა განსხვავებული სიხისტის ელემენტების შეერთების უბანში

სერგო ტეფნაძე¹, სოფიო ბლიაძე²

^{1,2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

თბილისი, ქეთევან დედოფლის გამზირი № 16, 0103 საქართველო

რეზიუმე: თანამედროვე საავიაციო კონსტრუქციებში მასის მინიმიზაციის მოთხოვნა ხშირად იწვევს ელემენტების სისქისა და სიხისტის ცვლილებას, რაც ძაბვათა თავმოყრის ძირითად წყაროს წარმოადგენს. ასეთი უბნები განსაკუთრებით კრიტიკულია თვითმფრინავის ფრთისა და გარსაცმის ელემენტებში, სადაც კონცენტრირებული ძაბვები მნიშვნელოვნად ამცირებს სტრუქტურის გამძლეობასა და საიმედოობას.

ნაშრომში განხილულია განსხვავებული სისქის ფოლადის ფირფიტების შეერთებისას წარმოქმნილი ძაბვათა კონცენტრაციის შემთხვევა, რომელიც გამოკვლეულია სასრული ელემენტების მეთოდით (ANSYS Workbench). მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ სისქეთა მკვეთრი გადასვლები იწვევს ძაბვათა მნიშვნელობების ზრდას, ხოლო გეომეტრიული გარდამავლობის სოლისებრი ფორმა ეფექტურად ამცირებს კონცენტრაციას.

კვლევის შედეგად დასტურდება, რომ ელემენტთა შეერთების გეომეტრიული ოპტიმიზაცია წარმოადგენს ეფექტურ საშუალებას ძაბვათა თავმოყრის შემცირებისა და კონსტრუქციის მას-სიმტკიცის ოპტიმალური ბალანსის მისაღწევად.

საკვანძო სიტყვები: ძაბვათა კონცენტრაცია, სისქის გარდამავალი უბანი, მასის მინიმიზაცია, სასრული ელემენტების მეთოდი, სტრუქტურული სიმტკიცე.

შესავალი

თანამედროვე საინჟინრო კონსტრუქციების გამძლეობა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია ელემენტებში წარმოქმნილი ძაბვათა განაწილების ერთგვაროვნებაზე. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ უბნებს, სადაც კონსტრუქციის გეომეტრია ან მასალა იცვლება — მსგავსი უბნები წარმოადგენს ძაბვათა თავმოყრის (კონცენტრაციის) პოტენციურ წყაროს.[1] აღნიშნული ეფექტი განსაკუთრებით აქტუალურია საავიაციო სფეროში, სადაც მასის მინიმიზაციისა და სიმტკიცის მოთხოვნების კომბინაცია კონსტრუქციულად რთულ ამოცანებს აჩენს.

საავიაციო კონსტრუქციების დამახასიათებელი თავისებურებაა ელემენტების მოქლონებითა და ჭანჭიკებით შეერთება, აგრეთვე მასის შემცირების მიზნით შესრულებული ნახვრეტები და სისქის ცვლილებები. სწორედ ასეთი უბნები წარმოადგენს ძაბვათა კონცენტრაციის კლასიკურ ადგილებს, რომლებიც დროთა განმავლობაში იწვევს მიკრობზარების გაჩენას და სტრუქტურული მდგრადობის დაკარგვას. ამდენად, ძაბვათა თავმოყრის

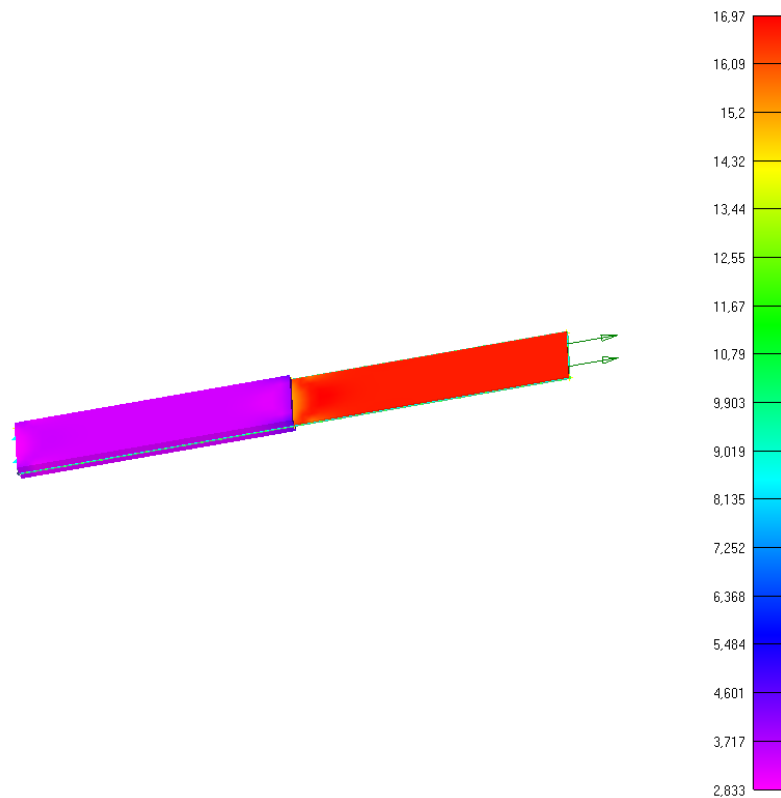
მექანიზმების შესწავლა და მათი შემცირების ეფექტური გზების პოვნა წარმოადგენს ერთ-ერთ პრიორიტეტულ მიმართულებას საავიაციო ინჟინერიაში.

ნაშრომში განხილულია განსხვავებული სისქის ფოლადის ფირფიტების შეერთებისას წარმოქმნილი ძაბვათა კონცენტრაციის შემთხვევა.[2] ანალიზი შესრულებულია სასრული ელემენტების მეთოდზე (FEM) დაფუძნებული პროგრამული პაკეტით *ANSYS Workbench*-ში, რომლის მეშვეობითაც გამოკვლეულია ძაბვათა განაწილება სხვადასხვა შეერთების კონფიგურაციაში. მიღებული შედეგები იძლევა მნიშვნელოვან ინფორმაციას სიხისტეთა სხვაობით გამოწვეული კონცენტრაციის შესახებ და აჩვენებს შესაძლო მეთოდს ასეთი უბნების განტვირთვისთვის.

ძირითადი ნაწილი

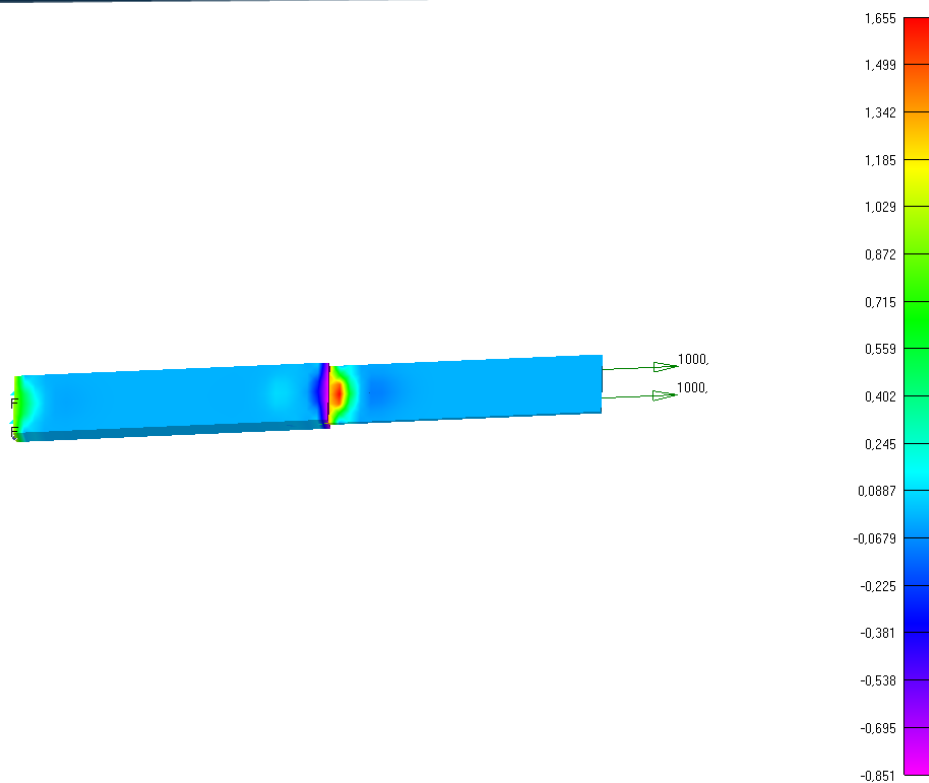
ანალიზის სწორად წარმართვის მიზნით განხილულია სამი მაგალითი:

მაგალითი №1. განვიხილოთ ერთმანეთთან შეერთებული ფოლადის ორი განსხვავებული სისქის ფირფიტა ზომით 150 x 30 მმ, რომელთა სისქეებია 2 მმ და 10 მმ, ამასთან, ფირფიტის მარცხენა კიდე ჩამაგრებულია ხისტად,[3] ხოლო ფირფიტის მარჯვენა კიდეზე მოდებულია თანაბარგანაწილებული ნორმალური ძალა $P=1000$ კგძ, ფირფიტები ერთმანეთთან შეერთებულია მცირე წიბოებით, დასმული ამოცანის ანალიზი ჩატარდა სასრულ ელემენტთა მეთოდზე დაფუძნებულ პროგრამულ კომპლექსს *Ansys workbench*. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენი შესწავლის მიზანს არ წარმოადგენს ძაბვების განსაზღვრა ჩამაგრების ადგილებში. ფირფიტები დაყოფილია 5x5 ზომის სასრულ ელემენტებად.[4] ფირფიტათა შეერთების მარცხენა და მარჯვენა ზოლში ძაბვათა მნიშვნელობები მოცემულია სურ. 1-ზე.



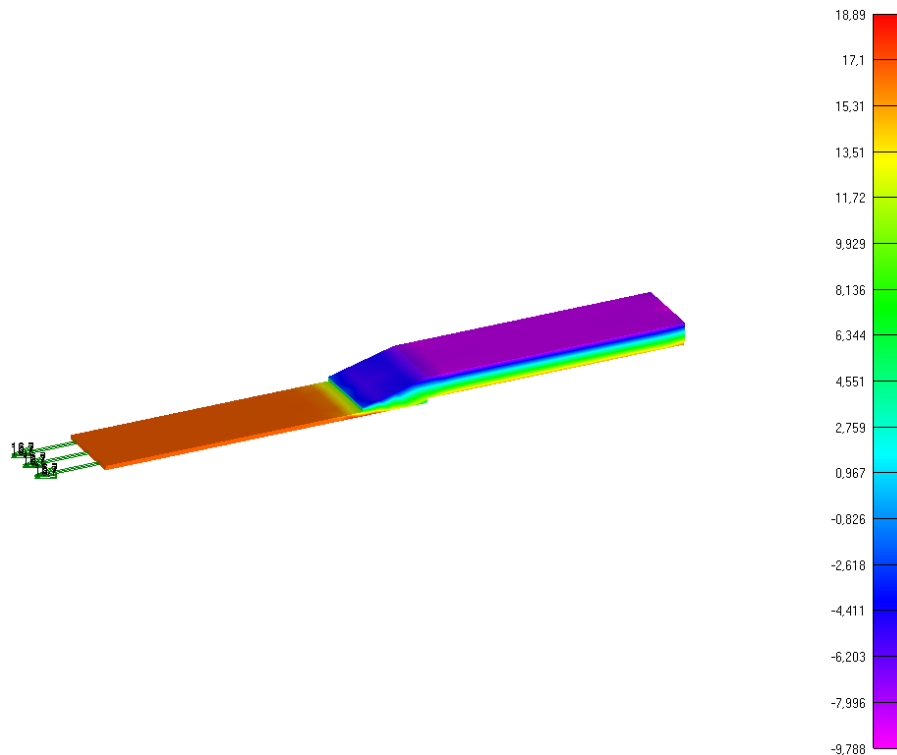
სურ. 1 ძაბვათა განაწილება №1 მაგალითისთვის

მაგალითი №2. განვიხილოთ ერთმანეთთან შეერთებული ფოლადის ორი განსხვავებული სისქის ფირფიტა, რომელთა საერთო ზომაა 280 x 30 მმ, რომლებიც ერთმანეთზე გადადებულია 20 მმ-ით და რომელთა სისქეებია 2 მმ და 10 მმ, ამასთან, ფირფიტის მარცხენა კიდე ჩამაგრებულია ხისტად, ხოლო ფირფიტის მარჯვენა კიდეზე მოდებულია თანაბარგანაწილებული ნორმალური ძალა $P=1000$ კგძ, [5] ფირფიტები ერთმანეთზე გადადებულია 20 მმ სიგრძეზე. დასმული ამოცანის ანალიზი ჩატარებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდზე დაფუძნებულ პროგრამულ კომპლექსს Ansys workbench. ამ შემთხვევაშიც ჩვენი შესწავლის მიზანს არ წარმოადგენს ძაბვების განსაზღვრა ჩამაგრების ადგილებში. ფირფიტები დაყოფილია 5x5 ზომის სასრულ ელემენტებად. ფირფიტათა შეერთების მარცხენა და მარჯვენა ზოლში ძაბვათა მნიშვნელობები მოცემულია სურ. 2-ზე.



სურ. 2 ძაბვათა განაწილება №2 მაგალითისთვის

მაგალითი №3. განვიხილოთ ერთმანეთთან შეერთებული ფოლადის ორი განსხვავებული სისქის ფირფიტა ზომით 150 x 30 მმ, რომელთა სისქეებია 2 მმ და 10 მმ ამასთან ფირფიტის მარცხენა კიდე ჩამაგრებულია ხისტად, ხოლო ფირფიტის მარჯვენა კიდეზე მოდებულია თანაბარგანაწილებული ნორმალური ძალა $P=100$ კგ. სურ. 3-ზე ნათლად ჩანს ერთმანეთზე გადადებული ნაწილი სოლისებრია, დასმული ამოცანის ანალიზი ჩავატაროთ სასრულ ელემენტთა მეთოდზე დაფუძნებულ დაფუძნებულ პროგრამულ კომპლექსს Ansys workbench. ამ შემთხვევაშიც ჩვენი შესწავლის მიზანს არ წარმოადგენს ძაბვების განსაზღვრა ჩამაგრების ადგილებში. ფირფიტები დაყოფილია 5x5 ზომის სასრულ ელემენტებად.[6] ფირფიტათა შეერთების მარცხენა და მარჯვენა ზოლში ძაბვათა მნიშვნელობები მოცემულია სურ. 3-ზე.



სურ. 3 ძაბვათა განაწილება №3 მაგალითისთვის

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევის შედეგებმა ნათლად აჩვენა, რომ განსხვავებული სისქის ფირფიტების შეერთების ზონებში ძაბვათა მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად განსხვავდება, განსაკუთრებით კი იქ, სადაც სიხისტის ცვლილება მკვეთრია. ანალიზის მიხედვით, ამ უბნებში ძაბვები ზოგ შემთხვევაში რამდენჯერმე აღემატება ფირფიტის საშუალო ძაბვებს, რაც დიდ გავლენას ახდენს კონსტრუქციის საერთო გამძლეობასა და მისი ცოცვადობის ან ბზარწარმოქმნის ტენდენციაზე.

დაკვირვებებმა დაანგარიშებულ მაგალითებში ცხადყო, რომ სისქეთა გარდამავალი უბნების გეომეტრიული გაუმჯობესება მნიშვნელოვნად ამცირებს ძაბვათა თავმოყრას. კერძოდ, მესამე მაგალითში წარმოდგენილი სოლისებრი გარდამავალი ფორმა ეფექტურად ამცირებს ძაბვათა პიკებს შეერთების ზონაში და უზრუნველყოფს უფრო თანაბარ ძაბვათა განაწილებას. აღნიშნული შედეგი ადასტურებს, რომ გეომეტრიული მოდიფიკაცია წარმოადგენს მარტივ და ეფექტურ საშუალებას ძაბვათა კონცენტრაციისგან გამოწვეული დაზიანებების პრევენციისთვის.

კვლევის შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც საავიაციო, ისე სხვა საინჟინრო დისციპლინებში, სადაც საჭიროა მსუბუქი, მაგრამ გამძლე კონსტრუქციების შექმნა. შემდგომი კვლევები მიზნად უნდა ისახავდეს სხვადასხვა მასალებისა და შეერთების ტიპების ანალიზს, აგრეთვე ექსპერიმენტული მონაცემების შედარებას რიცხვითი მოდელების შედეგებთან, რაც გაამყარებს მიღებული დასკვნების სანდოობას და შეუწყობს ხელს კონსტრუქციული ელემენტების უსაფრთხოებისა და საიმედოობის ზრდას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. ს. ბლიაძე, ზ. სესკურია, კ. ჯაფარიძე კონსტრუქციების მოდელირება და სტრუქტურული ანალიზი MSC/NASTRAN v.4-ში. გამომცემლობა „თბილისი“, 2008 წ., 339 გვ;
2. H. Jane Helena, Theory of elasticity and plasticity PHI learning 2017y 264p;
3. P. Wriggers, Nonlinear Finite Element Methods, 2008y, 122p;
4. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 2013y, p36;
5. M. Gadala, Finite Elements for Engineers with Ansys Applications, 2020y, p48;
6. I. Babuska, J. Whiteman, T. Strouboulis, Finite Elements: An Introduction to the Method and Error Estimation, 2010y, p102.

Study of Stress Concentration in the Junction Zone of Elements with Different Stiffness

Sergo Tepnadze¹, Sophio Bliadze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *In modern aerospace structures, the requirement for mass minimization often leads to variations in the thickness and stiffness of structural elements, which become major sources of stress concentration. Such regions are particularly critical in aircraft wing and fuselage components, where localized stresses significantly reduce structural strength and reliability.*

This paper examines the case of stress concentration arising at the junction of steel plates with different thicknesses, analyzed using the Finite Element Method (ANSYS Workbench). The obtained results show that abrupt transitions in thickness lead to a considerable increase in stress levels, whereas a tapered geometric transition effectively reduces concentration zones.

The study demonstrates that geometric optimization of element junctions is an effective approach for mitigating stress concentration and achieving an optimal balance between mass and structural strength.

Keywords: *stress concentration, thickness transition zone, mass minimization, finite element method, structural strength.*

საფრენი აპარატების ტექნიკური მომსახურების გაუმჯობესება და უსაფრთხოების ზომების გაზრდა

ბიძინა აბესაძე¹, ცეზარი გაბაძე²

^{1,2}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: საჰაერო ტრანსპორტი თანამედროვე სამყაროს ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი სფეროა, რომელიც უზრუნველყოფს გლობალური ეკონომიკური, კულტურული და ტექნოლოგიური ურთიერთობების უწყვეტობას. ფრენების რაოდენობის ზრდამ ბოლო ათწლეულებში მნიშვნელოვნად გაზარდა უსაფრთხოებისადმი მოთხოვნა და ტექნიკური მომსახურების ხარისხის მნიშვნელობა. ნაშრომში განხილულია ავიაციის ტექნიკური მომსახურების სისტემის როლი საფრენი აპარატების უსაფრთხო ექსპლუატაციაში, საერთაშორისო სტანდარტების გავლენა და ტექნოლოგიური ინოვაციები, რომლებიც ხელს უწყობს ავარიული შემთხვევების პრევენციას.

მოცემულია საერთაშორისო ორგანიზაციების ICAO, IATA და EASA რეგულაციებზე დაფუძნებული ანალიზი, ასევე განხილულია კონკრეტული ავიაკატასტროფების მიზეზები არასათანადოდ ჩატარებული მომსახურების ტექნიკური მაგალითზე. შედეგები მიუთითებს, რომ უსაფრთხოების მაღალი დონე მიიღწევა მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ტექნიკური მომსახურება ეფუძნება მონაცემებზე დამყარებულ პროგნოზირებად მოდელს, პროფესიული განათლების უწყვეტ პროცესს და თანამედროვე ციფრულ ტექნოლოგიებს. კვლევა ადასტურებს, რომ უსაფრთხოების კულტურის გაძლიერება და ინოვაციური მიდგომების დანერგვა აუცილებელია საქართველოსა და გლობალური ავიაციის მდგრადი განვითარებისათვის.

საკვანძო სიტყვები: ავიაცია, უსაფრთხოება, ტექნიკური მომსახურება, რისკის მართვა, ინოვაცია.

შესავალი

საჰაერო ტრანსპორტის განვითარება კაცობრიობის ისტორიაში ერთ-ერთ უდიდეს მიღწევად მიიჩნევა. 1903 წელს ძმები რაიტების პირველი წარმატებული ფრენიდან დღემდე ავიაცია იქცა ტექნოლოგიური პროგრესისა და გლობალური ინტეგრაციის სიმბოლოდ [1]. თვითმფრინავებმა რადიკალურად შეცვალეს გადაადგილების, კომერციისა და საერთაშორისო ურთიერთობების ფორმა. დღესდღეობით მსოფლიოს მოსახლეობის მილიარდობით ადამიანი სარგებლობს საჰაერო ტრანსპორტით, ხოლო ფრენების წლიური რაოდენობა, მაგალითად, 2023 წლისთვის 40 მილიონს აღემატება [8].

თანამედროვე ავიაციის სწრაფი ზრდა ქმნის მნიშვნელოვან გამოწვევებს უსაფრთხოების მიმართულებით. მიუხედავად იმისა, რომ თვითმფრინავი, სტატისტიკურად, ითვლება ყველაზე უსაფრთხო სატრანსპორტო საშუალებად [9], ავიაკატასტროფების მიზეზების ანალიზი

ცხადყოფს, რომ მათ შორის მნიშვნელოვანი წილი უკავშირდება ტექნიკურ გაუმართაობებსა და მომსახურების სისტემის ხარვეზებს [10].

საჰაერო ტრანსპორტის უსაფრთხოების უზრუნველყოფა მოითხოვს მკაფიოდ განსაზღვრულ რეგულაციებსა და სტანდარტებს. საერთაშორისო სამოქალაქო ავიაციის ორგანიზაცია (ICAO) ქმნის ნორმატიულ ჩარჩოს, რომელიც განსაზღვრავს ტექნიკური მომსახურების, სერტიფიცირების და ოპერაციული კონტროლის ძირითად პრინციპებს [6, 7]. ევროპის საავიაციო უსაფრთხოების სააგენტო (EASA) და საერთაშორისო საჰაერო ტრანსპორტის ასოციაცია (IATA) ავითარებენ დამატებით პროგრამებს და სტატისტიკურ მონიტორინგს, რაც საშუალებას იძლევა შეფასდეს ავიაკომპანიების უსაფრთხოების მაჩვენებლები გლობალურ დონეზე [9].

ტექნიკური მომსახურება წარმოადგენს ფრენის უსაფრთხოების მთავარ საყრდენს. თვითმფრინავის თითოეული კომპონენტი, ძრავიდან დაწყებული, მართვის სისტემებით დასრულებული, საჭიროებს რეგულარულ შემოწმებას და პროფილაქტიკას [14]. ნებისმიერი გადახრა ან დაუდევრობა ტექნიკურ ოპერაციებში შეიძლება გახდეს ავარიის წინაპირობა. სწორედ ამიტომ, ტექნიკური მომსახურება უნდა ემყარებოდეს მკაცრ რეგლამენტაციას, მაღალკვალიფიციურ პერსონალსა და თანამედროვე ტექნოლოგიებს.

