ISSN 2029-9303
ISSN 2783-6215

Lietuvos
inžinerijos
kolegija

LIETUVOS INŽINERIJOS KOLEGIJA HIGHER EDUCATION INSTITUTION

INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS TECHNOLOGIJOS

Mokslinių straipsnių žurnalas

ENGINEERING AND EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

2026 m. Nr. 1

REDKOLEGIJA / EDITORIAL TEAM

Vyriausioji redaktorė/Editor-in-Chief

Doc. Dr. Lina Girdauskienė — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Vyriausiojo redaktoriaus pavaduotoja/ Deputy Editor-in-Chief

Doc. Dr. Esmeralda Štyps — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Redaktorių kolegija pagal mokslo kryptis/ Editorial team by scientific field

Inžinerijos mokslų kryptis/ Field of Engineering Sciences

Grupės vadovė/ Group leader

Doc. dr. Rosita Norvaišienė — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Nariai / Members:

Doc. dr. Raimondas Šadzevičius — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)* ORCID 0000-0002-7616-6598

Prof. Danutė Vaičiukynienė — Kauno technologijos universitetas | Kaunas University of technology (Lietuva/Lithuania) ORCID 0000-0001-8176-4413

Dr. Rasa Žygienė — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Doc. Dr. Daniele Fiaschi — Florencijos universitetas | University of Florence (Italija/Italy) ORCID 0000-0002-9704-3191

Prof. Dr. Wojciech Sas — Varšuvos gamtos mokslų universitetas | Warsaw University of Life Sciences (Lenkija/Poland) ORCID 0000-0002-5488-3297

Doc. Dr. Yuriy Biks, Vinnytsia — Ukrainos nacionalinis technikos Universitetas | National Technical University (Ukraina/ Ukraine) ORCID 0000-0002-5775-2014

Doc. Dr. Ali Can — Karabuk universitetas | Karabuk University (Turkija/Turkey)

Prof. Dr. Roy Knechtel — Šmalkaldeno taikomųjų mokslų universitetas | University of Applied Sciences Schmalkalden (Vokietija/Germany) ORCID 0000-0002-2272-6924

Prof. Dr. Liviu Marius Cirtina — Konstatntino Brankuši Universitetas Targy Jiu | Constantin Brâncuși University of Targu Jiu (Rumunija/Romania) ORCID 0000-0002-7319-3312

Aplinkos inžinerijos mokslų kryptis/ Field of Environmental Engineering Sciences

Grupės vadovė/ Group leader

Doc. dr. Vilda Grybauskienė — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Nariai / Members:

Dr. Vaidotas Lygis — *Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)* ORCID 0000-0001-5121-2052

Prof. Dr. Roman Rolbiecki — Gamtos mokslų universitetas Bydgozciuje | Bydgoszcz University of Science and Technology (Lenkija/Poland) ORCID 0000-0001-6230-4227

Prof. Dr. Givi Gavardashvili — Gruzijos technikos Universitetas | Mirtskhulava Water Management Institute of Georgian Technical University (Sakartvelas/Georgia) ORCID 0000-0001-5289-3830

Prof. Dr. Ulas Senyigit — Ispartos gamtos mokslų universitetas | Isparta University of applied sciences (Turkija/Turkey) ORCID 0000-0002-4864-0790

Doc. Dr. Inga Grinfelde	Latvijos gamtos mokslų ir technologijų universitetas | Latvia University of Life Sciences and Technologies (Latvija/Latvia) ORCID 0000-0002-3220-1777
Doc. Dr. Soleiman Mohammadi Limaei	Vidurio Švedijos Universitetas | Mid Sweden University (Švedija/Sweeden) ORCID 0000-0001-6379-6120
Barbara Baesso Moura	Žemės Ekosistemų tyrimų institutas | Research Institute on Terrestrial Ecosystems (Italija/Italy) Scopus ID: 57970655200
Assoc. Prof. Dr. Krystyna Kurowska	Varmijos ir Mazūrijos universitetas | University of Warmia and Mazury in Olsztyn (Lenkija/Poland) ORCID 0000-0002-1517-7402
Prof. Dr. Marija Hadzi-Nikolova	Goce Delčevo universitetas | Goce Delcev University (Šiaurės makedonija/North Macedonia) ORCID 0000-0003-1961-3838