დღეს აქტიურად მიმდინარეობს ტექნიკური მომსახურების სისტემის გარდაქმნა ტრადიციული პერიოდული შემოწმებიდან პროგნოზირებად და მონაცემებზე დაფუძნებულ მოდელზე (Predictive Maintenance), რომელიც უზრუნველყოფს გაუმართაობის იდენტიფიცირებას მანამდე, სანამ ის რეალურ საფრთხედ იქცევა [13]. ეს მიდგომა ეფუძნება ინტერნეტზე დაკავშირებული სენსორების (IoT) და ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის დიაგნოსტიკის სიზუსტესა და ეფექტიანობას [14].

საქართველოსთვის, როგორც სწრაფად განვითარებადი ავიაციის ქვეყნისთვის, აღნიშნული საკითხი განსაკუთრებით აქტუალურია. ქვეყნის საჰაერო სივრცეში საერთაშორისო ფრენების ინტენსივობა ყოველწლიურად იზრდება, რაც მოითხოვს ტექნიკური მომსახურების სისტემების გაძლიერებას, რეგულაციების შესაბამისობას საერთაშორისო სტანდარტებთან და ავიაციის სპეციალისტთა გადამზადებას [2, 3].

ნაშრომის მიზანია გამოკვლეულ იქნას საფრენი აპარატების ტექნიკური მომსახურების გაუმჯობესების გზები, უსაფრთხოების მართვის სისტემების მნიშვნელობა და თანამედროვე ტექნოლოგიური მიდგომების ინტეგრაციის შესაძლებლობები, როგორც საქართველოს, ისე საერთაშორისო კონტექსტში.

ძირითადი ნაწილი

საჰაერო ტრანსპორტის განვითარება მე-20 საუკუნის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მიღწევად იქცა. თავდაპირველად თვითმფრინავების კონსტრუქცია ეფუძნებოდა მარტივ მექანიკურ პრინციპებს და მათი ტექნიკური მომსახურება ძირითადად მოიცავდა ვიზუალურ შემოწმებასა და მარტივი მექანიკური დეტალების შეცვლას. თუმცა, ფრენის სიხშირისა და აპარატების სირთულის ზრდასთან ერთად, ტექნიკური მომსახურების როლი გადაიზარდა სტრატეგიულ, უსაფრთხოების კრიტიკულ კომპონენტად [1].

1940–50-იან წლებში, როდესაც დაიწყო რეაქტიული ძრავების ეპოქა, ტექნიკური მომსახურება გახდა სტრუქტურირებული და რეგლამენტირებული პროცესი. ამ პერიოდში ჩამოყალიბდა საერთაშორისო სტანდარტები, რომლებიც განსაზღვრავდა ავიაციის ტექნიკური ოპერაციების შესრულების წესებს. შემუშავდა გეგმური შემოწმების ციკლები (A-check, B-check, C-check, D-check), რომელთა მიზანი იყო თითოეული კომპონენტის გამართულობისა და ფრენის უსაფრთხოების გარანტია [14].

თანამედროვე ეპოქაში ავიაციის ტექნიკური მომსახურება მოიცავს არა მხოლოდ აპარატურის შეკეთებას, არამედ პრევენციული კონტროლის სისტემებსაც. მონაცემთა შეგროვება რეალურ დროში, ავტომატური დიაგნოსტიკა, condition-based maintenance და ხელოვნური ინტელექტის ალგორითმები უკვე წარმოადგენს ტექნიკური სისტემების განუყოფელ ნაწილს [9, 13].

ტექნიკური მომსახურების ეფექტიანობის ზრდა განაპირობებს ფრენის უსაფრთხოების მაღალ დონეს. მაგალითად, IATA-ს მონაცემებით, იმ ავიაკომპანიებში, რომლებმაც დანერგეს უსაფრთხოების მართვის სისტემა (Safety Management System — SMS), ავარიულ შემთხვევათა მაჩვენებელი 40%-ით შემცირდა 10-წლიანი პერიოდის განმავლობაში.

საერთაშორისო სტანდარტები და რეგულაციური სტრუქტურები:

საჰაერო ტრანსპორტის უსაფრთხოება ეფუძნება მკაცრ საერთაშორისო რეგულაციებს. მთავარი ორგანოები, რომლებიც პასუხისმგებელნი არიან ამ სფეროზე, არის:

- ICAO (International Civil Aviation Organization) — განსაზღვრავს საერთაშორისო ნორმებსა და რეკომენდაციებს (SARPs), რომლებიც შემდგომ ინერგება წევრ ქვეყნებში.
- IATA (International Air Transport Association) — ახორციელებს ავიაკომპანიების ოპერაციულ და ტექნიკურ სტანდარტიზაციას.
- EASA (European Union Aviation Safety Agency) — რეგულირებს ევროკავშირის ფარგლებში მოქმედი ავიაციის უსაფრთხოების პოლიტიკას [2, 6, 7, 11].

ICAO-ს Annex 6 განსაზღვრავს საჰაერო ხომალდის ექსპლუატაციის უსაფრთხოების მოთხოვნებს, ხოლო Annex 8 ეხება თვითმფრინავის ფრენის ტექნიკურ კრიტერიუმებს. ორივე დოკუმენტი მკაფიოდ განსაზღვრავს, რომ ტექნიკური მომსახურება უნდა განხორციელდეს მხოლოდ სერტიფიცირებული სპეციალისტების მიერ, ხოლო ყველა პროცედურა უნდა იყოს დოკუმენტირებული და შემოწმებადი [6, 7].

საქართველოს საავიაციო სააგენტო, როგორც ICAO-ს წევრი ქვეყნის ორგანო, ახორციელებს შესაბამისი საერთაშორისო ნორმების იმპლემენტაციას ადგილობრივ რეგულაციებში. საქართველოს „სამოქალაქო ავიაციის კოდექსი“ განსაზღვრავს ტექნიკური მომსახურების ორგანიზაციების სერტიფიცირების წესებს და მათ კონტროლს.

საერთაშორისო სტანდარტების ერთიანი სისტემის არსებობა უზრუნველყოფს არა მხოლოდ უსაფრთხო ფრენას, არამედ ტექნიკური ოპერაციების ერთგვაროვნებას გლობალურ მასშტაბზე. მაგალითად, Boeing 737 ტიპის თვითმფრინავის შემოწმება თბილისის საერთაშორისო აეროპორტში უნდა ემთხვეოდეს იმავე პროცედურებს, რომლებიც გამოიყენება ფრანკფურტის ან ტოკიოს აეროპორტებში.

ტექნიკური მომსახურების სისტემის ოპტიმიზაცია და ინოვაციური მიდგომები:

ტექნიკური მომსახურების ოპტიმიზაცია გულისხმობს რესურსების რაციონალურ გამოყენებას, დროის შემცირებას და უსაფრთხოების მაქსიმალურ შენარჩუნებას. ტრადიციულად ტექნიკური შემოწმება ხდებოდა ფიქსირებული ინტერვალებით, რაც ხშირად იწვევდა ზედმეტ ხარჯებს ან არასაკმარის სამუშაოებს.

თანამედროვე მიდგომა ეფუძნება პროგნოზირებად და მონაცემებზე დაფუძნებულ მომსახურებას (Predictive Maintenance). თვითმფრინავების ბორტზე არსებული სენსორები მუდმივად აგზავნიან ინფორმაციას ძრავების ტემპერატურაზე, ვიბრაციაზე, წნევაზე და სხვა პარამეტრებზე. ეს მონაცემები იწერება ცენტრალურ სერვერზე და სპეციალური ალგორითმების მეშვეობით ხდება ანომალიების იდენტიფიცირება მანამდე, სანამ რეალური გაუმართაობა მოხდება [14].

ამ სისტემამ მნიშვნელოვნად შეამცირა დაუგეგმავი შეკეთებების რაოდენობა. მაგალითად, Airbus A350 მოდელის შემთხვევაში გამოყენებული „Airman“ პლატფორმა საშუალებას იძლევა ტექნიკურმა პერსონალმა მიიღოს შეტყობინება ნებისმიერი მცირე გადახრის შესახებ ძრავის პარამეტრებში, რაც ზრდის ფრენის უსაფრთხოებას და ამცირებს ექსპლუატაციის ხარჯებს [8, 10].

გარდა ამისა, ტექნიკური პერსონალის მომზადება და რეგულარული ტრენინგი წარმოადგენს უსაფრთხოების სისტემის უმნიშვნელოვანეს რგოლს. თანამედროვე ავიაკომპანიები იყენებენ ვირტუალურ სიმულატორებს, რომლითაც ტექნიკოსებს შეუძლიათ ისწავლონ გაუმართაობების მოდელირება და რეაგირება კრიტიკულ სიტუაციებში რეალური საფრთხის გარეშე.

უსაფრთხოების მართვის თანამედროვე მიდგომა ეფუძნება პრინციპს, რომ ინციდენტის თავიდან აცილება უფრო იაფი და ეფექტიანია, ვიდრე მისი შედეგების ლიკვიდაცია. რისკის მართვა მოიცავს საფრთხეების იდენტიფიცირებას, შეფასებასა და პრიორიტეტების მინიჭებას.

ICAO-ს რეკომენდაციის მიხედვით, ყველა ავიაკომპანიას უნდა ჰქონდეს Safety Management System (SMS), რომელიც მოიცავს ოთხ ძირითად კომპონენტს [11, 13]:

1. უსაფრთხოების პოლიტიკა და მიზნები;
2. რისკების იდენტიფიკაცია და შეფასება;
3. უსაფრთხოების უზრუნველყოფა;
4. უწყვეტი გაუმჯობესება.

სისტემური მიდგომა გულისხმობს, რომ ყოველი ინციდენტი განიხილება როგორც სასწავლო შემთხვევა. მაგალითად, მცირე ტექნიკური შეფერხება შეიძლება გახდეს მიზეზი უფრო ფართო ანალიზისა, რომლის შედეგადაც ხდება პროტოკოლების კორექტირება.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ადამიანურ ფაქტორს, რომელიც ხშირად წარმოადგენს ავარიების მთავარ მიზეზს. კვლევების თანახმად, საავიაციო ინციდენტთა 70%-ზე მეტი გამოწვეულია ადამიანური შეცდომით, იქნება ეს ტექნიკოსის, დისპეტჩერის თუ ეკიპაჟის წევრის მხრიდან [12, 15]. ამდენად, უსაფრთხოების კულტურის განვითარება და თანამშრომელთა პასუხისმგებლობის ზრდა აუცილებელია ეფექტიანი ტექნიკური სისტემის ფუნქციონირებისთვის.

ავარიული შემთხვევების ანალიზი და გამომწვევი მიზეზები:

ბოლო ათწლეულების განმავლობაში დაფიქსირებული ავიაკატასტროფების ანალიზი ცხადყოფს, რომ უმეტეს შემთხვევაში მიზეზი არის ტექნიკური გაუმართაობა, რომელიც დროულად ვერ იქნა აღმოჩენილი.

მაგალითად:

- Asiana Airlines-ის რეისი 214 — ეკიპაჟის შეცდომამ და არასათანადო ტექნიკურმა კონტროლმა გამოიწვია თვითმფრინავის დაშება ასაფრენ-დასაფრენ ზოლზე უფრო ადრე, რის შედეგადაც მოხდა თვითმფრინავის დაზიანება;
- United Airlines-ის რეისი 232 — ძრავის მექანიკური გაუმართაობა გამოწვეული იყო კონსტრუქციის დეფექტით, რომელიც ვერ იქნა გამოვლენილი ტექნიკური შემოწმებისას [10];
- Ethiopian Airlines-ის რეისი 961 — წნევის დაკარგვა სალონში და ტექნიკური პრობლემისას არასწორი რეაგირება გახდა კატასტროფის მიზეზი.

ამ შემთხვევებმა აჩვენა, რომ აუცილებელია მრავალდონიანი კონტროლის სისტემა, რომელიც მოიცავს როგორც ტექნიკურ დიაგნოსტიკას, ისე ეკიპაჟის მომზადების მაღალი სტანდარტებს.

თანამედროვე მიდგომით, ავიაკომპანიები ქმნიან Flight Data Monitoring (FDM) სისტემებს, რომლებიც აგროვებენ ფრენის მონაცემებს და იძლევიან ანალიზის საშუალებას ყოველი ფრენის შემდეგ. ეს მონაცემები საშუალებას იძლევა წინასწარ გამოვლინდეს არასტაბილური პროცესები, რაც მნიშვნელოვანად ამცირებს ინციდენტების ალბათობას.

ტექნოლოგიური ინოვაციები ტექნიკურ მომსახურებაში:

ინოვაციები წარმოადგენს ავიაციის განვითარების მთავარ მამოძრავებელ ძალას. ტექნიკური მომსახურების სფეროში ბოლო წლებში განსაკუთრებით აქტუალური გახდა შემდეგი მიმართულებები:

1. IoT და დისტანციური მონიტორინგი – თვითმფრინავების ნაწილებში ჩამონტაჟებული სენსორები მუდმივად აგზავნიან მონაცემებს მიწის სერვერებზე, რაც იძლევა რეალურ დროში დიაგნოსტიკის შესაძლებლობას [13, 14].
2. ხელოვნური ინტელექტი და Machine Learning – პროგნოზირებადი ალგორითმები იყენებენ წარსულ მონაცემებს გაუმართაობის ალბათობის განსასაზღვრად.
3. Augmented Reality (AR) ტექნოლოგიები – ტექნიკოსები იყენებენ ჭკვიან სათვალეებს, რომლებსაც შეუძლიათ აჩვენონ დეტალური ინსტრუქციები სამუშაოს შესრულებისას.
4. 3D ბეჭდვა – გარკვეული კომპონენტების სწრაფი წარმოება ადგილზე ამცირებს ლოდინის დროს და ზრდის ოპერაციულ მოქნილობას.

ასეთი ტექნოლოგიების დანერგვა ზრდის სანდობას, ამცირებს ადამიანურ შეცდომას და უზრუნველყოფს უსაფრთხო ექსპლუატაციას.

ტექნიკური მომსახურების ხარისხი დამოკიდებულია არა მხოლოდ ტექნოლოგიაზე, არამედ ადამიანზე, რომელიც ამ სისტემებს მართავს. ტექნიკოსების რეგულარული გადამზადება,

სერტიფიცირება და უნარების შეფასება წარმოადგენს უსაფრთხოების კულტურის მთავარ ბირთვს.

საერთაშორისო პრაქტიკაში მიღებულია „Just Culture“-ის კონცეფცია, რომელიც მოითხოვს ღიად აღიარებასა და შეცდომების ანალიზს სასჯელის გარეშე, რაც ხელს უწყობს გამოცდილების გაზიარებას და სისტემური შეცდომების აღმოფხვრას [11, 15].

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი და სხვა სპეციალიზებული ცენტრები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ტექნიკური პერსონალის მომზადებაში, რაც პირდაპირ აისახება ეროვნული ავიაციის უსაფრთხოებაზე [3].

გლობალური თანამშრომლობა და უსაფრთხოების კულტურის განვითარება:

გლობალური ავიაციის უსაფრთხოების სისტემა ეფუძნება თანამშრომლობას, ინფორმაციის გაზიარებას ავიაკომპანიებს, მწარმოებლებს, ტექნიკურ სააგენტოებსა და რეგულატორებს შორის. უსაფრთხოების კულტურა არ განისაზღვრება მხოლოდ რეგულაციებით, ის ეფუძნება მენეჯმენტის ღირებულებებს, ორგანიზაციულ სტრუქტურასა და პროფესიული ეთიკის სტანდარტებს.

უსაფრთხოების მართვის სისტემის მიზანია შექმნას გარემო, სადაც ყოველი თანამშრომელი აცნობიერებს საკუთარ როლს საერთო უსაფრთხოების უზრუნველყოფაში. მხოლოდ ამ გზითაა შესაძლებელი თანამედროვე საფრენი აპარატების საიმედო და უსაფრთხო ექსპლუატაცია გლობალურ დონეზე.

დასკვნა

საჰაერო ტრანსპორტი წარმოადგენს თანამედროვე სამყაროს ერთ-ერთ უმთავრეს საყრდენს, რომელიც განსაზღვრავს გლობალური ეკონომიკის, ტურიზმისა და ტექნოლოგიური განვითარების დინამიკას. მისი უსაფრთხო და საიმედო ფუნქციონირება დამოკიდებულია არა მხოლოდ თანამედროვე ინჟინერიაზე, არამედ სწორად ორგანიზებულ ტექნიკურ მომსახურებაზე და უსაფრთხოების მართვის კულტურაზე.

კვლევის შედეგად დასტურდება, რომ ტექნიკური მომსახურება წარმოადგენს ფრენის უსაფრთხოების ერთ-ერთ ყველაზე კრიტიკულ ფაქტორს. ყოველი გაუმართაობა, თუნდაც უმნიშვნელო დეტალის დონეზე, შეიძლება გადაიზარდოს კატასტროფულ შედეგებში, ამიტომ აუცილებელია ტექნიკური პროცესების სრული სტანდარტიზაცია და მკაცრი კონტროლი.

საერთაშორისო გამოცდილება აჩვენებს, რომ უსაფრთხოების მართვის სისტემების (SMS) დანერგვა და მონაცემებზე დაფუძნებული ტექნიკური მომსახურება მნიშვნელოვნად ამცირებს ინციდენტებისა და ავარიების რაოდენობას. IoT სენსორები და ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ქმნის ახალ სტანდარტს, რომლის მიზანია საფრთხეების იდენტიფიცირება მანამდე, სანამ ისინი გადაიზრდებიან რეალურ პრობლემებში.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ადამიანურ ფაქტორს, ტექნიკური პერსონალის პროფესიონალიზმს, პასუხისმგებლობასა და უწყვეტ განათლებას. თანამედროვე პირობებში ტექნიკოსი მხოლოდ შემსრულებელი აღარ არის. ის არის უსაფრთხოების სისტემის სრულფასოვანი მონაწილე, რომელსაც ეკისრება დიდი ტექნიკური და ეთიკური

პასუხისმგებლობა. სწორედ ამიტომ, აუცილებელია რეგულარული ტრენინგები, საერთაშორისო სერტიფიკაციის პროგრამები და ცოდნის განახლების უწყვეტი პროცესი.

ეკონომიკური ეფექტიანობისა და უსაფრთხოების ბალანსის შენარჩუნება ასევე წარმოადგენს მნიშვნელოვანი გამოწვევას. ტექნიკური მომსახურების ხარჯების შემცირება არ უნდა აისახოს უსაფრთხოების ხარისხზე. ამ მიზნის მისაღწევად საჭიროა ოპტიმიზაციის მოდელების დანერგვა, რომლებიც ეყრდნობა სტატისტიკურ ანალიზს და რეალურ მონაცემებს თვითმფრინავების მდგომარეობის შესახებ.

კვლევა ადასტურებს, რომ უსაფრთხოების მაღალი დონე მიღწევადია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც ტექნიკური, ორგანიზაციული და ადამიანური ფაქტორები თანმიმდევრულად და ჰარმონიულად მუშაობენ. უსაფრთხოება არ არის ერთჯერადი მიზანი ის არის უწყვეტი პროცესი, რომელიც მოითხოვს მუდმივ მონიტორინგს, შეფასებასა და გაუმჯობესებას. გლობალური თანამშრომლობა, საერთაშორისო სტანდარტების დაცვა და ინოვაციური ტექნოლოგიების ინტეგრაცია ქმნის იმ საფუძველს, რომელიც უზრუნველყოფს საავიაციო ინდუსტრიის უსაფრთხო მომავალს.

საქართველოსთვის, როგორც ავიაციის თვალსაზრისით განვითარებადი ქვეყნისთვის, ეს მიდგომა განსაკუთრებით აქტუალურია. ტექნიკური მომსახურების სისტემის დახვეწა, სპეციალისტების გადამზადება და საერთაშორისო პრაქტიკის ინტეგრირება არის აუცილებელი წინაპირობა, რათა საქართველოს საჰაერო სივრცე დარჩეს უსაფრთხო, საიმედო და კონკურენტუნარიანი გლობალურ ბაზარზე.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. საჰაერო ხომალდების ტექნიკური მომსახურების ორგანიზაცია და უსაფრთხოების მართვის სისტემები. თბილისი: საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, 2023;
2. საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტო. სამოქალაქო ავიაციის კოდექსი. თბილისი, 2019;
3. ქავთარაძე, გ. საჰაერო ტრანსპორტის უსაფრთხოების საფუძვლები. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტის გამომცემლობა, 2021;
4. შარაშენიძე, ლ. „ავიაციის განვითარება და ტექნიკური მომსახურების როლი უსაფრთხო ფრენებში.“ საქართველოს სამეცნიერო ჟურნალები, №4, 2022;
5. თოდუა, რ. ტრანსპორტის უსაფრთხოების ეკონომიკური ასპექტები. თბილისი: უნივერსალური, 2020;
6. ICAO. Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation: Operation of Aircraft. Montreal: ICAO, 2022;
7. ICAO. Annex 8: Airworthiness of Aircraft. Montreal: ICAO, 2020;
8. IATA. Safety Report 2023. Montreal: International Air Transport Association, 2023;
9. EASA. European Plan for Aviation Safety 2023–2027. Cologne: European Union Aviation Safety Agency, 2023;
10. Boeing Commercial Airplanes. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide 1959–2022. Seattle: Boeing, 2023;
11. FAA. Advisory Circular 120-92B: Safety Management Systems for Aviation Service Providers. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2021;
12. Reason, James. Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot: Ashgate Publishing, 1997;
13. Stolzer, Alan J., Carl Halford, and John Goglia. Safety Management Systems in Aviation. 3rd ed. New York: Routledge, 2022;

14. Kinnison, Harry A., and Tariq Siddiqui. *Aviation Maintenance Management*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017;
15. Li, Wen-Chin, and Dennis A. Berman. "Human Factors in Aircraft Maintenance: A Review." *Aerospace Science and Technology* 112 (2021): 106600.

Improvement of Aircraft Maintenance and Enhancement of Safety Measures

Bidzina Abesadze¹, Tsezar Gabadze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *Air transport is one of the most vital sectors of the modern world, ensuring the continuous operation of global economic, cultural, and technological interactions. The increase in the number of flights over recent decades has significantly raised the demand for safety and the importance of maintenance quality. This paper discusses the role of aviation maintenance systems in the safe operation of aircraft, the impact of international standards, and the technological innovations that contribute to the prevention of accidents.*

The study presents an analysis based on the regulations of international organizations such as ICAO, IATA, and EASA, and examines specific causes of aviation accidents related to improper or insufficient maintenance practices. The results indicate that a high level of safety can be achieved only when maintenance processes are based on data-driven predictive models, continuous professional education, and modern digital technologies.

The research confirms that strengthening safety culture and implementing innovative approaches are essential for the sustainable development of both Georgian and global aviation.

Keywords: *Aviation, safety, maintenance, risk management, innovation.*

Tecnam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდის საექსპლუატაციო მახასიათებლების კვლევა და ანალიზი

ნიკა თიკანაშვილი¹, თორნიკე ტეფნაძე²

^{1,2}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომი აერთიანებს Tecnam P2008 ტიპის მსუბუქი საჰაერო ხომალდის საექსპლუატაციო მახასიათებლების მრავალმხრივ კვლევასა და ანალიზს, რომლის მიზანია განსაზღვროს აღნიშნული ტიპის თვითმფრინავის ძირითადი უპირატესობები და მათი გავლენა ფრენის უსაფრთხოებაზე. კვლევა ეფუძნება თვითმფრინავის ტექნიკურ დოკუმენტაციას, ექსპლუატაციის სახელმძღვანელოებსა და საერთაშორისო მარეგულირებელი სტანდარტების შედარებით ანალიზს.

სტატიის ფარგლებში განხილულია თვითმფრინავის სიჩქარით და მანევრირებით დაკავშირებული კრიტიკული პარამეტრები (VNE, VA, VX, VY), მათი ზეგავლენა პილოტის გადაწყვეტილების პროცესზე და უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მექანიზმები. წარმოდგენილია ანალიზი Cessna 172, Diamond DA20 და Pipistrel SW121 შედარებითი მოდელებთან ადასტურებს Tecnam P2008-ის მაღალ ეფექტიანობას, მართვის სიმარტივესა და ეკონომიურობას.

კვლევის შედეგები ადასტურებს, რომ Tecnam P2008 წარმოადგენს თანამედროვე მსუბუქი ავიაციის სტანდარტების შესაბამის თვითმფრინავს, რომელიც აერთიანებს ტექნოლოგიურ ინოვაციას, ეკონომიურობას და ფრენის უსაფრთხოების მაღალ დონეს. მისი გამოყენება განსაკუთრებით მიზანშეწონილია საფრენოსნო მომზადების ეფექტური განხორციელებისთვის.

საკვანძო სიტყვები: Tecnam P2008, საექსპლუატაციო მახასიათებლები, ფრენის უსაფრთხოება.

შესავალი

დღევანდელი მსოფლიოს ცვალებად და მაღალტექნოლოგიურ გარემოში მსუბუქი საჰაერო ხომალდები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ, არა მხოლოდ კერძო და სამოყვარულო ავიაციაში, არამედ ასევე პროფესიულ მომზადებასა და საჰაერო ტრანსპორტის სპეციფიკური მიმართულებით. მსუბუქი კლასის თვითმფრინავების მრავალმხრივი გამოყენება განაპირობებს მათ მიმართ მზარდ ინტერესს, როგორც მომხმარებელთა, ისე ავიაციის პროფესიონალების მხრიდან. სწორედ ამ კუთხით გამოირჩევა **Tecnam P2008** იტალიური წარმოების თანამედროვე მსუბუქი თვითმფრინავი, რომელიც აღიარებულია მისი ეფექტიანობის, უსაფრთხოებისა და ინოვაციური კონსტრუქციული მიდგომების გამო [1].

Tecnam P2008 არის იტალიური წარმოების ორსავარძლიანი თვითმფრინავი, რომელიც პირველად ბაზარზე 2009 წელს გამოჩნდა და სწრაფად მოიპოვა პოპულარობა როგორც საფრენოსნო სასწავლო მიზნებისთვის, ისე კერძო მფლობელებისა და მცირე ავიაკომპანიებისთვის, რაც განპირობებულია მისი მაღალი საიმედოობით, მარტივად სამართავი სისტემებითა და ოპტიმიზირებული საწვავის მოხმარებით. თვითმფრინავი აერთიანებს ტრადიციული და თანამედროვე ტექნოლოგიების საუკეთესო მახასიათებლებს, რაც მას ანიჭებს გამორჩეულ კონკურენტუნარიანობას მსუბუქი ავიაციის ბაზარზე.



სურ.1 TecnamP2008 ტიპის საჰაერო ხომალდი

Tecnam P2008 ფართოდ გამოიყენება საფრენოსნო მომზადების პროცესში, რაც გულისხმობს თვითმფრინავის ინტენსიურ გამოყენებას დამწყები მფრინავების მიერ. შესაბამისად, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მისი საექსპლუატაციო მახასიათებლების შესწავლა და მათ გავლენაზე დაკვირვება ფრენის უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით. ნებისმიერი სახის მცირე გადახრა ტექნიკური ან საექსპლუატაციო თვალსაზრისით შეიძლება გავლენას ახდენდეს როგორც ფრენის ხარისხზე, ისე მფრინავის/ინსტრუქტორის ფიზიკურ და ფსიქოლოგიურ დატვირთვაზე [2].

ნაშრომი მიზნად ისახავს **Tecnam P2008**-ის საექსპლუატაციო მახასიათებლების ანალიზს და მათი გავლენის შეფასებას ფრენის უსაფრთხოებაზე. სტატიაში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა იმ რისკების იდენტიფიცირებას, რომლებიც შესაძლოა წარმოიშვას სხვადასხვა საფრენოსნო რეჟიმსა და გარემო პირობებში აღნიშნული თვითმფრინავის ექსპლუატაციისას, ასევე შესაძლო პრევენციული ზომების განსაზღვრას აღნიშნული საფრთხეების შესამცირებლად.

ძირითადი ნაწილი

Tecnam P2008-ის ექსპლუატაციის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ასპექტია ფრენის სიჩქარის შეზღუდვები, რომლებიც განსაზღვრავენ საჰაერო ხომალდის სტრუქტურულ და საექსპლუატაციო ზღვრულ მნიშვნელობებს. შეზღუდვები დეტალურად არის აღწერილი მწარმოებლის ოფიციალურ სახელმძღვანელოებში [11]. მათი დაცვა კრიტიკულად

საყურადღებოა და აუცილებელია როგორც ნორმალურ, ისე არასტანდარტულ ფრენის პირობებში. ცხრილში 1 წარმოდგენილია შეზღუდვები სიჩქარეებისათვის კვანძებში (1კვ=1.852 კმ/სთ):

1. **VNE** (Never Exceed Speed) - არასდროს გადასაჭარბებელი სიჩქარე;
2. **VNO** (Normal Operating Speed) - ნორმალური სამუშაო სიჩქარე;
3. **VA** (Design Manoeuvring Speed) - მანევრირების გამოთვლილი სიჩქარე;
4. **VFE** (Flap Extended Speed) - მაქსიმალური სიჩქარე ფრთაუკანის გამოშვებული მდგომარეობისთვის. [4]

ცხრ. 1. სიჩქარის შეზღუდვები – Tecnam P2008

#	სიჩქარე	ინდიკატორული საჰაერო სიჩქარე KIAS	კალიბრირებული საჰაერო სიჩქარე KCAS	შენიშვნა
1	VNE	145	141	ამაზე მეტ სიჩქარეზე ფრენა დაუშვებელია ნებისმიერი ფრენის პირობების დროს
2	VNO	113	111	ამაზე მეტ სიჩქარეზე ფრენა დაშვებულია ფრთხილად მხოლოდ მშვიდ ატმოსფერულ პირობებში
3	VA	99	98	ამ სიჩქარეზე ზევით არ უნდა განხორციელდეს მკვეთრი ან სრული მართვის მოძრაობები
4	VFE	71	72	ფრენის სიჩქარე არ უნდა იქნეს გადაჭარბებული ფრთაუკანების ნებისმიერ პოზიციაზე ყოფნისას

აღნიშნული შეზღუდვების გათვალისწინება აუცილებელია ფრენის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად. მაგალითად, **VNE**-ს გადაჭარბებამ შეიძლება გამოიწვიოს საჰაერო ხომალდის სტრუქტურული დაზიანება, რაც საფრთხეს შეუქმნის ეკიპაჟისა და მგზავრების სიცოცხლეს. ასევე, **VA** სიჩქარეზე ზემოთ მკვეთრი მანევრის შესრულებამ შესაძლოა გამოიწვიოს ფრთის გადატვირთვა ან კონტროლის დაკარგვა, რაც კრიტიკულ სიტუაციაში გადაიზრდება ავიაინციდენტად ან ავიაკატასტროფად [3].

ცხრილში 1 წარმოდგენილი მონაცემები პილოტისთვის წარმოადგენს ძირითად სახელმძღვანელო საშუალებას ფრენის სწორი დაგეგმვისა და შესრულებისთვის. ამიტომაც, მათ საფუძვლიანად ცოდნას და მათი დაცვით ფრენას გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება Tecnam P2008-ის ტიპის საჰაერო ხომალდის უსაფრთხო ექსპლუატაციაში [12].

სამოქალაქო ავიაციის სხვადასხვა საერთაშორისო და ადგილობრივ სახელმძღვანელო დოკუმენტებში [11] მოცემულია ნორმალური ოპერაციებისთვის რეკომენდებული საჰაერო სიჩქარეები. ცხრილში 2 წარმოდგენილია ეს სიჩქარეები Tecnam P2008-სათვის 630 კგ მასის პირობებში.

ცხრ. 2. Tecnam P2008- ის ნორმალური ოპერაციებისთვის რეკომენდებული საჰაერო სიჩქარეები კვანძებში (630 კგ მასის პირობებში)

სიჩქარის ტიპი	ფრთაუკანების მდგომარეობა	ინდიკატორული საჰაერო სიჩქარე (KIAS)
აფრენის სიჩქარე	T/O	48
ფრთაუკანების აკეცვის სიჩქარე	T/O	58
საუკეთესო ასვლის კუთხის სიჩქარე	0°	65
საუკეთესო ასვლის სიჩქარე	0°	71
დაფრენის სიჩქარე	T/O	58
საბოლოო დასაფრენი სიჩქარე	FULL	54
შეხების სიჩქარე	FULL	54
მანევრირების სიჩქარე	0°	99
არასდროს გადასაჭარბებელი სიჩქარე	0°	145

აუცილებელია სიჩქარეების მნიშვნელობის გათვალისწინება ფრენის უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით. სტანდარტული ფრენის დროს სიჩქარეების ზუსტი ცოდნა და მათი დაცვა პილოტისთვის წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს კომპონენტს ფრენის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად. თითოეული სიჩქარე განსაზღვრულია კონკრეტული ეტაპისთვის და უკავშირდება თვითმფრინავის აეროდინამიკურ და სტრუქტურულ შესაძლებლობებს. მაგალითად, აფრენის სიჩქარე (VR) წარმოადგენს იმ მინიმალურ მნიშვნელობას, რომლის მიღწევის შემდეგ შესაძლებელია მართვადი აფრენა. ამ სიჩქარემდე ღერძულ მართვას უზრუნველყოფს წინა ბორბალი, ხოლო მის შემდეგ უკვე ელერონები და სიმაღლის საჭე. VR-ის დროზე ადრე ან დაგვიანებით მიღწევამ შეიძლება გამოიწვიოს აფრენის დროს წონასწორობის დაკარგვა. ასევე კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საუკეთესო ასვლის სიჩქარეები VX და VY [5].

- VX წარმოადგენს იმ სიჩქარეს, რომლითაც თვითმფრინავი ყველაზე დიდი კუთხით იმაღლებს სიმაღლეს და განსაკუთრებით საჭიროა დაბალ ბარიერებთან ახლოს აფრენისას;
- VY კი იძლევა მაქსიმალურ ასვლის სიჩქარეს დროის ერთეულში და გამოიყენება სტანდარტულ აფრენებში.

საბოლოო დასაფრენი და შეხების სიჩქარეები (Final Approach და Touchdown Speed), რომლებიც სრულად გამოშვებული ფრთაუკანების პირობებში შეადგენს 54 KIAS-ს, აუცილებელია ზუსტი დაჯდომისთვის. ამ სიჩქარეზე დაბლა ფრენამ შეიძლება გამოიწვიოს ამწევი ძალის დაკარგვა საჰაერო ხომალდზე.

მანევრირების სიჩქარე (VA) და არასდროს გადასაჭარბებელი სიჩქარე (VNE) კი უზრუნველყოფენ თვითმფრინავის სტრუქტურულ გამძლეობას. მათი გადაჭარბება შესაძლებელია მხოლოდ განსაკუთრებული სიფრთხილით და მხოლოდ შესაბამის პირობებში.

მინიმალური საჰაერო სიჩქარე, რომლის ქვემოთაც თვითმფრინავი კარგავს წევის ძალას და გვერდითი ქარის ზეგავლენას.

საჰაერო ხომალდის მინიმალური საჰაერო სიჩქარე, რომლის ქვემოთ თვითმფრინავი კარგავს აეროდინამიკურ ამწევ ძალას და შემდგომში სტაბილურობას. დამოკიდებულია

რამდენიმე ფაქტორზე: წონაზე, ფრთაუკანების პოზიციაზე, დაგვერდებაზე. ცხრილში 3 მოცემულია სიჩქარეების მნიშვნელობები 630 კგ-ის მასის პირობებში [8].

ცხრ. 3. Tecnam P2008- ის მინიმალური საჰაერო სიჩქარე, რომლის ქვემოთაც თვითმფრინავი კარგავს წვევის ძალას ფრთაუკანების სხვადასხვა მდგომარეობაში

დაგვერდების კუთხე (°)	ფრთაუკანა 0°	ფრთაუკანას პოზიცია აფრენის რეჟიმში (T/O)	ფრთაუკანას პოზიცია დაფრენისას (FULL)
	KIAS ინდიკატორული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში/KCAS კალიბრირებული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში	KIAS ინდიკატორული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში/KCAS კალიბრირებული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში	KIAS ინდიკატორული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში/KCAS კალიბრირებული საჰაერო სიჩქარე კვანძებში
0°	48 / 50	43 / 46	40 / 43
15°	49 / 51	44 / 46	41 / 44
30°	52 / 54	47 / 49	44 / 46
45°	58 / 60	52 / 54	49 / 51
60°	70 / 71	63 / 64	60 / 61

ქარის მოქმედების ზეგავლენის ანალიზი Tecnam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდის საექსპლუატაციო მახასიათებლებზე

Tecnam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდისთვის მწარმოებლის მიერ დადასტურებული მაქსიმალური გვერდითი ქარის კომპონენტია 15 კვანძი. ეს ნიშნავს, რომ განსაზღვრული პირობების ფარგლებში, თვითმფრინავი თავსებადია არა უმეტეს 15 კვანძი გვერდითი ქარის პირობებში აფრენისა და დაჯდომისას.

გვერდითი ქარის კომპონენტი (Crosswind Component) არის ძალის ის ნაწილი, რომელიც ზუსტად პერპენდიკულარულად მოქმედებს ბილიკის (runway) ღერძზე. რეალურად, ქარის მიმართულება შეიძლება იყოს ნაწილობრივ წინა, ნაწილობრივ გვერდითი, მაგრამ პილოტისთვის გადამწყვეტი არის ის კომპონენტი, რომელიც უშუალოდ „გვერდიდან უბიძგებს“ საჰაერო ხომალდს აფრენის ან დაშვებისას [9].

ფრენის დაგეგმვისას პილოტები იყენებენ შემდეგ პარამეტრებს:

- ქარის სიჩქარე და მიმართულება (მაგ., 230°, 15 კვანძი);
- ბილიკის მიმართულება (მაგ. 27 → 270°);
- ტრიგონომეტრიული მეთოდით გამოითვლება გვერდითი კომპონენტი (მაგ., $15 \cdot \sin(40^\circ)$).

ასევე გამოიყენება სპეციალური crosswind chart-ები ან ციფრული კალკულატორები, რაც სწრაფად აჩვენებს ზუსტ კომპონენტს და ამცირებს შეცდომის ალბათობას.

როდესაც გვერდითი ქარის სიჩქარე აღემატება თვითმფრინავის მიერ დაშვებულ ზღვარს:

- თვითმფრინავმა შეიძლება დაკარგოს ზუსტი ტრაექტორია აფრენის ან დაჯდომისას;
- საჭიროა პილოტის მაღალკვალიფიციური რეაქცია, მათ შორის მართვის ზედაპირების კონტროლი და სწორი კუთხის შენარჩუნება;
- სრიალის და დაგვერდების კუთხის ზრდა, რაც შეიძლება დასრულდეს ინციდენტით ან დაზიანებით;
- განსაკუთრებულად რთული ხდება (მსუბუქი) თვითმფრინავებისთვის, როგორიცაა Tecnam P2008, რადგან მასზე ქარის ზემოქმედება მეტია, ვიდრე მძიმე საჰაერო ხომალდებზე.

Tecnam P2008-ის პილოტებმა უნდა გაიარონ სპეციალური მომზადება, რომელიც მოიცავს შემდეგ ელემენტებს:

1. გვერდითი ქარის დაჯდომის ტექნიკა (Crosswind Landing Technique):

- *Sideslip approach* — თვითმფრინავის დახრა ქარის მიმართულებით და სიმაღლის/მიმართულების საჭის გამოყენება ტრაექტორიის შესანარჩუნებლად;
- *Crab method* — ფრენისას ცხვირის შემობრუნება ქარისკენ და ბილიკთან დაჯერებისას სწორი მიმართულების „გამართვა“.

2. სწორად უნდა მიემართოს ბილიკის ღერძზე, ისე რომ ქარი არ აფიქსირებდეს კურსზე გადახრას.

3. გადაწყვეტილების დროული მიღება:

თუ ქარის სიჩქარე აჭარბებს დასაშვებ ზღვარს პილოტმა უნდა მიიღოს გადაწყვეტილება დაჯდომის გადადებაზე, ბილიკის შეცვლაზე ან ალტერნატიულ აეროდრომზე გადასვლაზე.

Tecnam P2008-ისთვის მაქსიმალური გვერდითი ქარის კომპონენტის ზღვარი 15 კვანძი წარმოადგენს კრიტიკულ მონაცემს, რომელიც პილოტებმა უნდა გაითვალისწინონ აფრენისა და დაჯდომის გადაწყვეტილებების მიღებისას. თუმცა, რეალურ პირობებში ის უნდა შეფასდეს ინდივიდუალური უნარების, ბილიკის მდგომარეობის, წონისა და სხვა ოპერაციული ფაქტორების გათვალისწინებით. სწორი ცოდნა და პრაქტიკა უზრუნველყოფს უსაფრთხო, სტაბილურ და ეფექტურ ფრენას [10].

Tecnam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდის სხვა საჰაერო ხომალდებთან შედარების ტექნიკური ანალიზი. Tecnam P2008-ის გამოყენება უმეტესად დაკავშირებულია საწყის საფრენოსნო მომზადებასთან, კერძოდ PPL (Private Pilot License) და CPL (Commercial Pilot License) კურსებთან. ამ მხრივ, მიზანშეწონილია მისი მახასიათებლების შედარება სხვა გავრცელებულ სასწავლო საჰაერო ხომალდებთან, როგორებიცაა:

- Cessna 172
- Diamond DA20 Katana
- Pipistrel SW121

ცხრ. 4. Tecnam P2008 ტიპის საჰაერო ხომალდის სხვა საჰაერო ხომალდებთან შედარების
ტექნიკური ანალიზი

საექსპლუატაციო პარამეტრი	Tecnam P2008	Cessna 172	Diamond DA20	Pipistrel SW121
ძრავი	Rotax 912 ULS (100 HP)	Lycoming O-320 (160 HP)	Rotax 912 (100 HP)	Rotax 912iS (100 HP)
მაქსიმალური ასაფრენი წონა	650 კგ	1111 კგ	800 კგ	600 კგ
სტრუქტურა	კომპოზიტი + ალუმინი	ალუმინი	კომპოზიტი	კომპოზიტი
ფრთაუკანები	ელექტრული	მექანიკური	მექანიკური	ელექტრული
არასდროს გადასაჭარბებელი სიჩქარე (VNE)	145 KIAS	160 KIAS	164 KIAS	138 KIAS
სიჩქარე, რომლის დაბლა ფრენამ შეიძლება გამოიწვიოს ამწვევი ძალის დაკარგვა (Stall)	~40 KIAS	~48 KIAS	~44 KIAS	~42 KIAS
ძირითადი გამოყენება	სწავლება/ ზოგადი დანიშნულება	სწავლება/ ტურიზმი	სწავლება	სწავლება/ეკო- ფრენა

პრინციპული განსხვავებები:

1. სტრუქტურა და მასა:

Tecnam P2008 გამოირჩევა მსუბუქი სტრუქტურითა და კომბინირებული მასალებით, რაც აძლევს მას უკეთეს ასვლის მახასიათებლებს დაბალ სიმაღლეებზე. Diamond და Pipistrel-ის მსგავსად, მას გააჩნია კომპოზიტური კორპუსი, რაც ზრდის ეფექტურობას და საწვავის ეკონომიას.

2. ძრავის მახასიათებლები:

მიუხედავად იმისა, რომ Tecnam P2008 იყენებს მხოლოდ 100 ცხენისძალიან Rotax ძრავს, მას აქვს საკმარისი სიმძლავრე სასწავლო ოპერაციებისთვის. Cessna 172 კი ძრავის სიმძლავრით უკეთესად მუშაობს მაღალი სიმაღლეების პირობებში, თუმცა მოიხმარს მეტ საწვავს და მძიმეა.

3. ავიონიკა და მართვა:

Tecnam P2008 აღჭურვილია Glass Cockpit ავიონიკით (GARMIN G3X), რაც სტუდენტს თანამედროვე სისტემებთან მუშაობას აჩვენებს. ამ მხრივ იგი უპირატესია ბევრ Cessna-ს მოდელზე.

4. ტექნიკური მომსახურების ჩატარების სპეციფიკა:

Tecnam P200-ის თანამედროვე დიზაინი და ROTAX ტიპის ძრავის სიმარტივე მას იდეალურ ვარიანტად აქცევს სასწავლო ფრენების შესასრულებლად [4].

დასკვნა

Tecnam P2008 თანამედროვე მსუბუქი თვითმფრინავის კლასს განეკუთვნება, რომელიც წარმატებით აერთიანებს ინოვაციურ კონსტრუქციულ გადაწყვეტილებებს, მოწინავე ავიონიკას და საწვავის დაბალ მოხმარებას. მისი ძირითადი უპირატესობები გამოიხატება როგორც ტექნიკურ მონაცემებში, ისე მრავალფეროვან ფრენის რეჟიმებში, რაც მას განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანს ხდის სასწავლო და სპეციალური საექსპლუატაციო ოპერაციებისთვის.

ტექნიკური მონაცემების მიხედვით, Tecnam P2008-ს აქვს მაქსიმალური კრეისერული სიჩქარე 128 კვანძი (237 კმ/სთ), რაც უზრუნველყოფს სწრაფ და ეფექტურ გადაადგილებას. სიჩქარე, რომელზე დაბლა ფრენამ შეიძლება გამოიწვიოს ამწევი ძალის დაკარგვა საჰაერო ხომალდზე, ფრთაუკანების სრულად გამოშვების პოზიციაზე 39 კვანძია (72 კმ/სთ), რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად, როდესაც აფრენა და დაფრენა ხდება მოკლე მანძილებზე, რაც ზრდის ექსპლუატაციის მოქნილობას და შესაძლებლობას, გამოიყენოს მცირე ზომის აეროპორტები. აფრენის მანძილი 363 მ, ხოლო დაფრენის 382 მ, რაც როგორც მაღალი მანევრულობის, ისე ოპერაციული ეფექტურობის ნიშანია.

ფრენის რეჟიმების მიხედვით, Tecnam P2008 გამოირჩევა სტაბილურობით და მართვის სიმარტივით როგორც აფრენის, ისე კრეისერული ფრენისა და დაფრენის პერიოდში. აფრენის დროს მისი ჰიბრიდული კონსტრუქცია და ეფექტური ფრთაუკანები უზრუნველყოფენ სწრაფ და უსაფრთხო აფრენას, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს ავარიული სიტუაციების ალბათობას. კრეისერული ფრენის რეჟიმში თვითმფრინავის საწვავის მოხმარება დაბალია (17 ლიტრი/სთ), რაც ზრდის მისი გამოყენების ეკონომიურობას და უწყევს კონკურენციას ტრადიციულ მსუბუქ თვითმფრინავებს, როგორიცაა მაგალითად Cessna 172 და სხვა.

გარდა ამისა, Tecnam P2008-ს განსაკუთრებული უპირატესობაა ფრენისას გვერდით ქარზე რეაგირების მაღალი ხარისხი. მისი გაუმჯობესებული სტაბილიზატორები და ფრთების კონსტრუქცია უზრუნველყოფენ ოპტიმალურ კონტროლს ქარის მიმართ, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს მფრინავის დატვირთვას და ზრდის ფრენის უსაფრთხოების დონეს. ეს თვისება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საფრენოსნო სწავლების პროცესში, Tecnam-ის მარტივი და წინასწარ განსაზღვრული რეაგირება ხელს უწყობს უსაფრთხო და სტაბილურ ფრენას რთულ მეტეოროლოგიურ პირობებში.