Socialinių ir edukacinių mokslų kryptis/ Field of Social and Educational Sciences

Grupės vadovė/ Group leader

Doc. dr. Dalia Perkumienė	*Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*

Nariai / Members:

Doc. dr. Giedre Adomavičienė	*Lietuvos inžinerijos kolegija/ Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution (Lietuva/Lithuania)*
Doc. dr. Ieva Zemite	Latvijos kultūros akademija | Latvian Culture Academy (Latvija/Latvia) ORCID 0000-0003-4431-8603
Prof.dr. Ana Nikodinovska Krstevska	Goce Delcev Universitetas | Goce Decev University (Šiaurės Makedonija / North Macedonia) ORCID 0000-0003-1617-100X
Prof. dr. Ahmet Atalay	Ardahano universitetas | Ardahan University (Turkija/Turkey) ORCID 0000-0003-0263-1677
Prof. dr. Larbi Safaa	Cadi Ayyad Universitetas | Cadi Ayyad University (Marokas /Morocco)
Prof. dr. Antonio Silva Sánchez	Ekstramadūros universitetas | Universidad de Extremadura (Ispanija/Spain)
Prof. Maria Potes Barbas	Santarem politechnikos institutas | Polytechnic Institute of Santarém (Portugalija/Portugal) ORCID 0000-0001-8598-1650

Mokslinių straipsnių žurnalas „Inžinerinės ir Edukacinės technologijos“ (ISSN 2029-9303), leidžiamas Lietuvos inžinerijos kolegijos nuo 2012 m., yra įtrauktas į tarptautinių recenzuojamų mokslinių žurnalų Index Copernicus Journals Master List duomenų bazę.

Redaktorių kolegija sudaryta siekiant užtikrinti aukštą mokslinę kokybę, skaidrų recenzavimo procesą ir tarptautinį matomumą.

Žurnalas leidžiamas 2 kartus per metus.

Redakcijos adresas:
VšĮ Lietuvos inžinerijos kolegija
Tvirtovės al. 35, LT- 50155 Kaunas
Tel./faks. (8 37 308620)/(8 37 333120)
El. p. redaktorius@lik.tech
http://www.lik.tech

Editorial address:
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution
Tvirtovės av. 35, LT- 50155 Kaunas
Phone./fax. (+370 37 308620)/(+370 37 333120)
E-mail. redaktorius@lik.tech
http:// www.lik.tech

Visos leidinio leidybos teisės saugomos. Šis leidinys arba kuri nors jo dalis negali būti dauginami, taisomi ar kitaip platinami be leidėjo sutikimo.

All rights of the publication are reserved. No reproduction, copy or transmission of this publication may be made without publisher's permission.

© Lietuvos inžinerijos kolegija, 20265

ISSN 2029-9303
ISSN 2783-6215

REDAKTORIAUS ŽODIS

Gerbiami skaitytojai ir kolegos,

Mokslinių straipsnių žurnalo “Inžinerinės ir edukacinės technologijos” atnaujintoji redkolegija pristatydama Jums 2026 metų pirmąjį numerį, džiaugiasi, jog šį kartą į Jūsų rankas patenka atnaujintos struktūros mokslinių publikacijų leidinys, pristatantis originalius tyrimus ir taikomuosius darbus aplinkos inžinerijos, inžinerijos mokslų bei socialinių ir edukologinių mokslų kryptyse.

Aplinkos inžinerijos kryptis. Tyrimai atskleidė, kad klimato kaita ir spartėjantis gamtos išteklių eikvojimas sąlygoja poreikį pereiti prie mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančių ir energiją taupančių pastatų bei baterinio elektros energijos kaupiklio taikymo elektros suvartojimo kaštams optimizuoti. Nuotoliniais tyrimo metodais sudarytų erdvinių duomenų rinkinių tikslumas ir jų atitiktis stambaus mastelio topografinių planų rengimui UAS fotogrametrijos metodas laikytinas tinkamu tvirtų vietovės kontūrų taško erdvinės padėties nustatymui. Analizuojant melioracijos sistemas, pastebėta, kad nusidėvėjimas ir nepakankama priežiūra lemia vis dažniau pasitaikančias užmirkusių teritorijų problemas. Tiriant eksploatuojamų statinių gelžbetonines konstrukcijas, daugiausia dėmesio skiriama betonui.