ავიონიკის მხრივ, Tecnam P2008 აღჭურვილია მოწინავე G3X Dual Screen სისტემით, რომელიც ინტეგრირებულია მრავალფუნქციურ ინსტრუმენტებთან აჩვენებს რეალურ დროში აფრენის სიჩქარეს, სიმაღლეს, პოზიციას, მრავალ პარამეტრებს და სხვა მნიშვნელოვან ინფორმაციას, რაც ზრდის მფრინავის ცნობიერებას და არასტანდარტულ სიტუაციებზე რეაგირების შესაძლებლობას.

უსაფრთხოების კუთხით, Tecnam P2008-ს მარტივი მართვის სისტემა და მაღალი სტრუქტურული საიმედოობა ხელს უწყობს ფრენის სტაბილურობას და ამცირებს ადამიანური ფაქტორიდან გამომდინარე შეცდომების ალბათობას. ასევე, მისი მსუბუქი კონსტრუქცია და ოპტიმიზებული აეროდინამიკური ფორმა მინიმუმამდე ამცირებს საფრთხეებს, რომლებიც დაკავშირებულია ფრენის დროს წონასწორობის დაკარგვასთან.

Cessna 172-სთან და სხვა მსგავსი ტიპის საჰაერო ხომალდებთან შედარებით, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება საფრენოსნო სწავლებისას, Tecnam P2008 უზრუნველყოფს უფრო მაღალ ტექნოლოგიურ დონეს, საწვავის დაბალ მოხმარებას და უკეთეს მანევრულობას, განსაკუთრებით ფრენის სწრაფად ცვლებად და რთულ პირობებში, როგორიცაა ძლიერი ქარი და რთული მეტეოროლოგიური პირობები.

შეჯამების სახით, Tecnam P2008 წარმოადგენს ერთ-ერთ საუკეთესო არჩევანს მსუბუქ თვითმფრინავთა კლასში, რომელიც აკმაყოფილებს თანამედროვე ავიაციის სწავლებისა და ოპერაციული უსაფრთხოების მაღალი სტანდარტებს. მისი ინოვაციური კონსტრუქცია, მოწინავე ავიონიკა და მაღალი რეაგირების უნარი გვერდით ქარის მიმართ აძლევს მას მნიშვნელოვან უპირატესობას კონკურენტუნარიან ბაზარზე და ხელს უწყობს თანამედროვე ავიაციის განვითარებას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Smith, John. „Impact of Light Aircraft Operational Characteristics on Flight Safety.“ *Journal of Aviation Safety*, Vol. 15, No. 3 (2022): 45-67.
2. Johnson, Eric. „Flight Safety Analysis of Light Sport Aircraft: A Case Study of Tecnam P2008.“ *Aviation Safety Journal*, Vol. 10, No. 1 (2023): 77-95.
3. Federal Aviation Administration. „Pilot’s Handbook of Aeronautical Knowledge.“ FAA, 2021.
4. EASA. „Type Certificate Data Sheet for Tecnam P2008.“ European Union Aviation Safety Agency, 2019.
5. Smith, John. „Impact of Light Aircraft Operational Characteristics on Flight Safety.“ *Journal of Aviation Safety*, Vol. 15, No. 3 (2022): 45-67.
6. Brown, Lisa. „Composite Materials in Modern Aircraft: Benefits and Risks.“ *Aerospace Engineering Review*, Vol. 12, Issue 4 (2023): 89-103.
7. Jones, Michael, და Anna Petrov. „Pilot Decision Making in Light Aircraft Operations.“ *International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 27, No. 2 (2024): 123-140.
8. Johnson, Eric. „Flight Safety Analysis of Light Sport Aircraft: A Case Study of Tecnam P2008.“ *Aviation Safety Journal*, Vol. 10, No. 1 (2023): 77-95.
9. European Aviation Safety Agency. „Safety Recommendations for Single-Engine Piston Aircraft.“ EASA Report, 2022.
10. Williams, Sarah. „Pilot Training and Human Factors in Light Aircraft Operations.“ *Human Factors in Aviation*, Vol. 8, Issue 3 (2024): 45-62.
11. Tecnam Aircraft. „Tecnam P2008 Pilot Operating Handbook.“ Tecnam, 2021.
12. საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტო. „მსუბუქი თვითმფრინავების რეგისტრაციისა და ექსპლუატაციის წესები.“ დირექტორის ბრძანება №28, 2024 წ. <https://gcaa.ge/wp-content/uploads/2025/04/Ultralight-Aircraft-Registration-and-Operation-Rules-GCAA.pdf>

Investigation and Analysis of the Operational Characteristics of the Tecnam P2008 Aircraft

Nika Tikanashvili¹, Tornike Tefnadze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *This article presents a comprehensive research and analysis of the operational characteristics of the Tecnam P2008 light aircraft, aiming to identify its key advantages and their impact on flight safety. The research is based on the aircraft's technical documentation, operational manuals, and an analysis of international regulatory standards.*

Within the scope of the study, critical flight and maneuvering parameters (VNE, VA, VX, VY) are examined to evaluate their influence on pilot decision-making and the mechanisms that ensure flight safety. A comparative analysis with the Cessna 172, Diamond DA20, and Pipistrel SW121 models confirms the Tecnam P2008's high efficiency, ease of control, and cost-effectiveness.

The results of the research demonstrate that the Tecnam P2008 fully complies with modern light aviation standards, combining technological innovation, operational economy, and a high level of flight safety. Its use is particularly recommended for the effective implementation for flight training.

Keywords: *Tecnam P2008, operational characteristics, flight safety.*

Fault Detection and Predictive Maintenance of the Aircraft Propeller System

Sergo Tepnadze¹, Vazha Kelikhashvili², Luka Kurdadze³

^{1, 2, 3} Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The article examines the significance and methodologies of predictive maintenance for aircraft propeller systems. The primary focus is on multisensor monitoring of key diagnostic parameters, including vibration, acoustic signals, torque, and temperature. Regular measurement and analysis of these parameters enable the early detection of malfunction indicators such as propeller imbalance, blade damage, shaft misalignment, and related anomalies. This proactive diagnostic approach enhances operational reliability, reduces unplanned maintenance, and supports the overall safety and efficiency of aircraft propulsion systems.*

Key words: *Aviation, propeller, predictive maintenance.*

Introduction

The aircraft propeller system plays a crucial role in generating thrust and ensuring efficient flight performance. Its proper functioning directly influences flight safety, fuel efficiency, and operational reliability. However, as a rotating mechanical component subjected to high dynamic loads: vibration, aerodynamic forces, and environmental stresses, the propeller system is prone to gradual wear, imbalance, fatigue cracks, and other degradation phenomena. Traditional maintenance strategies, such as scheduled (time based) maintenance often fail to detect early-stage faults, leading either to unnecessary maintenance interventions or unexpected failures that compromise safety and increase operational costs [2].

To address these limitations, predictive maintenance has emerged as a modern and intelligent approach for managing aircraft components. Predictive maintenance relies on continuous or periodic monitoring of the system's condition, analyzing measured parameters to forecast potential failures before they occur. In the case of propeller systems, the integration of vibration, acoustic, and performance data provides valuable insights into the mechanical and aerodynamic health of the system [1, 3]. Through advanced data acquisition and signal processing techniques, early signs of imbalance, bearing wear, or blade deformation can be detected long time before they become critical.

The implementation of predictive maintenance in aviation aligns with the broader concept of Condition-Based Maintenance (CBM), which aims to optimize the maintenance cycle based on actual system condition rather than fixed intervals. For propeller systems, condition monitoring can include vibration spectrum analysis, acoustic emission monitoring, and aerodynamic efficiency tracking. These parameters can be combined with machine learning or statistical models to predict the “Remaining Useful Life” of the component and to schedule maintenance actions proactively.

Overall, fault detection and predictive maintenance of aircraft propeller systems represent a significant advancement in the field of aviation engineering. The research and implementation of such approaches contribute not only to safety enhancement but also to cost efficiency and environmental sustainability. The

development of reliable diagnostic methodologies and prognostic models will play a key role in the evolution of next generation aircraft maintenance practices.

Main Part

Research Methodology

The research methodology for studying fault detection and predictive maintenance of the aircraft propeller system is designed to systematically identify, analyze, and predict degradation mechanisms through data driven diagnostics. The study combines experimental measurements, analytical modeling, and data analysis to develop a reliable framework for condition monitoring and early fault prediction.

The primary objectives of this research are:

- To identify the most sensitive measurable parameters that reflect propeller health conditions;
- To develop a methodology for early fault detection using vibration and acoustic signal analysis;
- To design a predictive model capable of estimating the remaining useful life (RUL) of the propeller system;
- To propose a structured predictive maintenance framework applicable to general aviation and light aircraft propulsion systems.

Research Plan

The research will be conducted in five sequential phases:

- Phase I - Literature Review and Theoretical Modeling; Identification of research gaps and development of the diagnostic concept;
- Phase II - Experimental Setup and Calibration; Installation and configuration of sensors, validation of measurement accuracy;
- Phase III - Data Collection; Recording vibration, acoustic, and performance data under normal and simulated fault conditions;
- Phase IV - Data Analysis and Model Development; Feature extraction, fault classification, and development of predictive algorithms;
- Phase V - Validation and Evaluation; Comparing predicted outcomes with actual fault data, refining models, and formulating the predictive maintenance strategy.

Sensors and Data Acquisition System

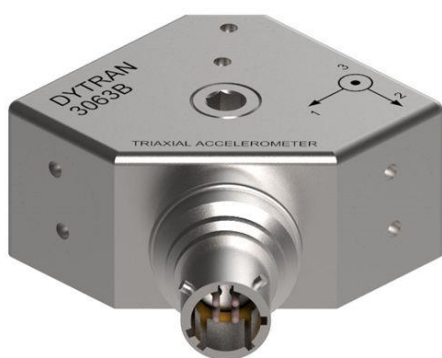
Effective fault detection and predictive maintenance of an aircraft propeller system depend on precise monitoring of its dynamic and structural parameters. Since the propeller operates under high mechanical and aerodynamic loads, reliable sensors are essential for detecting early-stage faults and performance degradation [4].

In this research, several types of sensors are considered to capture vibration, acoustic, torque, and temperature data. Accelerometers monitor structural vibrations and help identify imbalance, misalignment, or

bearing defects. Acoustic and pressure sensors record sound variations caused by aerodynamic or structural anomalies. Torque and rotational speed sensors evaluate the system's mechanical performance, while temperature sensors track thermal behavior of critical components.

Integrating these sensors within a unified data acquisition system enables multi parameter monitoring and advanced analysis [7]. The resulting dataset supports the development of predictive algorithms, allowing early fault detection and optimized maintenance planning for safer and more efficient propeller operation.

1. Dytran - Triaxial Accelerometer



2. Endevco - High-Intensity Acoustic Microphone



3. Kistler - Rotating Torque Sensor



4. Type K Thermocouple – Temperature Sensor

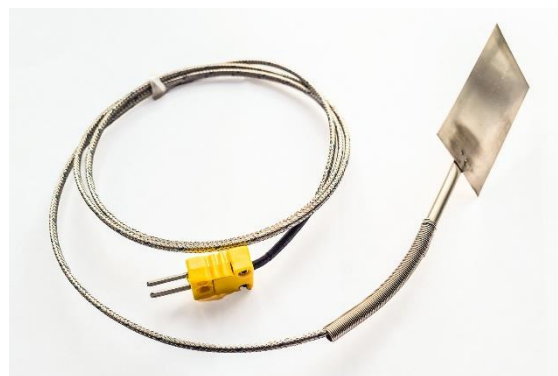


Fig. 1 Sensors and Data Acquisition System

A combination of accelerometers, microphones, torque sensors, and temperature sensors will be used to monitor aircraft propeller systems. These sensors capture vibration, acoustic emissions, mechanical load, and thermal behavior, providing the data necessary for early fault detection, condition monitoring, and predictive maintenance.

Conclusions

The study of fault detection and predictive maintenance for aircraft propeller systems highlights the importance of multi parameter monitoring to ensure safe and efficient operation. By integrating vibration, acoustic, torque, and temperature sensors into a unified data acquisition system, early-stage anomalies such as imbalance, blade defects, bearing wear, and performance degradation can be effectively identified [5, 6]. Signal processing and feature extraction provide the foundation for machine learning and predictive models, enabling estimation of Remaining Useful Life and optimized maintenance scheduling.

This approach not only enhances operational safety by reducing the likelihood of in-flight failures but also improves cost efficiency by minimizing unnecessary maintenance. The proposed framework demonstrates that a data-driven, sensor-based methodology is essential for modern propeller-driven aircraft, offering a practical path toward intelligent maintenance systems. Future work will focus on experimental validation and refinement of predictive algorithms to ensure robust performance under real operating conditions.

References:

1. Ozkat, E. C., et al. (2023). "A data-driven predictive maintenance model to estimate remaining useful life using vibration data collected from a multi-rotor UAS." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*;
2. Al-Haddad, L. A., et al. (2024). "UAV propeller fault diagnosis using deep learning of non-traditional features." *Scientific Reports*;
3. Mitici, M., et al. (2023). "Dynamic predictive maintenance for multiple components using sensor data." *Computers in Industry*;
4. Lee, S. (2025). "Propeller fault-detection method for electric-propulsion aircraft using motor-electric signals." *Journal of Manufacturing Processes*;
5. Sonmezocak, T., et al. (2025). "Intelligent UAV health monitoring: Detecting propeller and motor faults using machine learning." *Aerospace Science and Technology*;
6. Shen, S. C., et al. (2025). "A real-time diagnostic system using a long short-term memory network for ship propeller fault detection." *Sensors*;
7. Javadnejad, F., et al. (2025). "Predictive maintenance in naval vessel propulsion systems for enhanced marine operations using a BiGMM-HMM framework with divergence-based clustering." *Journal of Marine Science and Engineering*.

საჰაერო ხრახნის პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურება

სერგო ტეფნაძე¹, ვაჟა კელიხაშვილი², ლუკა ქურდაძე³

^{1, 2, 3}საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია საჰაერო ხრახნის სისტემის პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურების მნიშვნელობა და მეთოდები. მთავარი აქცენტი გაკეთებულია კვლევის პროცესში საკვლევი პარამეტრების მრავალსენსორულ მონიტორინგზე, რომელიც მოიცავს ვიბრაციის, აკუსტიკური სიგნალების, მომენტისა და ტემპერატურის განსაზღვრას. აღნიშნული პარამეტრების რეგულარული აღრიცხვა და ანალიზი საშუალებას იძლევა წინასწარ გამოვლინდეს გაუმართაობის ნიშნები, როგორიცაა საჰაერო ხრახნის ბალანსის დარღვევა, ხრახნის დაზიანება, ლილვის დისბალანსი და სხვა.

საკვანძო სიტყვები: ავიაცია, საჰაერო ხრახნი, პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურება.

ქალების შრომის უსაფრთხოების ინსტიტუციური მექანიზმები სამოქალაქო ავიაციის სამუშაო სივრცეში – საერთაშორისო გამოცდილება და რეგულირების პრიორიტეტები

დავით ალანია

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზ. №16, 0103, თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: წინამდებარე კვლევის მიზანია შესწავლილ იქნას სამოქალაქო ავიაციის ინდუსტრიაში შრომის უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის დაცვის (OSH) ფარგლებში რისკების იდენტიფიცირებისა და შემდგომ მართვის ძირითადი გამოწვევები. ავიაციის ოპერაციები ხასიათდება მაღალი სიჩქარით, სირთულით და მუდმივი ცვლილებებით, რაც დამატებით აძნელებს საფრთხის იდენტიფიცირებას და ეფექტური რისკ-მენეჯმენტის განხორციელებას. კვლევა ცდილობს განსაზღვროს ორგანიზაციული პრაქტიკა, რომელიც გამოიყენება საფრთხეების ამოცნობისა და რისკების მართვის პროცესში. კვლევის ფარგლებში ფორმირდება შემთხვევის ანალიზი, რომელიც ასახავს ადამიანის ფაქტორის, ტექნოლოგიური ცვლილებების, მომზადების სისტემისა და რეგულაციების ურთიერთ გადაჯაჭვულობას, რაც ხშირად ხელს უშლის შრომის უსაფრთხოების ეფექტიანად უზრუნველყოფას. საბოლოოდ, კვლევის მიზანია გააშუქოს ისეთი პროაქტიური და ინტეგრირებული მიდგომები, რომლებიც უზრუნველყოფს დასაქმებულთა უსაფრთხოებას წარმადობის შემცირების გარეშე.

კვლევამ გამოავლინა, რომ სამოქალაქო ავიაციაში ერთ-ერთი მთავარი სირთულე საფრთხეების სრულყოფილი იდენტიფიცირების შესაძლებლობაა, რაც განპირობებულია თვით სამუშაო გარემოს მუდმივი ცვალებადობითა და რთული სტრუქტურით. აღსანიშნავია რისკების აღქმის პროცესში არსებული კოგნიტური მიკერძოება, ფუნქციურ რგოლებს შორის კომუნიკაციის არაეფექტიანობა და ტექნოლოგიური ცვლილებების სწრაფი ტემპი. ეს პრობლემები კიდევ უფრო მძაფრდება რეგულაციებთან შესაბამისობის ნაკლებობით, არასრულფასოვანი სწავლებითა და არასისტემური ინციდენტების აღრიცხვის მექანიზმებით. კვლევა ხაზს უსვამს შრომის უსაფრთხოების რისკების მართვის გააქტიურებისა და გაერთიანებული სტრატეგიების დანერგვის აუცილებლობას, რაც მოიცავს განყოფილებებს შორის კოორდინაციას, მუდმივ ტრენინგებსა და კომუნიკაციის გაუმჯობესებულ არხებს. ეფექტური OSH პოლიტიკის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია აღნიშნული გამოწვევების გათვალისწინება და სისტემური მიდგომების დანერგვა, რაც განაპირობებს როგორც შრომის უსაფრთხოების გაუმჯობესებას, ისე რეგულაციებთან სრულ შესაბამისობას.

საკვანძო სიტყვები: შრომის უსაფრთხოება და ჯანმრთელობა (OSH), რისკების იდენტიფიცირება, საფრთხის ამოცნობა, ადამიანის ფაქტორი ავიაციის უსაფრთხოებაში.

შესავალი

შრომის უსაფრთხოების თანამედროვე კონცეფციებში ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან მიმართულებას წარმოადგენს ქალების (მათ შორის ორსული და მეძუძური) უფლებებისა და ჯანმრთელობის დაცვა. ეს საკითხი განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს იმ სექტორებში, სადაც სამუშაო გარემო სპეციფიკურ ფიზიკურ, ქიმიურ ან ბიოლოგიურ რისკებთან არის დაკავშირებული. ერთ-ერთი ასეთი სფეროა სამოქალაქო ავიაცია, სადაც დასაქმებულთა ნაწილი ყოველდღიურად ექვემდებარება მრავალფეროვან საფრთხეს, მათ შორის მაღალ ხმაურს, ხანგრძლივ დგომას, ვიბრაციებს, ტემპერატურულ ცვლილებებსა და ფსიქო-ემოციურ სტრესს. აღნიშნული გარემოებები განსაკუთრებულად აზიანებს ორსული და მეძუძური ქალების ჯანმრთელობას, რასაც იწვევს როგორც უშუალო ფიზიკური ზემოქმედება, ასევე არასათანადო სამუშაო განრიგი და არასაკმარისი პროფილაქტიკური ზომები.

შრომის საერთაშორისო ორგანიზაციის მიერ გამოქვეყნებულ დოკუმენტში “Expectant and nursing mothers at work: A comparative study” (ILO, 2014), ხაზგასმულია, რომ აუცილებელია ინკლუზიური შრომის პოლიტიკის დამკვიდრება, რომელიც ორსულ და მეძუძურ ქალებს უზრუნველყოფს უსაფრთხო და ჯანსაღ სამუშაო გარემოთი. მითითებულია, რომ რისკის შეფასება უნდა იყოს ინდივიდუალური და გათვალისწინებული უნდა იყოს კონკრეტული საქმიანობის სპეციფიკა. ეს განსაკუთრებით აქტუალურია სამოქალაქო ავიაციაში, სადაც გარემო ფაქტორები, როგორიცაა კოსმოსური გამოსხივება, წნევის ცვლილება, მაღალი ინტენსივობის ხმაური და ემოციური დატვირთვა, შეიძლება პირდაპირ იმოქმედოს როგორც ნაყოფის, ასევე დედის ჯანმრთელობაზე.

ძირითადი ნაწილი

სამოქალაქო ავიაციის სექტორში ორსული და მეძუძური ქალების დასაქმების დროს უსაფრთხოების საკითხი მხოლოდ ტექნიკურ ჭრილში არ განიხილება. იგი მოიცავს სამართლებრივ, ეთიკურ და ორგანიზაციულ კომპონენტებსაც. ICAO-ს (International Civil Aviation Organization) მიერ შემუშავებული უსაფრთხოების მართვის სისტემა (Safety Management System – SMS) პირდაპირ მიუთითებს იმ აუცილებლობაზე, რომ ავიაკომპანიებმა უნდა შეიმუშავონ და დანერგონ შიდა რეგულაციები, რომლებიც ითვალისწინებს დასაქმებულთა ინდივიდუალურ საჭიროებებს, მათ შორის ორსული და მეძუძური ქალების სპეციალურ პირობებს (ICAO, 2018).

მიუხედავად იმისა, რომ ICAO არ აწესებს კონკრეტულ რეგულაციებს ორსულებისთვის, ის ავალდებულებს ავიაკომპანიებს უზრუნველყონ უსაფრთხოების ისეთი მექანიზმების შექმნა, რომლებიც მოიცავენ რისკის იდენტიფიკაციას, პრევენციასა და მონიტორინგს. ეს მიდგომა სრულად თავსებადია ILO-ს რეკომენდაციებთან, რომლებიც მოითხოვს უსაფრთხოების ინტეგრირებულ პოლიტიკას, მორგებულს ორსულთა საჭიროებებზე. პრაქტიკაში ეს ნიშნავს, რომ სამუშაოს დიზაინი, განრიგი და პასუხისმგებლობები უნდა გადაიხედოს ორსულობის ან მეძუძურობის სტატუსის დადასტურებისთანავე.

ევროპის ქვეყნების უმრავლესობაში, მათ შორის გერმანიაში, საფრანგეთსა და შვედეთში, მიღებულია მკაცრი რეგულაციები, რომლებიც ზღუდავენ ორსულების მონაწილეობას იმ სამუშაოებში, სადაც ქიმიური ან ბიოლოგიური აგენტების ზემოქმედება შესაძლებელია. განსაკუთრებით გამოირჩევა გერმანიის მაგალითი, სადაც არსებობენ ე.წ. „დაცული პოზიციები“

– სამუშაო ადგილები, რომლებიც წინასწარ შეფასებულია უსაფრთხოების კრიტერიუმებით და განკუთვნილია ორსული თანამშრომლებისთვის. ამ რეგულაციების ერთ-ერთი საყრდენი პრინციპია „წინასწარი გაფრთხილების პრინციპი“ (precautionary principle), რომლის თანახმადაც, იმ შემთხვევაშიც კი, როცა საფრთხე ბოლომდე არ არის დასაბუთებული, მაინც მიღებულია პროფილაქტიკური ზომები.