Visuomeninio transporto sistemų efektyvumas ir tvarumas vis labiau priklauso nuo technologinių sprendimų, vairuotojų elgsenos ir jų tarpusavio sąveikos. Todėl efektyvus transporto sistemų valdymas reikalauja integruoto požiūrio, jungiančio technologinius sprendimus, vairuotojų elgsenos analizę ir duomenimis grįstą modeliavimą.

Inžinerijos mokslų kryptis. Vienas pagrindinių iššūkių, su kuriuo susiduria mažojo tipo bepiločius orlaivius valdantys pilotai operatoriai, yra gebėjimas skristi nenaudojant navigacinių sistemų, todėl papildoma piloto kamera gali užtikrinti tiek nenutrūkstamą įvairių užduočių vykdymą, tiek leidžia pilotui operatoriui sekti skrydžio maršrutą ir tokiu būdu vizualiai naviguoti orlaivį šveisiu paros metu. Adaptyviųjų technologijų, skirtų bepiločių orlaivių našumui gerinti, konstruktyvus pritaikymas išskiriamas kaip veiksnys, labiausiai prisidedantis prie našumo gerinimo ir efektyvių operacijų diapazono išplėtimo. Šis metodas yra veiksmingas kuriant naujos kartos bepiločius orlaivius.

Optimizuotas M-14P orlaivio variklio komponentų medžiagų charakteristikos parametrų vertinimo metodas įgalino susieti įspaudimo skersmenis su Brinelio kietumo vertėmis ir identifikuoti medžiagos tipą, nustatyti jos vientisumą, aptikti eksploatacinius pažeidimus bei pagrįsti sprendimų priėmimą, atliekant aviacijos komponentų patikrą. Eksperimentinis automobilio pakabos spyruoklių suspaudimo charakteristikų tyrimas, siekiant įvertinti jų standumą apkrovos sąlygomis, atliktas naudojant „LABA7 Spring Rate Tester Daily“ parodė, kad net ir santykinai nedideli spyruoklių standumo skirtumai gali lemti netolygų apkrovos pasiskirstymą galinėje ašyje, o tai gali neigiamai paveikti transporto priemonės stabilumą ir važiavimo komfortą. Dėl mechaninio stiprumo, formavimo, ilgaamžiškumo ir ekonomiškumo derinio plienuose austenito stabilumas įgalina padidinti stiprumą, tvirtumą, atsparumą dilimui ir nuovargio savybes. Nors pluošto armavimas žymiai padidina patvarumą, tai sumažina atsparumą dilimui ir padidina apdirbimo sudėtingumą ir tuo apriboja galimybę praktiniam pritaikymui. Šios įžvalgos suteikia praktinių gairių pasirinkant medžiagas, projektuojant patvarius minkštus roboto elementus.

Socialinių ir edukologinių mokslų kryptis. Nepaisant technologinės pažangos, žmogiškasis faktorius išlieka kritiniu sistemos elementu, kurio būklė tiesiogiai veikia eismo įvykių tikimybę. Todėl efektyvus saugos valdymas reikalauja integruoto požiūrio, apimančio darbo organizavimą, ergonomiką ir psichofiziologinės būklės stebėseną. Savarankiškam besimokantiems apie kompiuterių architektūrą ir mikroprocesorių funkcionalumą, reikia atsižvelgti į konstrukcinius ypatumus, instrukcijų rinkinį, adresuojamos atminties dydį, duomenų magistralės dydį ir kitas svarbias savybes. Pasiūlyta sistema, apimantis projektavimo filosofijas, gali būt nesunkiai plečiama ir modifikuojama bei gali būti skiriama kaip užduotis studentams.

Tikimės, kad įvairiapusiškai pristatomi tyrimų aspektai paskatins skaitytojus susidomėti publikacijomis, dėkojame straipsnių autoriams ir tikimės sėkmingo tolesnio bendradarbiavimo.