სამოქალაქო ავიაციაში ასეთი მიდგომების დანერგვა ბევრ გამოწვევას უკავშირდება. ერთ-ერთი სირთულე არის თავად სამუშაოს მობილურობა და დინამიკა – ბორტგამცილებლები ხშირად იმყოფებიან სხვადასხვა კლიმატურ პირობებში, ახორციელებენ ღამის ფრენებს, ექვემდებარებიან დაღლილობასა და სტრესს, რაც ორსულობის პერიოდში განსაკუთრებით პრობლემურია. გარდა ამისა, როგორც წესი, ბორტპერსონალის შრომის განრიგი მოქნილია და ცვლილებებს ექვემდებარება დღიურად, რაც ართულებს რისკის წინასწარ შეფასებას. ასეთ პირობებში მნიშვნელოვანია არა მხოლოდ ტექნიკური ზომების გატარება, არამედ ძლიერი ორგანიზაციული მხარდაჭერა – ფსიქოლოგიური კონსულტაციები, ჯანმრთელობის მონიტორინგის სისტემები და ალტერნატიული სამუშაო პოზიციების შეთავაზება.

საქართველოს შრომის კოდექსი ითვალისწინებს ზოგად პრინციპებს ორსული ქალების დასაქმების შესახებ, მათ შორის აკრძალულია მათი მონაწილეობა სამუშაოებში, რომლებიც საფრთხეს წარმოადგენს ჯანმრთელობისთვის. თუმცა კანონში არ არსებობს კონკრეტული მექანიზმები სამოქალაქო ავიაციის სპეციფიკის გათვალისწინებით. საქართველოს შრომის ინსპექციის სამსახური ახორციელებს ზოგად მონიტორინგს, მაგრამ ამ ეტაპზე არ არსებობს სპეციალიზებული სახელმძღვანელო ავიაციის სექტორისთვის, რაც ქმნის პრაქტიკულ ხარვეზებს რეგულაციების აღსრულებაში.

ILO ხაზგასმით აღნიშნავს, რომ რისკის შეფასება უნდა იყოს მუდმივი და მოიცავდეს როგორც ფიზიკურ გარემოს, ასევე სოციალურ და ფსიქოლოგიურ ასპექტებს. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ბიოლოგიურ რისკებს, რაც სამოქალაქო ავიაციაში განსაკუთრებით აქტუალურია საერთაშორისო ფრენების დროს. ინფექციური დაავადებების გავრცელების საფრთხე პანდემიის პირობებში კიდევ უფრო აქტუალური გახდა. მაგალითად, COVID-19-ის პერიოდში ორსული ბორტგამცილებლები აღმოჩნდნენ მაღალი რისკის ჯგუფში, რაც ნათლად წარმოაჩენს რისკის მენეჯმენტის სისტემების საჭიროებას.

სამოქალაქო ავიაციის უსაფრთხოების პოლიტიკაში ერთ-ერთი კრიტიკული კომპონენტია კომუნიკაცია. დასაქმებულებმა უნდა იცოდნენ თავიანთი უფლებები, ხოლო დამსაქმებლებს უნდა გააჩნდეთ მკაფიო პოლიტიკა, როგორ მოახდინონ რეაგირება ორსულობის სტატუსის გამოცხადების შემდეგ. საქართველოს რეალობაში ხშირია შემთხვევები, როცა დასაქმებულები თავს იკავებენ ორსულობის შესახებ ინფორმაციის გაზიარებისგან, შიშის გამო, რომ შესაძლოა დაკარგონ სამუშაო. ეს მიუთითებს არა მხოლოდ სამართლებრივი, არამედ კულტურული ბარიერების არსებობაზე, რომელთა დაძლევა სისტემურ ძალისხმევას მოითხოვს.

ევროპული სააგენტო შრომის უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობისთვის (EU-OSHA) 2020 წლის ანგარიშში ხაზგასმულია, რომ ორსული ქალებისთვის აუცილებელია სპეციალური სამუშაო გეგმის შემუშავება, რომელიც მოიცავს როგორც რისკების თავიდან აცილებას, ასევე საჭიროების შემთხვევაში სამუშაოდან გათავისუფლების მოქნილ და დაცულ მექანიზმებს. ეს მიდგომა მიზნად ისახავს დედის და ბავშვის ჯანმრთელობის დაცვის მაქსიმალიზაციას და თანხვედრაშია შრომის საერთაშორისო სტანდარტებთან.

ICAO-ს უსაფრთხოების მართვის დოკუმენტში (Safety Management Manual, Doc 9859) არ არის პირდაპირ მითითებული ორსულ თანამშრომლებზე, თუმცა უსაფრთხოების კულტურის

მნიშვნელობა და რისკზე ორიენტირებული მენეჯმენტი წარმოადგენს ძირითად საფუძველს, რომელზეც უნდა აიგოს ეროვნული პოლიტიკები. სწორედ ამ ფონზე საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტოს შეუძლია შეიმუშაოს დამატებითი რეგულაციები, რომლებიც შეესაბამება როგორც ICAO-ს ზოგად მოთხოვნებს, ისე ILO-ს სპეციფიკურ მითითებებს.

დასკვნა

კვლევამ აჩვენა, რომ სამოქალაქო ავიაციის სექტორის სპეციფიკური გარემო პირობები — როგორიცაა სამუშაოს მობილურობა, ხშირი ზეწოლა დროისა და მომსახურების ხარისხზე, შეზღუდული შესაძლებლობა დასვენებისთვის და გარემო გამოსხივების ზემოქმედება — განსაკუთრებით მწვავედ მოქმედებს იმ ქალთა ჯანმრთელობაზე, რომლებიც იმყოფებიან ორსულობის ან ლაქტაციის ფაზაში. ამ კონტექსტში აშკარად დგინდება, რომ ქალების ჯანმრთელობის დასაცავად საჭიროა ისეთი პრევენციული მექანიზმების ჩამოყალიბება, რომლებიც არა მხოლოდ ტექნიკური სტანდარტების შესრულებას უზრუნველყოფს, არამედ ასახავს ადამიანის ფიზიოლოგიური და ფსიქო-ემოციური მდგომარეობისადმი მგრძნობელ დამოკიდებულებას.

ინსტიტუციური ანალიზი აჩვენებს, რომ ICAO და ILO ვერ წარმოადგენენ ერთიანი სტანდარტის წყაროებს და ქმნიან იმ რეკომენდაციების ფონს, რომელზეც თითოეულ სახელმწიფოს, მათ შორის საქართველოსაც, შეუძლია ააგოს შესაბამისი შიდა პოლიტიკა. აღნიშნული რეკომენდაციების რეალიზაცია პრაქტიკაში ხშირად ხვდება დაბრკოლებას ისეთი ფაქტორების გამო, როგორიცაა დასაქმებულების ინფორმირებულობის ნაკლებობა, შიდა რეგულაციების არარსებობა ან მოუმწიფებლობა, და ზოგჯერ კულტურული ბარიერები, რომლებიც კვლავაც ამკვიდრებენ სტიგმატიზაციას ორსულთან ან მეძუძურობასთან დაკავშირებული საჭიროებების მიმართ.

კვლევაში გამოვლენილი ძირითადი გამოწვევები — საფრთხეების არათანმიმდევრული იდენტიფიცირება, კოგნიტური მიკერძოება რისკების აღქმაში, ფუნქციურ რგოლებს შორის კომუნიკაციის დეფიციტი, ტექნოლოგიური ცვლილებების ტემპი და ამასთან დაკავშირებული დაუცველობა — ასახავს იმ სისტემურ პრობლემებს, რომლებიც უშუალოდ ზღუდავენ ეფექტური შრომის უსაფრთხოების პოლიტიკის ჩამოყალიბებას. გარდა ამისა, შიდა ტრენინგების არასისტემური ხასიათი და ინციდენტების ანგარიშგების ნაკლები კულტურა ხელს უშლის რეალური რისკების სწორი აღქმასა და შესაფერის საპასუხო მექანიზმების ამოქმედებას.

სამოქალაქო ავიაციაში ქალების დაცვის პოლიტიკა ვერ იქნება მხოლოდ დადგენილი ნორმების შესრულებაზე ორიენტირებული — იგი უნდა გახდეს ღრმად ინტეგრირებული კულტურული კომპონენტი, რომელიც მოიცავს როგორც თანამშრომელთა მგრძნობელობის ამაღლებას, ისე პროცესების სისტემურ მონიტორინგს და მათში ადამიანზე მორგებული მიდგომის დანერგვას. ამას დაემატება უსაფრთხოების პროტოკოლების შინაარსობრივი გაფართოება, რომელიც უნდა ითვალისწინებდეს ორსული თანამშრომლებისთვის სამუშაო პოზიციების ადაპტაციას, ჯანმრთელობის მონიტორინგის სქემების დანერგვას და ინდივიდუალურად მორგებული რისკ-ანალიზის პრაქტიკას.

გარდა ამისა, დასკვნის ფორმირებას ავსებს სტრუქტურული რეკომენდაციები: საქართველოს სამოქალაქო ავიაციის სააგენტომ რეკომენდირებულია შეიმუშაოს შიდა რეგულაციების პაკეტი, რომელიც დაფუძნებული იქნება ICAO-ს უსაფრთხოების მართვის

სახელმძღვანელოზე და ILO-ს სოციალური დაცვის სტანდარტებზე. ეს რეგულაციები უნდა იქნეს მორგებული ქართულ შრომით და საკანონმდებლო კონტექსტზე, მაგრამ მათ საფუძველში უნდა იდოს საერთაშორისო გამოცდილება, რათა ეროვნული პოლიტიკა არ ჩამორჩეს გლობალურ ტენდენციებს.

საბოლოოდ, შრომის უსაფრთხოების სისტემა სამოქალაქო ავიაციაში არ შეიძლება ჩაითვალოს სრულფასოვანად, თუკი იგი არ მოიცავს ქალების ჯანმრთელობის დაცვის ქვეპოლიტიკას. ეს უნდა გახდეს იმ ინსტიტუციური პასუხისმგებლობის ნაწილი, რომელიც გამიჯნავს ფორმალურ შესაბამისობას რეალურ დაცულობასთან. ქალის ჯანმრთელობა ამ სექტორში არ წარმოადგენს მხოლოდ ინდივიდუალურ პრობლემას — იგი პირდაპირ კავშირშია თვით ორგანიზაციული მდგრადობის, ხარისხიანი მომსახურების და უსაფრთხოების საერთო დონესთან.

ამრიგად, ქალების ჯანმრთელობის დაცვის ინსტიტუციური მექანიზმები სამოქალაქო ავიაციაში საჭიროებს არა მხოლოდ სამართლებრივ და ადმინისტრაციულ ჩარჩოს გაუმჯობესებას, არამედ სისტემური ცვლილებების დანერგვას, რომელიც ეფუძნება პრევენციის, ინფორმირების, რეგულირების და მორგებული მიდგომის პრინციპებს. მხოლოდ ამ გზით იქნება შესაძლებელი ისეთი შრომითი გარემოს შექმნა, რომელიც იქნება უსაფრთხო, ინკლუზიური და მდგრადი — როგორც ქალი თანამშრომლებისთვის, ასევე მთლიანად სამოქალაქო ავიაციის ინდუსტრიისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. International Labour Organization (ILO). (2014). Expectant and nursing mothers at work: A comparative study. Geneva: ILO.
2. International Civil Aviation Organization (ICAO). (2018). Safety Management Manual (Doc 9859), 4th Edition. Montreal: ICAO.
3. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA). (2020). Pregnant workers and occupational health and safety: A policy overview.
4. International Labour Organization (ILO). (2022). Guidelines on Occupational Safety and Health Management Systems (ILO-OSH 2001).
5. ICAO. (2022). Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation — Safety Management.
6. EU-OSHA. (2016). Risk assessment and pregnant workers: Good practices and legal provisions in the EU.
7. Kanki, B. G., Helmreich, R. L., & Anca, J. M. (2010). Crew Resource Management (2nd Ed.). Academic Press.
8. Stolzer, A. J., Halford, C. D., & Goglia, J. J. (2016). Safety Management Systems in Aviation (2nd Ed.). Ashgate.
9. Salas, E., Maurino, D., & Curtis, M. (2010). Human Factors in Aviation. Academic Press.
10. Bailey, L. L., & Merritt, A. C. (2021). Human Performance in Aviation: Applying Human Factors for Safety. CRC Press.
11. OECD. (2021). Occupational Health and Safety Policies for a Resilient Future of Work.
12. Mellor, N., & Webster, J. (2013). Workplace mental health: Policy and practice. International Review of Psychiatry.
13. European Commission. (2017). Directive 92/85/EEC – Pregnant workers and workers who have recently given birth or are breastfeeding.
14. Federal Aviation Administration (FAA). (2020). Aviation Safety Action Program (ASAP) Reporting Guidelines.
15. EASA (European Union Aviation Safety Agency). (2019). EASA Annual Safety Review. Cologne: EASA.
16. Hollnagel, E. (2014). Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management. Ashgate.

Institutional Mechanisms for Women's Occupational Safety in the Civil Aviation Workplace: International Experience and Regulatory Priorities

Davit Alania

Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The purpose of this study is to examine the key challenges associated with risk identification and subsequent management within the framework of Occupational Safety and Health (OSH) in the civil aviation industry. Aviation operations are characterized by high speed, complexity, and constant change, all of which further complicate hazard identification and the implementation of effective risk-management practices. The research seeks to determine the organizational practices employed in the process of hazard recognition and risk control. A case analysis is developed to illustrate the interdependence among human factors, technological change, training systems, and regulatory frameworks—factors that often hinder the effective assurance of occupational safety. Ultimately, the study aims to highlight proactive and integrated approaches that safeguard employee well-being without compromising operational performance.*

The findings indicate that one of the principal difficulties in civil aviation is the ability to fully identify hazards, a challenge rooted in the dynamic nature and complex structure of the working environment itself. Notable issues include cognitive biases in risk perception, ineffective communication among functional units, and the rapid pace of technological transformation. These problems are further exacerbated by regulatory non-compliance, insufficient training, and fragmented incident-reporting mechanisms. The study underscores the necessity of strengthening risk-management processes and adopting unified strategies, including enhanced interdepartmental coordination, continuous training, and improved communication channels. Ensuring an effective OSH policy requires addressing these challenges and implementing systemic approaches that support both improved occupational safety and full regulatory compliance.

Keywords: *Occupational Safety and Health (OSH), risk identification, hazard recognition, human factors in aviation safety.*

საჰაერო ხომალდის აირტურბინული ძრავებში შემავალ ჰაერის ნაკადში შერეული უცხო სხეულების მახასიათებლების ანალიზი, კლასიფიკაცია და მათი ძრავაში მოხვედრის პრევენციის გზები

რობერტ ხაჩიძე¹, ანდრო მაისურაძე²

^{1,2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია საჰაერო ხომალდების (თვითმფრინავები, ვერტმფრენები) საექსპლუატაციო პირობები, რომელთა დროსაც მათ ძრავებში ხდება უცხო მყარი ნაწილაკები (მტვერი, ქვიშა და სხვა) და იწვევს მათ დაზიანებას. შესწავლილია ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მახასიათებლები (ზომები, მასები, სიმკვრივები, აბრაზიულობა და სხვ.), რომლებიც განსაზღვრავენ ძრავის შემადგენელი ნაწილების (კომპრესორი, ტურბინა და სხვ.) დაზიანების სახეობასა და ხარისხს. შემოთავაზებულია ამ დაზიანებათა შემცირებისა და პრევენციის გზები.

საკვანძო სიტყვები: საჰაერო ხომალდი, ძრავა, ჰაერის ნაკადი, უცხო სხეული, მყარი ნაწილაკი, ძრავის დაზიანება

შესავალი

ცნობილია, რომ საჰაერო ხომალდების ექსპლუატაციის სხვადასხვა პირობებში მათ ძრავებში შესაძლოა მოხვდეს ისეთი უცხო სხეულები, როგორიცაა მტვერი, ქვიშა, ასფალტის, ბეტონის და ყინულის ნატეხები, ვულკანური ფერფლი და სხვა. თითოეული მათგანის ძრავაში მოხვედრის მიზეზები, პროცესები და თვითონ ამ სხეულების მახასიათებლები განსხვავებულია ერთმანეთისაგან, ისევე როგორც მათი ძრავაში მოხვედრით გამოწვეული დაზიანების სახეობები და საფრთხის დონეები. ცხადია, ეკონომიკური ზარალია ამ გაუთვალისწინებელი მიზეზების გამო საჰაერო ხომალდის დაზიანებული ძრავის იძულებითი მოხსნა, რემონტი და კვლავ დაყენება საჰაერო ხომალდზე, რადგან ეს მოითხოვს მნიშვნელოვან დამატებით ხარჯებს მისი მფლობელი ავიაკომპანიისაგან [1].

უცხო სხეულების მოხვედრა საჰაერო ხომალდის ძრავაში ძირითადად ხდება მისი მიწის ზედაპირზე აფრენისწინა მოძრაობის, აფრენის, დაფრენისა და დაფრენის შემდეგი მოძრაობისას (სურ.1). თვითმფრინავებისთვის ეს პროცესები ხდება სხვადასხვა სტანდარტული აეროდრომებზე ან იშვიათად არასტანდარტული ან არაბეტონირებული ასაფრენ-დასაფრენი ზოლების შემთხვევაში.



სურ. 1 მტვრიანი გარემოს მაგალითები თვითმფრინავის აფრენისა და დაფრენის დროს

სხვა სიტუაციაა ვერტმფრენების შემთხვევაში, რადგან ვერტმფრენებს ხშირად უწევთ მოუწესრიგებელი მიწიდან აფრენა და მიწაზე დაფრენა განსაკუთრებულ პირობებში [2].

გარდა ამისა ვერტმფრენის მბრუნავი ხრახნის პროპელერის ფრთები ქმნიან ჰაერის ტურბულენტურ მოძრაობას, რაც დამატებით იწვევს ვერტმფრენის გარშემო მტვრიანი გარემოს შექმნას (სურ. 2), საიდანაც მის ძრავაში ხვდება ჭარბი რაოდენობის მტვერი და ქვიშა, ასევე სხვა უცხო ნაწილაკები.



სურ. 2 ვერტმფრენის ექსპლუატაციის მაგალითები მიწის ზედაპირთან ახლოს მტვრიან და ქვიშიან გარემოში

უცხო სხეულების მოხვედრა საჰაერო ხომალდის ძრავაში უფრო იშვიათად ხდება მათი კრეისერული ფრენის რეჟიმში მაღალ სიმაღლეებზე. ამ დროს ძრავაში შეიძლება მოხვდნენ (ძალზე იშვიათად) ზოგიერთი სახეობის ფრინველი (მაგალითად, კანადური ბატი) ან ვულკანური ფერფლი.

ძირითადი ნაწილი

უცხო სხეულებიდან, რომლებიც შეიძლება მოხვდნენ საჰაერო ხომალდის ძრავაში, განსაკუთრებული ადგილი უკავია მტვერსა და ქვიშას. მტვერი ორგანული ან მინერალური წარმოშობის წვრილი მყარი ნაწილაკებია, რომლის ზომები მერყეობს დაახლოებით 0,1 მიკრონიდან 0,1 მილიმეტრამდე. უფრო მეტი ზომის მყარი ნაწილაკები (5 მმ-მდე) წარმოადგენენ ქვიშას. ქვიშა წვრილნამსხვრევი ფხვიერი მთის დანალექი ქანია, რომელიც შედგება კვარცის, კირქვის, დოლომიტის, მინდვრის შპატის და ქარსის მარცვლებისაგან. იგი ასევე შეიცავს თიხისა და მტვრის ნაწილაკებს.

მტვრისა და ქვიშის გარდა მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ასევე ვულკანურ ფერფლს. ვულკანების ამოფრქვევისას ამოიფრქვევა ცხელი მაგმა, რომლისგანაც გამოიყოფა გარკვეული რაოდენობის ფერფლი და გაიტყორცნება მაღალ სიმაღლეზე, რომელზეც შეიძლება გადიოდეს თვითმფრინავის ეშელონური მოძრაობა. თუ თვითმფრინავის ძრავაში მოხვდება დიდი რაოდენობის ფერფლი, ძრავა შეიძლება გაჩერდეს. ასე მოხდა 1982 წელს ინდონეზიის თავზე, სადაც ახორციელებდნენ ფრენას British Airways-ის და Singapore Airways-ის კომპანიების ლაინერები, ასევე 1989 წელს ალიასკის თავზე. ბრიტანული აეროპლანის ოთხივე ძრავა გაითიშა, მხოლოდ ერთი ამუშავდა ბოლო მომენტში [3].

ქვიშას სხვა მრავალ თვისებათა შორის გააჩნია მრავალი გამორჩეული თვისება, რომელთაგან განსაკუთრებულია შემდეგი:

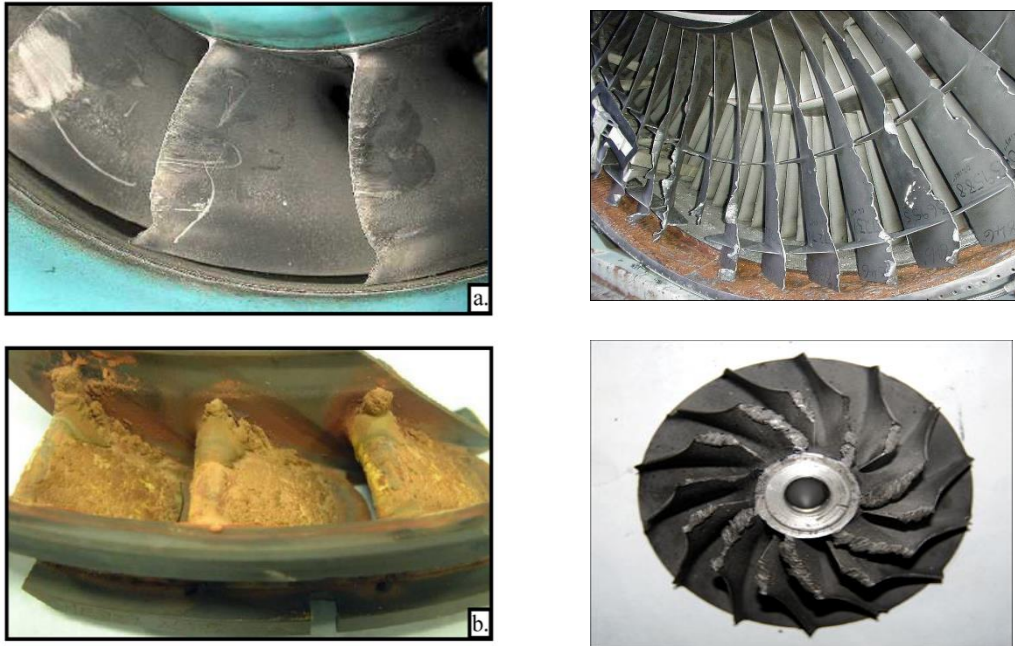
- რაიმე ჭურჭელში (მაგ. ძაბრში) ჩაყრილი ქვიშის გამოიხატება ჭურჭლის ნახვრეტიდან არ არის დამოკიდებული ჭურჭელში ქვიშის ფენის სიმაღლეზე ანუ რაოდენობაზე - ერთიდაიგივე ქვიშა ჭურჭლის ნახვრეტიდან გამოიხატება თანაბრად და ერთიდაიგივე სიჩქარით (ეს თვისებაა ქვიშის საათის მუშაობის საფუძველი);
- ქვიშა წყალგამტარია. რაც უფრო მსხვილია ქვიშის ნაწილაკები, მით უფრო სწრაფად ატარებს წყალს. ამავე დროს ის ატარებს მხოლოდ წყალს და არ ატარებს მასში არსებულ მინარევებს. ამ პრინციპზე მუშაობს ფილტრების უმრავლესობა;
- ქვიშას ახასიათებს გაბნევადობა. სუფთა და მშრალი ქვიშა არ ჩერდება დახრილ ზედაპირზე, მაშინ როცა სველი ქვიშის ნაწილაკებს გააჩნია ურთიერთშეჭიდულობის შესანიშნავი უნარი, რაც ფართოდ გამოიყენება მშენებლობაში;
- ქვიშა არ იკუმშება. ქვიშის ეს თვისება გამოიყენება წნევის წარმოსაქმნელად და გასანაწილებლად. თუ ჭურჭელში ჩავყრით მშრალ ქვიშას მასზე დაწოლის შემთხვევაში წნევა გადაეცემა როგორც ჭურჭლის ფსკერს, ისე გვერდებს, მაშინ, როცა სველი ქვიშის შემთხვევაში წნევა გადაეცემა მხოლოდ ფსკერს;
- ქვიშა აბრაზიულია, რაც განპირობებულია მასში კვარცის (SiO_2) უმეტესი შემცველობით (არანაკლებ 75%-სა).

სწორედ ჩამოთვლილიდან ქვიშის ამ უკანასკნელი თვისების გამოა საშიში მისი მოხვედრა ძრავაში.

ძრავაში მოხვედრილი მტვრისა და ქვიშის ნაწილაკების გარკვეული რაოდენობა აზიანებს მის ნაწილებს, განსაკუთრებით კომპრესორის ნიჩბებს, ასევე დიფუზორს, შუბლა ნაწილს, ტურბინის ნიჩბებს და სხვა კომპონენტებს, რომელთაც გარს ევლება მტვრისა და ქვიშის შემცველი დიდი ფარდობითი სიჩქარის მქონე ჰაერის ნაკადი.

ძრავას დაზიანება ძირითადად გამოიხატება მისი ნაწილების თანდათან მატებად ეროზიაში, ასევე მექანიკურ დაზიანებებში, რაც საბოლოოდ ამცირებს აირტურბინული საავიაციო ძრავების მარგი ქმედების კოეფიციენტს.

ეროზიის გარდა აირტურბინული ძრავაში აღდგენილი აქვს წვის კამერაში მოხვედრილი ნაწილაკების გადნობასა და მათ მიწებებას მის კედლებზე, ასევე ტურბინის ნიჩბებზე. აბრაზიული ნაწილაკების დიდი სიჩქარით დაჯახება ძრავს შემადგენელ ნაწილებზე, პირველ რიგში კომპრესორისა და ტურბინის ნიჩბებზე, იწვევს მათ მექანიკურ დაზიანებებს (სურ. 3).



სურ. 3 აირტურბინული ძრავებში მოხვედრილი ნაწილაკების მოხვედრით გამოწვეული დაზიანებების მაგალითები (კომპრესორისა და ტურბინის ნიჩბები)

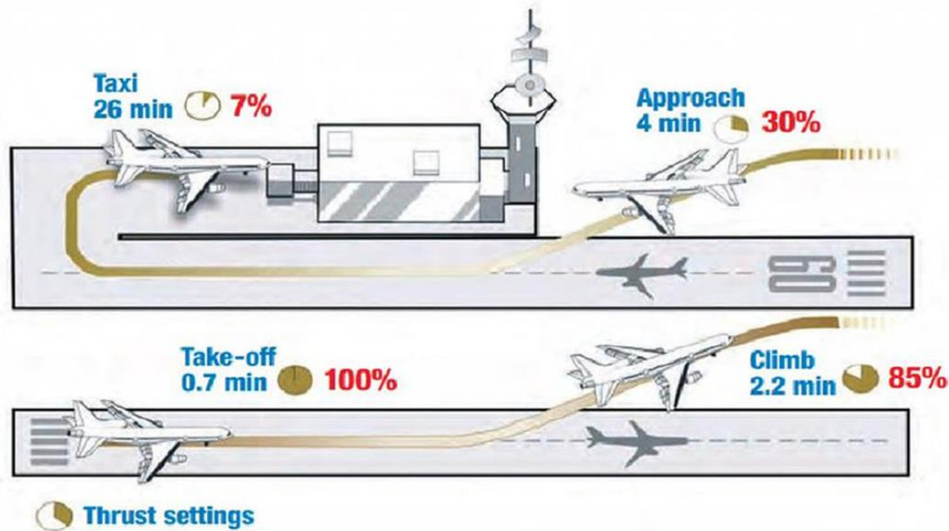
საჰაერო ხომალდების ეროზიის ხარისხი და დონე დამოკიდებულია რამდენიმე პარამეტრზე, მათ შორის ისეთებზე, რომლებიც ქვემოთ არის განხილული.

ა) საჰაერო ხომალდის ძრავის მუშაობის ხანგრძლივობა მტვრისა და ქვიშის შემცველ გარემოში.

ეს პარამეტრი თითოეული ტიპის საჰაერო ხომალდებისათვის განსზღვრულია შესაბამისი ნორმატიული და სახელმძღვანელო დოკუმენტებით მათი საექსპლუატაციო პირობებისათვის. მაგალითად, თვითმფრინავებისათვის, რომლებიც სარგებლობენ სტანდარტული აეროდრომებით, მათი აეროდრომზე მოძრაობისა და აფრენისა და დაფრენის პროცესების ხანგრძლივობები დადგენილია აფრენა-დაფრენის სტანდარტული ციკლით [4], რომელთა დაცვაც სავალდებულოა (სურ. 4). როგორც სურათიდან ჩანს, ასეთ შემთხვევაში საჰაერო ხომალდის ძრავის მუშაობის ხანგრძლივობა შეადგენს 29 წუთს. ფრენის დანარჩენი დრო ეთმობა ეშელონირებასა და საკრეისერო ფრენას, რა დროსაც გარემო სუფთაა უცხო სხეულებისაგან.

სხვაგვარადაა საქმე ვერტმფრენების შემთხვევაში, რომლებიც, როგორც ზემოთ აღინიშნა, აფრენა-დაფრენის დროს თვითონ დამატებით ქმნიან დამტვერიანებულ გარემოს საკმაოდ მაღალ

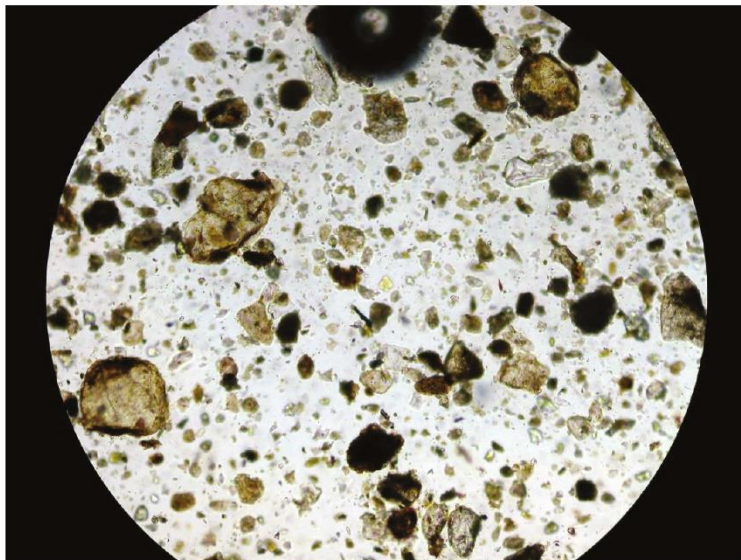
სიმაღლემდე. გარდა ამისა ხშირ შემთხვევაში ისინი ასრულებენ ფრენებს საგანგებო და განსაკუთრებულ პირობებში, სადაც მათ უწევთ თავისი ნამუშევარი დროის თითქმის 15-25% ნაწილის განმავლობაში მუშაობა [5, 6].



სურ. 4 თვითმფრინავის აფრენა-დაფრენის სტანდარტული ციკლი

ბ) ჰაერში შერეული მყარი ნაწილაკების კლასიფიკაცია, მათი ეფექტური ზომები და მასები.

მტვრისა და ქვიშის კლასიფიკაცია საკმაოდ რთულია (განსაკუთრებით მტვრის), რადგან ბუნებაში არ არსებობს ერთი და იგივე ფორმისა და ზომის მტვრის ან ქვიშის ნაწილაკები. ასევე მრავალგვარია მათი შემადგენლობა, მასა და წარმოშობის წყაროები. სურ. 5-ზე მაგალითისათვის წარმოდგენილია მყარი ნაწილაკების გადიდებული ნიმუშები ახლო აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან.

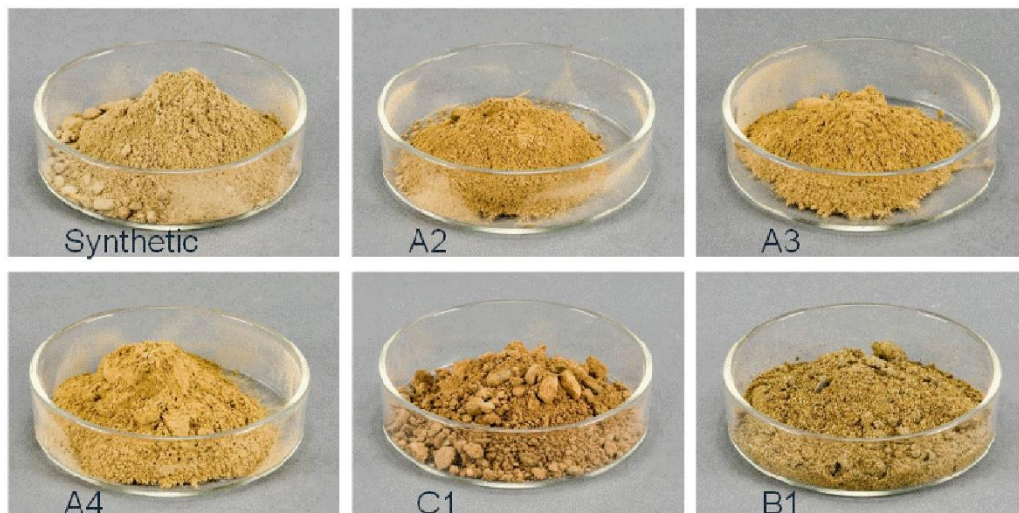


სურ. 5 ახლო აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან აღებული ქვიშის ნიმუშის ნაწილაკების გადიდებული ფოტო

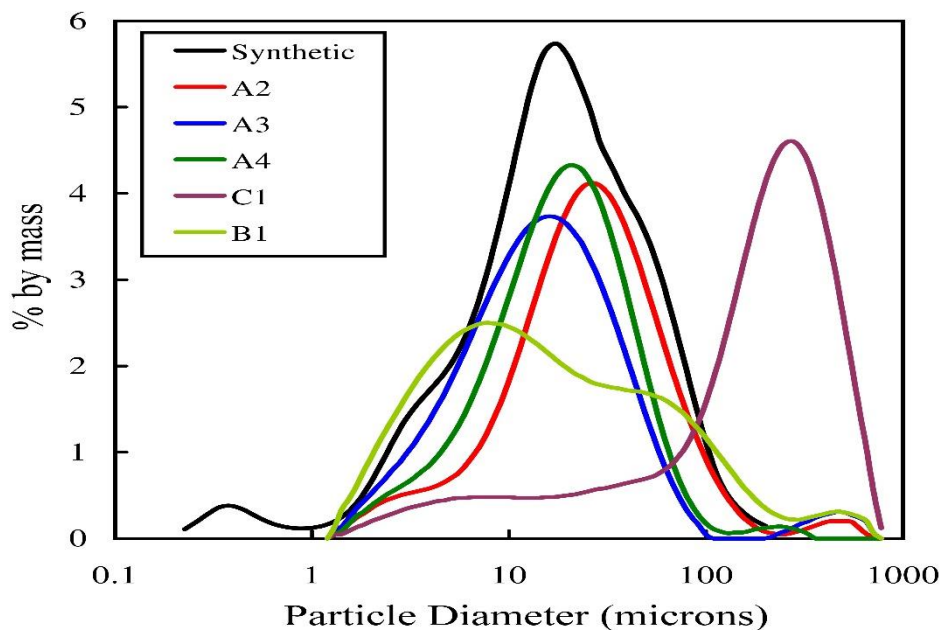
როგორც სურათიდან ჩანს, ქვიშის შემადგენელ ნაწილაკებს შეიძლება გააჩნდეთ მრავალგვარი ფორმა და ზომა, რომელთა მიხედვით მათი ზუსტი კლასიფიკაცია შეუძლებელია. საინჟინრო გათვლების ჩასატარებლად მიღებულია მათი წარმოდგენა ექვივალენტური სფერული ფორმის ნაწილაკის სახით, რომელსაც გააჩნია ისეთივე ფიზიკური თვისებები, როგორიც ორიგინალს. ასეთი მიდგომა იძლევა საშუალებას დაჯგუფდეს მტვრის/ქვიშის ნაწილაკები მათი ფიზიკური მახასიათებლების გარკვეული დიაპაზონების მიხედვით. მაგალითად, ჰაერში არსებული მცირე მყარი ნაწილაკები, რომლებიც წარმოიშობა სამშენებლო ინდუსტრიის ობიექტებზე და ვრცელდება ატმოსფეროში და რომელთა მოხვედრა ადამიანის ორგანიზმში საზიანოა მისი ორგანიზმისათვის, ზომის მიხედვით ძირითადად ორი ჯგუფად იყოფა: PM₁₀, რომელთა ეფექტური დიამეტრი შეადგენს 10 მკ-ს ან ნაკლებს, და PM_{2.5}, რომელთა ეფექტური დიამეტრი შეადგენს 2,5 მკ-ს და ნაკლებს. საერთოდ მტვრის ნაწილაკების ზომები, როგორც წესი, მერყეობს 0.1-დან 100 მიკრონამდე.

ზოგადად, მტვერი არის პოლიდისპერსიული არასტაბილური სისტემა, რომელიც შეიძლება იყოს ორგანული, არაორგანული ან შერეული წარმოშობის. წარმოშობის მიხედვით მათი ქიმიური შემადგენლობა შეძლება იყოს სხვადასხვაგვარი და გააჩნდეთ სხვადასხვა მახასიათებლები: დისპერსიულობა, სიმკვრივე, კუთრი ზედაპირი, მიწებების უნარი, სიფხვიერე, ჰიგროსკოპულობა, ტენშემცველობა, აბრაზიულობა და სხვა [7].

მტვრის ან ქვიშის ნაწილაკების მახასიათებლები, რომლებიც ხვდებიან საჰაერო ხომალდის ძრავაში, შეიცავს მათი ზომებისა და ფორმების გარკვეულ დიაპაზონს. სურ. 6, 7-ზე წარმოდგენილია ილუსტრაცია ქვიშაში მასების მიხედვით პროცენტული შემცველობის დამოკიდებულება მისი ნაწილაკების ეფექტურ დიამეტრზე ქვიშის ნიმუშებში, რომლებიც აღებულია მსოფლიოს ექვსი სხვადასხვა ადგილიდან [2].



სურ. 6 მსოფლიოს სხვადასხვა ადგილებიდან აღებული ქვიშის ნიმუშები



სურ. 7 ქვიშის ნაწილაკების მასური განაწილება მათი ეფექტური დიამეტრების მიხედვით

როგორც სურათებიდან ჩანს მეტ-ნაკლებად კარგი თანხვედრაა ნიმუშებისათვის - Synthetic, A2, A3, A4 ნიმუშებისათვის, ხოლო C1 და B1 ნიმუშებისათვის მნიშვნელოვნად განსხვავებულია როგორც ერთმანეთისაგან, ისე სხვა დანარჩენისაგანაც.

საჰაერო ხომალდის ძრავაში მოხვედრილი უცხო სხეულებიდან წარმოდგენილ სტატიაში არ განიხილება ფრინველები, რადგან ისინი არ წარმოადგენენ მყარ სხეულებს (მათში წყალი დაახლოებით 70-74%-ია), მათი მოხვედრა ძრავაში იშვიათია და ერთეულ შემთხვევებს წარმადგენს, თუმცა მათი მასა იმდენად დიდია ზემოთგანხილული ქვიშის ნაწილაკებზე, რომ დიდი ფარდობითი სიჩქარის გამო ძრავის პროპელერის ნიჩბებზე მათ დაჯახებას აქვს ძლიერი დამაზიანებელი ეფექტი [8,9].

გ) ჰაერში შერეული ქვიშისა მინერალოგიური შემადგენლობა და სიმკვრივე;

ქვიშა ზომების მიხედვით პირობითად იყოფა სამ ჯგუფად: მსხვილი (2,5-3,5 მკ), საშუალო (2-2,5 მკ), წვრილი (2 მკ-მდე).

მინერალური შედგენილობის მიხედვით ქვიშა არსებობს კვარციანი, გლაუკონიტ-კვარციანი, მინდვრის შპატიან-კვარციანი, ქარსიანი და სხვა.

საშუალო ხარისხის ბუნებრივი ქვიშა (სამშენებლო სამუშაოებში გამოყენების თვალსაზრისით) შეიცავს მტვრისა და თიხის გარკვეულ ნაწილს (არაუმეტეს 3%-სა). დაბალი ხარისხის ქვიშაში თიხოვანი და მტვროვანი ნაწილაკების რაოდენობა ძირითადად 5 %-ის ფარგლებშია, ხშირად კი 8-12 %-ს აღწევს, ხოლო დანარჩენი ნაწილი შეიცავს: SiO_2 -ს (75-85 %), Al_2O_3 -ს (3-12 %), Fe_2O_3 -ს (0.5-2 %), CaO -ს (0.3-2 %-ს), MgO -ს (0.1-1.5 %-ს) და SO_3 -ს (0.2-1 %).

ქვიშას ახასიათებენ ორგვარი სიმკვრივით: ყრილი სიმკვრივით და ნამდვილი სიმკვრივით. კვარცის (SiO_2) ქვიშის ყრილი სიმკვრივე მერყეობს 1300 – 1500 კგ/მ³ დიაპაზონში, ხოლო ნამდვილი სიმკვრივე - 2650 - 2750 კგ/მ³ დიაპაზონში [10].

როგორც კვლევებითაა დადგენილი [11-13], ზემოაღნიშნული მყარი ნაწილაკების დეტექტირებითა და მათი თვისობრივი მახასიათებლების (აბრაზიულობა, დნობადობა და სხვა) გათვალისწინებითა და რაოდენობრივი მახასიათებლების (მყარი ნაწილაკების კონცენტრაცია ნაკადში, შერეული ნაწილაკების საშუალო სიმკვრივე და მასური ხარჯი) გაზომვით შესაძლებელია დადგინდეს დროის გარკვეული მონაკვეთის განმავლობაში ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასა და პერიოდული შედარება კრიტიკულ მასასთან.

დასკვნა

მიუხედავად მყარი ნაწილაკების საჰაერო ხომალდების ძრავაში თავიდან აცილების სხვადასხვა მეთოდებისა და ტექნიკური საშუალებების არსებობისა, მტვერი/ქვიშა არის ისეთი რამ, რისი ძრავაში მოხვედრის 100%-იანი თავიდან აცილებაც დღემდე ვერ ხერხდება, თუმცა შესაძლებელია ამ ნაწილაკების მახასიათებლების დადგენის საფუძველზე გაიზომოს ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასა და მოხდეს მისი პერიოდული შედარება კრიტიკულ მასასთან. თუ ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასის გაზომილი სიდიდე მიაღწევს კრიტიკულ მასას, ძრავა უნდა მოიხსნას ექსპლუატაციიდან მისი გარემონტების მიზნით, თუნდაც ეს მოხდეს ძრავას ტექნიკური მომსახურების რეგლამენტით დადგენილ ვადაზე ადრე, რათა არ გამოვიდეს იგი მწყობრიდან და შენარჩუნებული იქნას მისი საექსპლუატაციო მაჩვენებლები.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტური მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. “О проблеме попадания посторонних предметов в двигатель летательного аппарата“, АВИАЦИЯ, ПОНЯТНАЯ ВСЕМ, 2012, <https://avia-simply.ru>;
2. N. M. Bojdo, “Rotorcraft Engine Air Particle Separation”, School of Mechanical, Aerospace & Civil Engineering, 2012;
3. „Как вулканический пепел останавливает двигатели самолетов?“, Центр ФОБОС, 2010, <https://www.meteovesti.ru/news>);
4. ICAO, DOC 9889, 2020;
5. А. С. Гишваров, Р. Р. Аитов, А. М. Айтумбетов. “Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей”, сб. Науч. Тр. Уфа. УГАТУ. ISSN 1992-6502. 2015;
6. Д.В. Павленко, Я. В. Двирник. “Закономерности изнашивания рабочих рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы”, ISSN 1727-0219 Вестник двигателестроения №1.2016;
7. <https://fakel-f.ru/blog/01-04-18>;
8. Ahmed F. El-Sayed, „Bird Strike in Aviation: Statistics, Analysis and Management“, 2019;
9. R. Khachidze, A. Maisuradze, G. Tsutskiridze. „Analysis of The Statistics of Injuries Caused by Birds Getting into The Engine When They Collide with Aircraft and Estimation of The Costs to be Incurred for Their Elimination“, „Air Transport“, ISSN 1512- 4916, #1(17) 2023;
10. “Характеристики и свойства песка: основные параметры песка.” *Gruntovozov.ru*, accessed October 8, 2025. <https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/svoystva-peska>;
11. Yang, Shaoping, et al. “Characterization of Sand and Dust Particles for Turbomachinery Erosion Testing.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 135, no. 6 (2013);
12. SAE International. *Aerospace Particle Separation and Filtration Systems*. Warrendale, PA: SAE International, 2018;
13. R. Khachidze, A. Maisuradze, V. Kelikhashvili. “Ways of measuring the number of foreign particles in the gas turbine engine air intake”, „Air Transport“, ISSN 1512- 4916, #1(16) 2022.

Analysis and Classification of Foreign Object Characteristics in the Airflow Entering Aircraft Gas-Turbine Engines, and Strategies for Preventing Their Ingestion

Robert Khachidze¹, Andro Maisuradze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The paper examines the operational conditions of aircraft (airplanes and helicopters) under which foreign solid particles (dust, sand, and others) enter their engines and cause damage. The characteristics of solid particles ingested into the engine, such as size, mass, density, abrasiveness, and other properties—are analyzed, as these parameters determine the type and extent of damage sustained by engine components (including the compressor, turbine, and other parts). The study also proposes methods for reducing and preventing such damage.*

Keywords: *Aircraft, engine, airflow, foreign object, solid particle, engine damage.*

ნანოტექნოლოგიები და თანამედროვე ავიაშენებლობა

გელა ოთარაშვილი¹, ზურაბ საბაშვილი², კონსტანტინე ხახანაშვილი³

^{1,2,3} საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 0160,

საქართველო, თბილისი, კოსტავას 77

რეზიუმე: ნაშრომში აღნიშნულია, რომ ავიაციის განვითარების ახალი დონის მიღწევა შესაძლებელია მხოლოდ ისეთი ინოვაციური ტექნოლოგიების გამოყენებით, როგორიც არის ნანოტექნოლოგიები. ამას საფრენი აპარატების განვითარების განსაკუთრებული მოთხოვნები განაპირობებს. თანამედროვე მსოფლიოში ავიაცია სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს გლობალურ ეკონომიკაში. ამ კონტექსტში, ნანოტექნოლოგია ხდება ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორი, რომელსაც შეუძლია მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინოს ავიაციის განვითარების მომავალზე. ნანოტექნოლოგია გთავაზობთ უნიკალურ შესაძლებლობებს მასალებისა და კომპონენტების სრულყოფისათვის, რაც იწვევს საფრენი აპარატების ეფექტურობისა და უსაფრთხოების ზრდას. მას ასევე შეუძლია შეამციროს ავიაციის გარემოზე ნეგატიური ზემოქმედება და უზრუნველყოს ინდუსტრიის უფრო მდგრადი განვითარება. სტატიაში წარმოდგენილია ნანოტექნოლოგიების ავიაციაზე გავლენის მიმოხილვა და ანალიზი, ამ სფეროში მიმდინარე მიღწევებისა და მათი გამოყენების პოტენციური პერსპექტივები. ნანოტექნოლოგია არის მეცნიერებისა და ტექნიკის სფერო, რომელსაც ეხება მასალებისა და სტრუქტურების მართვა ნანომასშტაბურ დონეზე. ასეთი მასშტაბი ნიშნავს, რომ შესასწავლი და შესაქმნელი ობიექტების ზომები ნანომეტრების დიაპაზონშია.

საკვანძო სიტყვები: ნანოტექნოლოგია, ნანოკომპოზიტი, ნანომილაკი, გრაფენი.

ძირითადი ნაწილი

ნანომასალების გამოყენება საავიაციო კონსტრუქციებში მნიშვნელოვანი ფაქტორია ავიაციის ეფექტურობისა და უსაფრთხოების გასაუმჯობესებლად. ნანოკომპოზიტები გამოიყენება მასალების თვისებების გასაუმჯობესებლად, მათ შორის ფართოდ გამოყენება ნახშირბადპლასტიკები. ნანომასალები ხელს უწყობს საავიაციო მასალების სიმტკიცის ზრდას და კუთრი წონის შემცირებას, რაც საშუალებას იძლევა შეიქმნას უფრო მსუბუქი და მტკიცე საფრენი აპარატები. ნანონაწილაკების გამოყენება სტრუქტურულ კომპონენტებში ხელს უწყობს საფრენი აპარატების წონის შემცირებას, რაც იწვევს საწვავის მოხმარებისა და გამონახოლქვის შემცირებას და აუმჯობესებს გარემოსდაცვით მაჩვენებლებს. ნანოკომპოზიტები ასევე აძლიერებს მასალების მდგრადობას მაღალი ტემპერატურისა და ექსტრემალური პირობების მიმართ, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ტურბინის ძრავებისა და სხვა სისტემებისთვის. ნანოტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელია თვითწმენდადი ზედაპირების შესაქმნელად,

რომლებიც ამცირებენ ყინულისა და სხვა დამაბინძურებლების ადჰეზიას თვითმფრინავის ზედაპირებზე [1].

არსებობს ნანომასალების მრავალი განსხვავებული ტიპი, რომელთაგან თითოეულს გააჩნია უნიკალური თვისებები. წარმოვადგინოთ მათი რამდენიმე ძირითადი ტიპი და მახასიათებელი:

1. ნანონაწილაკები (ნანოფხვნილები): ეს პატარა ნაწილაკებია, რომელთა ზომა ერთეულებიდან - რამდენიმე ასეულ ნანომეტრამდე მერყეობს. მათი ძირითადი თვისებებია დიდი ზედაპირული აქტივობა, მაღალი რეაქციულობა და სპეციფიკური ოპტიკური თვისებები.

2. ნანოკრისტალები: ეს არის კრისტალური მასალები ნანოსკოპიური სტრუქტურით. მათი თვისებები განსხვავდება უფრო დიდი კრისტალების თვისებებისგან, მათ შორის მექანიკური, ოპტიკური და ელექტრონული მახასიათებლებით.

3. ნანოკომპოზიტები: ეს მასალები შედგება ნანონაწილაკებისა და სხვა მასალების კომბინაციისგან. მაგალითად, ნანომილაკებით გამტკიცებული ნახშირბადის კომპოზიტები გამოირჩევიან განსაკუთრებული სიმტკიცით და სიმსუბუქით.

4. ნანომილაკები: ეს არის ცილინდრული ნანომასშტაბიანი სტრუქტურები, რომლებიც ჩვეულებრივ ნახშირბადისგან მზადდება. სტრუქტურიდან გამომდინარე არიან გამტარები ან ნახევარგამტარები, ხასიათდებიან მაღალი სიმტკიცითა და დრეკადობის მოდულით.

5. ნანოფირები: ნანომეტრული სისქის თხელი ფირები, რომლებიც გამოიყენება ელექტრონიკასა და სენსორებში.

6. კვანტური წერტილები: ეს არის ნანოზომითი ნახევარგამტარული სტრუქტურები, რომლებიც ხშირად გამოიყენება ოპტიკასა და ფოტონიკაში. მათი ოპტიკური თვისებები დამოკიდებულია მათ ზომასა და შემადგენლობაზე.

7. ნანოსითხეები: სითხეები ნანონაწილაკების შემცველობით, რომლებსაც აქვთ შეცვლილი თბოფიზიკური და ელექტრომაგნიტური თვისებები. ისინი გამოიყენება გაგრილების სისტემებში, შეზეთვასა და სხვა მრავალ სფეროში.

ნანომასალები ხასიათდებიან გაუმჯობესებული მექანიკური, ელექტრონული, ოპტიკური და ქიმიური თვისებებით. ისინი ხასიათდებიან მაღალი ზედაპირული აქტივობით, რითაც ისინი აუმჯობესებენ კატალიზისა და სორბციის პროცესებს. თუმცა, ნანომასალებთან მუშაობისას, გასათვალისწინებელია მათი პოტენციური რისკები ადამიანის ჯანმრთელობასა და გარემოსთან დაკავშირებით, ასევე დაცული უნდა იქნას შესაბამისი უსაფრთხოების ზომები.

ნანოტექნოლოგია გამოიყენება მასალების შესაქმნელად, რომლებსაც შეუძლიათ შეამცირონ ხმაური და ვიბრაცია თვითმფრინავში, რაც აუმჯობესებს მგზავრობის კომფორტს. ნანოსენსორებით შესაძლებელია მონიტორინგის სისტემების შექმნა, რომლებიც რეალურ დროში დააფიქსირებენ მასალებში დაზიანებისა და ცვეთის პროცესს.

ავტომატიზირებული სისტემებისა და რობოტიზირებული ტექნოლოგიების დანერგვა წარმოებაში აუმჯობესებს წარმოების სიზუსტეს და სიჩქარეს, ამავდროულად ამცირებს შეცდომებისა და დეფექტების ალბათობას. 3D - ბეჭდვით შესაძლებელია შეიქმნას რთული დეტალები და კომპონენტები, რომელთა რეალიზებაც რთულია ტრადიციული მეთოდებით, რაც

თავის მხრივ ზრდის პროექტირების მოქნილობას და ამცირებს ტექნოლოგიური პროცესის დროს. ნანომილაკებისა და სხვა გამამტკიცებელი ნანოსტრუქტურული მასალისგან დამზადებულ კომპოზიტებს გააჩნიათ მაღალი სიმტკიცის, დრეკადობის მოდულისა და მსუბუქი წონის მაჩვენებლები.

ინფუზიური ჩამოსხმის ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა შეიქმნას დიდი ფორმისა და რთული აღნაგობის კომპოზიტური დეტალები, მათ შორის ფრთებისა და სამართავი სისტემების ჩათვლით, რომლებიც მაღალი სიმტკიცითა და მცირე წონით გამოირჩევიან. კომპოზიტების მიღების თანამედროვე მეთოდებისა და მასალების მაღალტემპერატურული დამუშავების შედეგად უმჯობესდება მათი მექანიკური თვისებები, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დიდი დატვირთვებისა და მაღალ ტემპერატურულ რეჟიმში მომუშავე კონსტრუქციებისთვის.

ნანოგამდიდრებული დანაფრების ზედაპირები ჰიდროფობიური თვისებებით ხასიათდებიან, რაც მათ უფრო წყალამრიდ თვისებებს ანიჭებს, ამით ამცირებს ტენიანობის დაგროვებისა და ყინულის წარმოქმნის ალბათობას ისეთ კრიტიკულ ზედაპირებზე, როგორიცაა ფრთები და სტაბილიზატორები [1]. დანაფრები ასევე იცავს თვითმფრინავს დამაბინძურებლებისა და ჭვარტლის დაგროვებისგან, ამცირებს რეგულარული წმენდისა და მოვლა-პატრონობის საჭიროებას. ნანოგამდიდრებული დანაფარი ასევე შეიძლება სპეცილურად დაპროექტდეს თვითმფრინავის გასწვრივ ჰაერის ნაკადის შესაცვლელად, რათა შემცირდეს წინაღობის ძალები და გაუმჯობესდეს აეროდინამიკური მახასიათებლები.

ნანოტექნოლოგიას ავიაძრავთმშენებლობაში შეუძლია მნიშვნელოვანი უპირატესობა მოიტანოს, განსაკუთრებით მსუბუქი და მძლავრი ტურბორეაქტიული და ტურბოხრახნიანი ძრავების შემუშავებაში. ნანომასალების გამოყენება, როგორიცაა ნახშირბადის ფუძეზე შექმნილი ნანოკომპოზიტები, საშუალებას იძლევა შეიქმნას მაღალი სიმტკიცისა და მცირე წონის მქონე ძრავის კომპონენტები. ეს ამცირებს კონსტრუქციის წონას და ზრდის მათ ეფექტურობას. ძრავის კომპონენტების გაუმჯობესებული მექანიკური თვისებები მიიღწევა ალუმინის, ტიტანისა და ნიკელის ფუძეზე დამზადებული ნანოკომპოზიტების გამოყენებით. ასეთი მასალების გამტკიცების მექანიზმი რამდენიმე ფაქტორზეა დაფუძნებული [2]. პირველ რიგში, ნანონაწილაკები დისლოკაციის მოძრაობის საწინააღმდეგო ეფექტურ ბარიერებს წარმოადგენენ, რაც ოროვანის მექანიზმის მიხედვით მასალების დენადობის ზღვარის ზრდას იწვევს. მეორეც, ნანონაწილაკების მაღალი კუთრი ზედაპირი ხელს უწყობს მატრიცასთან კოჰერენტული და ნახევრად კოჰერენტული საზღვრების ფორმირებას, რაც ზრდის პლასტიკური დეფორმაციისთვის საჭირო ენერგიას. მაგალითად, ალუმინის ოქსიდის (Al_2O_3) ნანონაწილაკების ალუმინის შენადნობებში შეყვანა 20-30%-ით ზრდის სიმტკიცის ზღვარს, ამავდროულად ნარჩუნდება პლასტიკურობა. ეს აიხსნება იმით, რომ 20-50 ნმ ზომის Al_2O_3 ნანონაწილაკები თანაბრად ნაწილდება ალუმინის მატრიცის მარცვლების საზღვრების გასწვრივ, რაც ხელს უშლის მათ ზრდას და მოძრაობას, ამასთან ხელს უშლის დიდი აგლომერატების წარმოქმნას, რომლებიც შეიძლება დამაბულობის კონცენტრაციის წყაროებად იქცნენ.

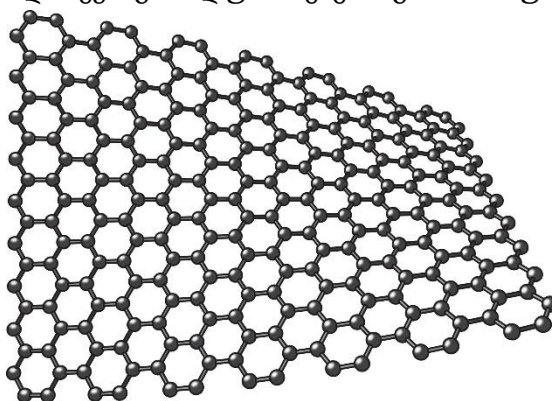
ძრავის კომპონენტების თერმული მდგრადობის ზრდა მიიღწევა ცირკონიუმის ოქსიდზე (ZrO_2) დაფუძნებული ნანოსტრუქტურული თერმობარიერული დანაფარის გამოყენებით [3].

ასეთი დანაფარის ეფექტურობა რამდენიმე ფაქტორითაა განპირობებული. პირველ რიგში, ნანოსტრუქტურულ ZrO_2 -ს მნიშვნელოვნად დაბალი თბოგამტარობა აქვს მიკროსტრუქტურულ ანალოგთან შედარებით, ნანოკრისტალიტების საზღვრებზე ფონონების გაფანტვის ზრდის გამო. მეორეც, ნანოსტრუქტურა ზეპლასტიურობის საშუალებას იძლევა მაღალ ტემპერატურებზე, რაც უზრუნველყოფს თერმული დამაბულობების რელქსაციას და ზრდის თერმოციკლირებისადმი მდგრადობას. გარდა ამისა, დანაფარის სტრუქტურაში ნანოზომითი ფორები ჟანგბადის ეფექტური დამჭერების ფუნქციას ასრულებს, რაც ანელებს დანაფარის ჟანგვით პროცესებს. კვლევები გვიჩვენებს, რომ 100-200 მკმ სისქის ნანოსტრუქტურული თერმობარიერული დანაფარის გამოყენებას შეუძლია ლითონის ტურბინის ნიჩბების საექსპლუატაციო ტემპერატურა 50 - 100°C - ით შეამციროს, რაც მნიშვნელოვნად გაზრდის მათი მუშაობის ვადას, ცოცხადობისა და ჟანგვის პროცესების შენელების ხარჯზე [4].

ასევე დიდ ინტერესს იწვევს გრაფენისა და ნახშირბადის ნანომილაკების გამოყენების შესაძლებლობა საავიაციო მრეწველობაში და მათი პოტენციური საჰაერო ხომალდების მახასიათებლებისა და უსაფრთხოების გასაუმჯობესებლად.

კონსტრუქციების წონის შემცირება ნახშირბადის ნანომილაკებსა და გრაფენზე დაფუძნებული ნანოკომპოზიტების გამოყენებით მიიღწევა ამ ნანომასალების უნიკალური თვისებების წყალობით [5]. ნახშირბადის ნანომილაკებს აქვთ განსაკუთრებით მაღალი სიმტკიცე - წონის თანაფარდობა: მათი კუთრი სიმტკიცე შეიძლება 100 - ჯერ მეტი იყოს, ვიდრე ფოლადის. ეს განპირობებულია ნახშირბადის ატომებს შორის ძლიერი კოვალენტური ბმებით და ნანომილაკების თითქმის სრულყოფილი კრისტალური სტრუქტურით. როდესაც ნახშირბადის ნანომილაკები (ნნმ) შეჰყავთ პოლიმერულ ან ლითონის მატრიცაში, ისინი ეფექტურად აღიქვამენ და აწილებენ დატვირთვას მათი მაღალი ასპექტური თანაფარდობის (სიგრძისა და დიამეტრის თანაფარდობა) გამო, რომელმაც შეიძლება 1000 ან მეტს მიაღწიოს [6] [7].

გრაფენი წარმოადგენს ნახშირბადის ორგანოზომილებიან ნანოალოტროპს, რომლის სისქე ერთი ატომით განისაზღვრება და ჰექსაგონალური მესერი გააჩნია. სურ. 1



სურ. 1 გრაფენი

მისი მახასიათებლებია:

სიმტკიცე. როდესაც გრაფენი ორ ფენად იკეცება, მიიღება დიამენი, რომელიც ტყვიის დარტყმასაც კი უძლებს.

მოქნილობა. ეს თვისება განპირობებულია გრაფენის ორგანოზომილებიანი სტრუქტურით; ის უფრო მოქნილია ვიდრე რეზინი.

თბო და ელექტროგამტარობა. მისი თბო და ელექტროგამტარობა სპილენძს 6 - ჯერ აღემატება.

ოპტიკური სისუფთავე. გრაფენი თითქმის უფეროა და 97%-ით გამჭვირვალე, შთანთქავს ხილული სინათლის მხოლოდ 2%-ზე ოდნავ მეტს.

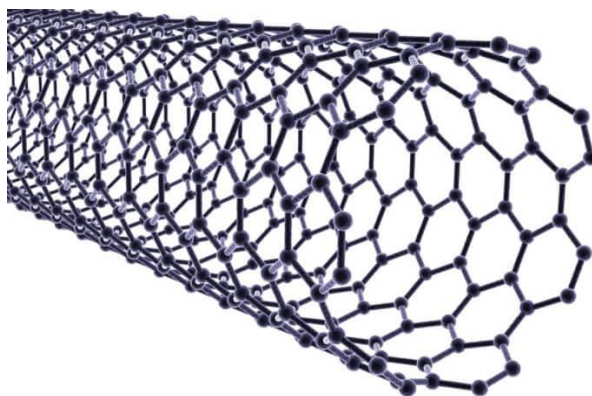
ნახშირბადის ნანომილაკი, (შემოკლებით ნნმ) ნახშირბადის ალოტროპული მოდიფიკაციაა, რომელიც წარმოადგენს ღრუ ცილინდრულ სტრუქტურას, რომლის დიამეტრი 0,4 ნმ - იდან 100 ნმ - მდე, სიგრძე 1 მიკრომეტრიდან 100 მიკრომეტრამდეა და გრაფენის იდეალური ჰექსაგონალური ბადის დახვევის შედეგად მიღებულ გამჭოლ მილას წარმოადგენს. ის ფოლადზე 100 - ჯერ მტკიცე და 6 - ჯერ მსუბუქია. სახეობიდან გამომდინარე აქვს როგორც ნახევარგამტარის ასევე ლითონის თვისებები. სურ. 2

ნანოდანამატის სახით გამოყენებული გრაფენი და ნახშირბადის ნანომილაკები მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს საბაზისო მასალის თვისებებს, მათ შორის სიმტკიცეს და ცვეთამდეგობას. ეს ზრდის თვითმფრინავების ოპერატიულ შესაძლებლობებსა და უსაფრთხოებას.

გრაფენსა და ნახშირბადის ნანომილაკებს შეუძლიათ შეამცირონ საჰაერო ხომალდების წონა მათი დაბალი სიმკვრივის, 1.9 გ/სმ³-ის გამო, რაც 1.5-ჯერ ნაკლებია ვიდრე ალუმინის. ეს აუმჯობესებს თვითმფრინავების აეროდინამიკას და მანევრირების უნარს.

გრაფენს აქვს მაღალი ელექტროგამტარობა, რაც ამცირებს თვითმფრინავების მეხით დაზიანების ალბათობას. ეს კი აუმჯობესებს ფრენის უსაფრთხოებას.

თავისი თერმული თვისებებით, გრაფენსა და ნახშირბადის ნანომილაკებს შეუძლიათ თავიდან აიცილონ საფრენი აპარატის ზედაპირის გაყინვა დაბალ ტემპერატურებზე, რაც ასევე მნიშვნელოვანი ფაქტორია ფრენის უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად.



სურ. 2 ნახშირბადის ნანომილაკი

ნანომასალები ასევე შეიძლება გამოვიყენოთ გაუმჯობესებული სითბოგადაცემისა და თბოიზოლაციის მქონე ზედაპირების შესაქმნელად, რაც ხელს უწყობს მრავში წვისა და გაგრილების ეფექტურობის ზრდას. მრავის ცალკეული კომპონენტების თბოგამტარობის გაუმჯობესება მიიღწევა პოლიმერულ კომპოზიტებში ნახშირბადის ნანომილაკების (ნნმ) დამატებით [8]. გაუმჯობესებული თბოგამტარობა ეფუძნება პოლიმერულ მატრიცაში (ნნმ)-ებით პერკოლაციური ბადის ფორმირებას. კრიტიკული კონცენტრაციის (როგორც წესი, 0.5-2 მოცულობითი%) მიღწევის შემდეგ, (ნნმ)-ები ქმნიან უწყვეტ სითბოგადაცემ გზებს. (ნნმ)-ების ღერძულმა თბოგამტარობამ შეიძლება მიაღწიოს 3000-6000 W/(m·K)-ს, რაც ჯეროვნად აღემატება პოლიმერების თბოგამტარობას (0.1-0.5 W/(m·K)). მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ მაქსიმალური ეფექტისთვის აუცილებელია (ნნმ)-ების თანაბარი განაწილებისა და თბური ნაკადის მიმართულებით მათი ორიენტაციის უზრუნველყოფა, რაც მიიღწევა სპეციალიზებული დისპერგირებისა და ორიენტაციის მეთოდების გამოყენებით.

მინიატურიზებული ნანოსენსორებისა და ნანოელექტრონიკის ინტეგრირებით რეაქტიულ მრავებში შესაძლებელია მათი მუშაობის მუდმივი მონიტორინგი და კონტროლი, რაც ზრდის მათ საიმედოობას და ამცირებს საწვავის მოხმარებას. გარდა ამისა, ნანომასალების გამოყენება შესაძლებელია უფრო ეფექტური კატალიზატორების შესაქმნელად, რაც აუმჯობესებს წვის პროცესს და ამცირებს მავნე გამონაბოლქვს.

ნანოტექნოლოგია ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ელექტრონიკასა და ავიონიკაში. ის საშუალებას იძლევა შეიქმნას კომპონენტები და სტრუქტურები ნანომასშტაბურ დონეზე, რაც იწვევს ელექტრონული მოწყობილობების მუშაობისა და ფუნქციონალურობის გაუმჯობესებას. ნანოტექნოლოგიის გამოყენებით მცირდება ინტეგრალური სქემების ელემენტთა ზომები, რაც ზრდის ინტეგრაციის სიმკვრივეს და მოწყობილობის მუშაობის სიჩქარეს. ნანომასალებისა და ნანოსტრუქტურების გამოყენება ხელს უწყობს ელექტრონული მოწყობილობების, განსაკუთრებით მობილური მოწყობილობებისა და ელემენტების ენერგომოხმარების შემცირებას.

ნანოტექნოლოგია საშუალებას იძლევა შეიქმნას უნიკალური თვისებების მქონე მასალები, როგორიცაა კვანტური წერტილები, რომლებიც აუმჯობესებენ ელექტრონიკის მუშაობას. ასევე შეიქმნას მიკრო და ნანომასშტაბიანი მოწყობილობები, მათ შორის ნანორობოტები, ნანოსენსორები და მაღალხარისხიანი დისკლები, რაც ხელს შეუწყობს უფრო კომპაქტური და ფუნქციონალური ელექტრონული სისტემების განვითარებას.

საერთო ჯამში, ნანოტექნოლოგიას უზარმაზარი პოტენციალი აქვს თანამედროვე ელექტრონიკის ტრანსფორმაციისთვის. მინიატურიზაცია საშუალებას იძლევა შეიქმნას უფრო მცირე ზომის ელექტრონული კომპონენტები და სისტემები, რაც თავის მხრივ შეამცირებს თვითმფრინავის წონას, საწვავის მოხმარებას და გააუმჯობესებს ფრენის ეფექტურობას. კომპაქტური და მძლავრი ელექტრონული სისტემები უზრუნველყოფს ფრენის უფრო ზუსტ კონტროლს და მონიტორინგს, აუმჯობესებს ავიაციის უსაფრთხოებას. თანამედროვე ნანომასალები და წარმოების ტექნოლოგიები საშუალებას იძლევა შეიქმნას უფრო საიმედო კომპონენტები, რომლებიც ნაკლებად ექვემდებარება დაზიანებასა და გაუმართაობას.

მინიატურული ელექტრონული სისტემები ხელს უწყობენ თვითმფრინავის სამართავი სისტემების ავტომატიზაციას, ამცირებენ პილოტების სამუშაო დატვირთვას და აუმჯობესებს ფრენის უსაფრთხოებას. გარდა ამისა, ნანოტექნოლოგიისა და მინიატურული სენსორების საშუალებით შესაძლებელია უფრო ზუსტი და სწრაფი ნავიგაციის სისტემების შექმნა, ფრენის დროის შემცირება და მარშრუტის ოპტიმიზაცია.

ნანოკომპოზიტების გამოყენებით უმჯობესდება თვითმფრინავის კონსტრუქციისა და კოსმოსური აპარატების სიმტკიცე და ექსპლუატაციის ხანგრძლივობა.

ნანოტექნოლოგია ასევე საშუალებას იძლევა შეიქმნას უფრო ზუსტი და მგრძნობიარე სენსორები და დეტექტორები, რომლებსაც შეუძლიათ თვითმფრინავის მდგომარეობის უწყვეტი მონიტორინგი და პოტენციური პრობლემების შესახებ გაფრთხილება.

თუმცა, რიგ შემთხვევებში ავიაშენებლობაში ნანოტექნოლოგიების დანერგვა შეშფოთებას იწვევს ადამიანის ჯანმრთელობასა და გარემოზე მათი ზემოქმედების კუთხით. შედეგად, საჭიროა დამატებითი კვლევები და შესაბამისი უსაფრთხოების ზომების შემუშავება პოტენციური რისკების მინიმიზაციისთვის.

ასევე ნანოტექნოლოგიის დანერგვა მოითხოვს კვლევისა და წარმოების ხარჯებს, რაც შეიძლება მნიშვნელოვანი ბარიერი იყოს ავიაშენებლო კომპანიებისთვის, განსაკუთრებით მცირე და საშუალო საწარმოებისთვის. გარდა ამისა, უნდა შემუშავდეს სტანდარტები და რეგულაციები ნანომასალებისა და მათი გამოყენების უსაფრთხოებისა და ხარისხის უზრუნველსაყოფად.

ნანოტექნოლოგიების დანერგვა ავიაშენებლობაში ბევრ მოსალოდნელ უპირატესობასა და გამოწვევას გვთავაზობს.

ერთ-ერთი მთავარი სარგებელი წარმოების პროდუქტიულობისა და ეფექტურობის გაუმჯობესებაა. ნანოტექნოლოგია საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ მასალები უნიკალური თვისებებით - მაღალი სიმტკიცით, სიმსუბუქით და ექსტრემალური პირობებისადმი მდგრადობით. ამ მიდგომით შესაძლებელია გავაუმჯობესოთ საჰაერო ხომალდების წარმადობა და ეფექტურობა, გავზარდოთ აეროდინამიკური მახასიათებლები.

გარდა ამისა, ნანოტექნოლოგიის დანერგვას შეუძლია გააუმჯობესოს თვითმფრინავების კონსტრუქციების უსაფრთხოება და საიმედოობა. გაუმჯობესებული მექანიკური და ქიმიური თვისებების მქონე მასალების შექმნა თვითმფრინავებს უფრო მდგრადს ხდის სხვადასხვა ზემოქმედების მიმართ, როგორცაა დარტყმები და კოროზია. ეს ხსნის ახალ ინოვაციურ პერსპექტივებს საავიაციო სისტემებისა და კომპონენტებისთვის.

მომავალში, ავიაშენებლობაში ნანოტექნოლოგიების კვლევისა და განვითარების საკითხები შეიძლება რამდენიმე ასპექტზე იყოს ორიენტირებული.

I. ეს გულისხმობს ახალი ნანომასალების შემუშავებას გაუმჯობესებული თვისებებით, როგორცაა სიმტკიცე, ექსტრემალური პირობებისადმი მდგრადობა და გაუმჯობესებული აეროდინამიკა. ეს მოიცავს ახალი ნანოკომპოზიტების, ნანოკერამიკის, ნანომილაკებისა და სხვა სტრუქტურების შექმნას.

II. კვლევა შეიძლება ფოკუსირებული იყოს ნანომასალების წარმოების პროცესების გაუმჯობესებაზე და მათ ინტეგრაციაზე საავიაციო კონსტრუქციებში. ეს შეიძლება მოიცავდეს ახალი ტექნოლოგიების გამოყენებას, როგორიცაა ნანოიმპრინტინგი, ნანოლითოგრაფია და ნანოსკანირება, უფრო ეფექტური და ეკონომიური წარმოების მეთოდების შესაქმნელად.

III. მნიშვნელოვანია ნანომასალების გარემოსთან ურთიერთქმედების შესწავლა პოტენციური რისკების დასადგენად და შესაბამისი უსაფრთხოების ზომების შესამუშავებლად. ასევე აუცილებელია ახალი ფუნქციონალური თვისებების მქონე მასალების შემუშავების გაგრძელება, როგორიცაა თვითაღდგენის, თვითწმენდისა და ფორმის შეცვლის უნარი. ეს ახალ შესაძლებლობებს ქმნის ინოვაციური საავიაციო სისტემებისა და კომპონენტების შესაქმნელად.

საჭიროა კვლევების ჩატარება ავიაშენებლობაზე ნანოტექნოლოგიების ეკონომიკურ და სოციალურ გავლენასთან დაკავშირებით. ხარჯებისა და სარგებლის ანალიზი, სამუშაო ადგილებისა და საზოგადოებაზე ზემოქმედების შეფასება, ასევე ნანოტექნოლოგიების ინდუსტრიაში წარმატებითი დანერგვის სტრატეგიების შემუშავება - ყველაფერი ეს მნიშვნელოვანი მომენტებია, რომლებიც შესწავლას საჭიროებს.

საერთო ჯამში, ნანოტექნოლოგიას უზარმაზარი პოტენციალი აქვს ავიაშენებლობის წარმოებაში პროდუქტიულობის, უსაფრთხოებისა და გარემოსდაცვითი მდგრადობის გასაუმჯობესებლად. ასევე მნიშვნელოვანი საკითხია ნანოტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების შემუშავება ავიაკაციაში ენერგომოხმარებისა და სითბური ეფექტის მქონე აირების გამოყოფის შესამცირებლად.

ყველა ეს კვლევა საშუალებას მისცემს ავიაკაციის ინდუსტრიას შექმნას უფრო სრულყოფილი და ეკოლოგიურად სუფთა საფრენი აპარატები.

დასკვნა

გრაფენს, ნახშირბადის ნანომილაკებს, ნანოფხვნილებს, ნანოკომპოზიტებსა და ნანოფირებს აქვთ დიდი პოტენციალი ავიაკაციის ინდუსტრიაში გამოყენებისთვის მათი განსაკუთრებული მექანიკური, თერმული, ელექტრული და ბარიერული თვისებების გამო. ამ ინოვაციურ ნანომასალებს შეუძლიათ მნიშვნელოვნად გააუმჯობესონ საჰაერო ხომალდების მახასიათებლები, გააძლიერონ ფრენის უსაფრთხოება და შეამცირონ საექსპლუატაციო ხარჯები. ამ მასალების შემდგომმა კვლევამ შეიძლება გააფართოვოს მათი გამოყენება ავიაინდუსტრიაში, გაზარდოს ეფექტურობა და ინოვაციურობა.

გამოყენებული ლიტერატურა:

- 1.Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов. Учебник для вузов: элементы и системы электрооборудования - Противообледенительные системы на основе использования специальных покрытий и жидкостей. – М. Типография "Новости", 2005, С. 352-362.
- 2.Tjong S. C. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets //Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2013. – Т. 74. – №. 10. – С. 281-350.
- 3.Liu Q., Huang S., He A. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines //Journal of materials science & technology. – 2019. – Т. 35. – №. 12. – С. 2814-2823.
- 4.Clarke D. R., Phillpot S. R. Thermal barrier coating materials //Materials today. – 2005. – Т. 8. – №. 6. – С. 22-29.
- 5.Kumar A., Sharma K., Dixit A. R. Carbon nanotube-and graphene-reinforced multiphase polymeric composites: review on their properties and applications //Journal of Materials Science. – 2020. – Т. 55. – №. 7. – С. 2682-2724.
- 6.Беленков Е.А., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. ISBN 5–7691–1958–6.
- 7.Riemenschneider J., Mahrholz T., Mosch J., Monner H. P., Melcher J. Carbon nanotubes – Smart material of the future: Experimental investigation of the system response // II ECCOMAS thematic conference on smart structures and materials: Materials and Processes. Lisbon, Portugal, 2005. P. 18–25.
- 8.Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review //Progress in polymer science. – 2011. – Т. 36. – №. 7. – С. 914-944.

Nanotechnology and Modern Aircraft Manufacturing

Gela Otarashvili¹, Zurab Sabashvili², Konstantine Khakhanashvili³

^{1, 2, 3} Georgian Technical University,
0160, 77 Kostava Str. Tbilisi, Georgia

Abstract: *The paper highlights that achieving a new level of aviation development is possible only through the use of innovative technologies such as nanotechnology. This necessity arises from the specific demands of aircraft advancement. In today's world, aviation plays a vital role in the global economy. Within this context, nanotechnology emerges as a key factor capable of significantly shaping the future of aviation. Nanotechnology provides unique opportunities for enhancing materials and components, thereby improving aircraft efficiency and safety. It also has the potential to reduce aviation's negative environmental impact and foster more sustainable industry growth. This article presents a review and analysis of nanotechnology's influence on aviation, current achievements in the field, and potential future applications. Nanotechnology is a branch of science and technology concerned with manipulating materials and structures at the nanoscale, where the dimensions of studied and engineered objects fall within the nanometer range.*

Keywords: *nanotechnology, nanocomposite, nanotube, graphene.*

საერთაშორისო ლოგისტიკური ცენტრების მნიშვნელობა

ანა კურტანიძე¹, გიორგი ევგენიძე²

^{1,2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე. ინფრასტრუქტურული ობიექტების კომპლექსი, რომელიც ლოკალურ ტერიტორიაზეა განთავსებული, სადაც მიმდინარეობს ინტეგრაციისა და კოორდინაციის პროცესების რეალიზაცია, ლოგისტიკურ ცენტრებს წარმოადგენს. მე-20 საუკუნის 60-90-იან წლებში, აშშ-სა და ევროპაში, სასაქონლო ნაკადების ტრანსპორტირებისა და გადანაწილების სფეროში, თავი იჩინეს გარკვეულმა პრობლემებმა და ტენდენციებმა, რომელთა შესწავლა აუცილებელი გახდა, სხვადასხვა ფორმატის ლოგისტიკური ცენტრების ფორმირების პროცესების სრულყოფისათვის. საერთაშორისო გამოცდილება ცხადყოფს, რომ, მიკრო და მაკროეკონომიკურ ჭრილში, მაქსიმალურ ეფექტიანობას უზრუნველყოფს ინტეგრირებული ლოგისტიკური მომსახურება, რომლის დროსაც, ლოგისტიკური კომპანიები (პროვაიდერები, ოპერატორები), მატერიალურ-სასაქონლო ნაკადების მოძრაობისა და მომსახურებისას, კომპლექსურად ახორციელებენ მრავალფეროვან ლოგისტიკურ მომსახურებას.

საკვანძო სიტყვები: ლოგისტიკა, სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურა, ლოგისტიკური ცენტრები.

შესავალი

მსხვილი ლოგისტიკური პროვაიდერების გამოჩენამ და მათ მიერ საკუთარი ლოგისტიკური ქსელის ფორმირებამ, დიდი სირთულეები შეუქმნა მცირე და საშუალო ბიზნესის წარმომადგენელ ფორმებს. გარდა ამისა, მცირე კომპანიები ტელემატიკური (სატრანსპორტო და ლოგისტიკურ სფეროში თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენება, ტელეკომუნიკაცია და ინფორმატიკა) სისტემების ფორმირების სირთულეებს გადააწყდნენ. აღნიშნული სისტემები კი, ლოგისტიკურ ბაზარზე ფუნქციონირებისათვის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს. მსხვილი კომპანიები საკუთარი ბიზნესის წარმატებით მართვისათვის ეფექტურად იყენებენ თანამედროვე საინფორმაციო მართვის სისტემებს. რაც შეეხება, მცირე ბიზნესის წარმომადგენელთ - IT უზრუნველყოფა, მაღალი ღირებულების გამო, მათთვის ხელმისაწვდომი არ არის. ამ და სხვა პრობლემათა ტრადიციული მეთოდებით გადაწყვეტა, მსხვილ ინვესტიციებს საჭიროებს, რომელთა ამოყიდვის ვადაც 15-20 წლით განისაზღვრება. ამიტომ, აუცილებელი გახდა, სატრანსპორტო სისტემების განვითარების იმ ალტერნატიული გზების ძიება, რომელთა გამოყენება არსებული ლოგისტიკური ინფრასტრუქტურის ეფექტიანობას გაზრდის და სამომავლო განვითარების გარანტი გახდება.

დასავლეთ ევროპის ქვეყნების გამოცდილებამ ცხადყო, რომ ლოგისტიკურ ცენტრებს მნიშვნელოვანი როლი ეკისრებათ ბიუჯეტის ფორმირებასა და მომხმარებელთა მთლიანი ლოგისტიკური დანახარჯების შემცირების საკითხებში. მაგ.: ჰოლანდიაში ტრანზიტული ლოგისტიკური ცენტრები სატრანსპორტო კომპლექსების შემოსავლების 40 %-ს ჰქმნიან.

საფრანგეთში - 31 %-ს და გერმანიაში კი - 25 %-ს. ცენტრალური და აღმოსავლეთ ევროპის ქვეყნებში მისი წილი 30 %-ია.

მიუხედავად სხვადასხვა ევროპულ ლოგისტიკურ ცენტრებს შორის არსებული განსხვავებისა, მათ აერთიანებთ შემდეგი - მულტიმოდალურობის სტიმულირება.

ძირითადი ნაწილი

1985 – 2000 წლებში, დასავლეთ ევროპის ბევრი სახელმწიფო აქტიურად ჩაება ლოგისტიკური ცენტრების მშენებლობის პროცესებში, რადგან აშკარა იყო მათი დადებითი ზეგავლენა რეგიონების განვითარებაზე და საჰაერო/სატვირთო გადაზიდვებში. სახელმწიფოებმა სამთავრობო დონეზე მხარი დაუჭირეს ლოგისტიკური ცენტრების ფორმირების პროგრამებს და უზრუნველყოფილი იქნა მათი ფინანსური და სამართლებრივი მხარდაჭერა. ამგვარად, 90 -იან წლებში შეიქმნა ლოგისტიკური ცენტრების ქსელი. ამგვარი პროგრამების რეალიზაციით გამოწვეული დანახარჯების ფონზე ენთუზიაზმი, რომელიც გამოწვეული იყო ამგვარი პოლიტიკის გატარებით და მიღწეული დადებითი შედეგებით, ნელ-ნელა ქრებოდა, მიღებული ეფექტიც კი არ შეესაბამებოდა მოსალოდნელს. ლოგისტიკური ცენტრები, 90-იანი წლებისთვის, არსებული ეკონომიკური ზრდის შენელების ფონზე, ვერ ვითარდებოდნენ. უფრო მეტიც - არადამაკმაყოფილებელი იყო მათი ათვისების ხარისხიც.

2008 წლის დასაწყისში, გერმანიამ შეიმუშავა სატვირთო გადაზიდვების და ლოგისტიკის გენერალური გეგმა. მისი მიზანი იყო ქვეყნის ლოგისტიკური სექტორის კონკურენტუნარიანობის ამაღლება, ლოგისტიკური ცენტრების გამოყენების, დაფინანსებისა და ორგანიზაციის ოპტიმალური სქემის, სატვირთო გადაზიდვების და ლოგისტიკის სტრუქტურული ცვლილებების და მდგრადი განვითარების უზრუნველყოფა. გენერალური გეგმა შემუშავებული იქნა სამთავრობო და არასამთავრობო ექსპერტების მიერ და ლოგისტიკურ ცენტრთა ქსელებთან დაკავშირებულ ოცდაშვიდ კონკრეტულ წინადადებას მოიცავდა.

პორტუგალიის ლოგისტიკური გეგმა - იგი ფორმირებული იქნა 2006 წელს და მოიცავდა ქვეყნის სტრატეგიულ წერტილებში, ლოგისტიკური ცენტრების განვითარების კომპლექსურ ნორმატიულ სტრუქტურების და დაგეგმვის სქემებს. გეგმა ითვალისწინებდა ლოგისტიკური საქმიანობის ხელშეწყობას, არსებული სატრანსპორტო ქსელის ექსპლუატაციის ეფექტიანობის გაზრდის, საჰაერო, სარკინიგზო და საზღვაო გადაზიდვების სტიმულირების მიზნით. ლოგისტიკური ცენტრების მშენებლობის, დაფინანსებისა და ექსპლუატაციის ამოცანების გადაჭრა კერძო სექტორს დაევა.

წარმოების, გადაზიდვებისა და ვაჭრობის გლობალიზაციამ, ჩვენს დროში, მოითხოვა უფრო ეფექტიანი, ლოგისტიკური და SCM (Supply Chain Management-მომარაგების ჯაჭვის მართვა) – გადაწყვეტილება, რომლის მეშვეობით შესაძლებელია საჰაერო, სატვირთო და სამგზავრო გადაზიდვების რაციონალური მართვა. ეს არის ტვირთის მოძიების, დასაწყობების, ტრანსპორტირების, დისტრიბუციის და მონაცემთა ნაკადების პროცესები.

მსოფლიო ბანკის მიერ არის შექმნილი ლოგისტიკის განვითარების ინდექსი - LPI (Logistics performance index - ლოგისტიკური განვითარების/მოქმედების ინდექსი), რომელიც აფასებს ქვეყნების ლოგისტიკურ სისტემას ექვსი კომპონენტის მიხედვით: საბაჟო მომსახურება, საერთაშორისო გადაზიდვები, ინფრასტრუქტურა, მომსახურება, ტვირთების ტრეკინგი (track & trace - ტვირთების გადაადგილების შესახებ თვალყური) და ზუსტად/დროში მიწოდება (timeliness). LPI შექმნა, როგორც გლობალური ინსტრუმენტი, ქვეყნებს შორის საერთაშორისო

შედარებისათვის, სტრატეგიული პოლიტიკის შესამუშავებლად, ინვესტიციების მოსაზიდად, ვაჭრობის გასამართივებლად. მსოფლიო ბანკი, რეგულარულად ასრულებს ანალიტიკურ ანგარიშებს და ქვეყნებს საშუალებას აძლევს ახლებური კომპარატიული (შედარების მიხედვით შეფასება) თვალთ შეაფასონ ლოგისტიკური სისტემები.

LPI-2023 მოიცავს 139 ქვეყანას. საქართველო, რომელიც 2018 წელს LPI-ში 119-ე ადგილზე იყო, 2013 წლის მონაცემებით 79-ე ადგილზე გადაინაცვლა. 2023 წელს ამ პოზიციაზე გადასვლა აშკარა პროგრესია. ქვეყანა საშუალო დონესთან არის ახლო, მაგრამ უდავოდ ბევრად ჩამორჩება ისეთ ქვეყნებს როგორიცაა სინგაპური, ფინეთი, დანია. ცნობისათვის, საქართველოს მეზობელი ქვეყნები თურქეთი - ოცდამეცხრამეტე (39) ადგილზეა, სომხეთი ოთხმოცდამეჩვიდმეტეზე (97), აზერბაიჯანი მესამოცეზე (60).

საქართველოს ძლიერი მხარე ამ კუთხით არის საბაჟო პროცედურების გაუმჯობესება წინა წლებთან შედარებით, ტვირთის დროული/ზუსტი მიწოდება და ტრეკინგი.

სუსტი მხარეებია - ინფრასტრუქტურა, საერთაშორისო გადაზიდვების ხელმისაწვდომობა და ფასი.

საქართველოსთვის სწორედ რეგიონულ ქსელში ინტეგრაცია და ინფრასტრუქტურის განახლება არის უმთავრესი გზა, რომ მომავალში უფრო მაღალ საფეხურზე გადაინაცვლოს LPI-ში. ცხადია, რომ საჰაერო და სატვირთო გადაზიდვების ორგანიზაციის და მათი მართვის ასპექტები, ლოგისტიკური ცენტრების გავლით, საერთაშორისო მნიშვნელობის მატარებელია.

საქართველოს განვითარების მიზნით, მდებარეობიდან გამომდინარე, აქტიურად შეუძლია მონაწილეობის მიღება სატრანზიტო საჰაერო სატვირთო ნაკადების შესრულებაში. ასევე, მთავრობა უნდა დაინტერესდეს აეროპორტების მიმდებარე ტერიტორიების ლოგისტიკური ზონების შექმნით, სპეციალური ეკონომიკური ზონებით, დისტრიბუციის ცენტრით. აუცილებელია სწრაფად დაინერგოს თანამედროვე სერვისები — IoT (“internet of things”-ტექნოლოგიური კონცეფცია, რომლის მიხედვითაც ფიზიკური ობიექტები მაგ.: მოწყობილობები, მანქანები, სენსორები, თერმოსტატები, კამერები და სხვა, ინტერნეტთან არიან დაკავშირებული და ერთმანეთთანაც კომუნიკაცია შეუძლიათ), მართვის სისტემები, e-Doc (Doc ნიშნავს "ელექტრონულ დოკუმენტს" – რომელიც ქალაქის მაგივრად ციფრული ფორმით არსებობს, ინახება ან იგზავნება), საბაჟო გამართივებები.

დასკვნა

აუცილებელი/საჭირო იქნება ხელისუფლების მხრიდან ხელშეწყობა LPI-ში. ინვესტიციების მოზიდვა, საერთაშორისო სტანდარტებთან შეთავსება - მაგ.: CEIV (Center of Excellence for Independent Validators) – ეს არის IATA-ს მიერ ინიცირებული დამოუკიდებელი შემფასებლების სრულყოფის ცენტრი და მათი რეკომენდაციების გათვალისწინება იქნება აუცილებელი. ეს სერტიფიცირების პროგრამა, მიზნად ისახავს საჰაერო ტვირთის სპეციფიკური კატეგორიებისთვის მაღალი ხარისხის, უსაფრთხოებისა და შესაბამისობის სტანდარტების დაცვას საერთაშორისო დონეზე. ამასთანავე, მნიშვნელოვანია თანამშრომლობა საერთაშორისო ლოგისტიკურ ოპერატორებთან, აეროპორტებთან, გადამზიდავ კომპანიებთან, რაც საშუალებას მოგვცემს სწრაფად მივიღოთ გამოცდილება და გავხსნათ ბაზრები.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Прокофьева Т.А., Сергеев В.И. Логистические центры в транспортной системе: Учебное пособие. – М.: Изд. дом «Экономическая газета», 2019. – 524с;
2. Сергеев В.И. Концептуальные подходы к проектированию и классификация логистических центров // Логистика и управление цепями поставок, 2019. № 4;
3. Best Practice Handbook for Logistics Centres in the Baltic Sea Region, 2019, www.neloc.net/reports/Best_Practice_Handbook.pdf;
4. Ieva Meidute, The development and perspectives of logistics centers in Lithuania, Vilnius Gediminas Technical University, 2018;
5. businesscontact.ge/ka/article.

The importance of international logistics centers

Ana Kurtanidze¹, Giorgi Evgenidze²

^{1, 2} Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Resume. *A complex of infrastructure facilities located in a local area, where integration and coordination processes are implemented, are logistics centers. In the 60s-90s of the 20th century, certain problems and trends emerged in the USA and Europe, the study of which became necessary in order to improve the processes of forming logistics centers of various formats.*

International experience shows that, from a micro and macroeconomic perspective, integrated logistics services provide maximum efficiency, during which, logistics companies (providers, operators), while moving and servicing material and commodity flows, provide a variety of complex logistics services.

Keywords: *logistics, transport infrastructure, logistics centers.*