Su pagarba,
vyriausioji redaktorė dr. Lina Girdauskienė

TURINYS

APLINKOS INŽINERIJOS MOKSLŲ KRYPTIS **7**

SUSTAINABILITY AND ENERGY EFFICIENCY THROUGH FACADE-INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS 8
Esmeralda Štyps, Vilda Grybauskienė
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMOS TAIKYMAS ELEKTROS ENERGIJOS VARTOJIMUI OPTIMIZUOTI 15
Arnas Kapočius, Nerijus Paulauskas
Vilnius Tech

MANAGEMENT CHALLENGES OF UNFORMED STATE-OWNED LAND AT THE LOCAL LEVEL 25
Edita Abalikštienė, Eglė Juchnevič
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

NUOTOLINIŲ MATAVIMŲ TAIKYMO IŠMATUOTŲ TOPOGRAFINIŲ ERDVINIŲ DUOMENŲ TIKSLUMUI TYRIMAS 33
Giedrius Balevičius[1, 2], Vaiva Stravinskienė[1]
[1] Lietuvos inžinerijos kolegija, [2] VDU Žemės ūkio akademija

IDENTIFICATION AND COMPARISON OF WATERLOGGED AREAS IN DRAINED LAND USING DIFFERENT REMOTE SENSING METHODS 42
Daiva Gudritienė, Vilma Šalkauskienė
Lietuvos Inžinerijos Kolegija Higher Education Institution

LONG-TERM ANNUAL VARIABILITY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONCENTRATIONS AND ESTIMATED LOADS IN THE NEMUNAS RIVER DURING 2001 – 2024 51
Sinilga Černulienė, Jurgita Babilienė
Lietuvos Inžinerijos Kolegija Higher Education Institution

INVESTIGATIONS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED-CONCRETE SLABS USED FOR SLOPE PROTECTION AT FLUCTUATING WATER LEVELS 60
Raimondas Šadzevičius[1], Dainius Ramukevičius[1], Justyna Dzięcioł[2]
[1]Lietuvos inžinerijos kolegija Higher Education Institution,
[2]Warsaw University of Life Sciences (SGGW)

KELKRAŠČIO KONSTRUKCIJOS SPRENDINIAI IR JŲ ĮTAKA DANGOS STABILUMUI 68
Regina Motienė
Lietuvos inžinerijos kolegija

TECHNOLOGIJŲ, VAIRUOTOJŲ ELGSENOS IR MATEMATINIŲ MODELIŲ INTEGRACIJA VISUOMENINIO TRANSPORTO SISTEMOSE: SAUGOS IR APLINKOSAUGINIO EFEKTYVUMO VERTINIMAS 75
Albertas Šarinskas
Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

INŽINERIJOS MOKSLŲ KRYTIS **83**

ENVIRONMENTAL CHALLENGES OF FUTURE AERODYNAMICS 84
Audrius Jonušas
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

ADAPTIVE TECHNOLOGIES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES 90
Viktors Gutakovskis, Vladimirs Gudakovskis, Daniils Marcenko, Aleksandrs Kuzevanovs
Riga Technical University, Institute of Aeronautics, Space Engineering and Transport

BEPILOČIO ORLAIVIO PENGUIN MK 2.5 VTOL PILOTO KAMEROS IR NAUDINGOSIOS APKROVOS MODULIO DANGTELIO TEORINIO MODELIO TYRIMAS.....94
Morta Janutėnaitė, Esmeralda Štyps, Kęstutis Grigaliūnas
Lietuvos inžinerijos kolegija

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF METHODS FOR DECRYPTION AMBIGUITY REDUCTION IN PUBLIC-KEY CRYPTOSYSTEMS.....102
Petras Nefas, Rūta Jankūnienė
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF REAR SUSPENSION COIL SPRING STIFFNESS 113
Tomas Mickevičius
Lietuvos Inžinerijos Kolegija|Higher Education Institution

FORMATION AND TRANSFORMATION OF AUSTENITE AND THE ELIMINATION OF RETAINED AUSTENITE.....119
Artis Iesmins, Viktors Gutakovskis, Aleksandrs Okunevs
Riga Technical College, Latvia

PLGA NANOPLUOŠTŲ, PAGAMINTŲ ELEKTROVERPIMO METODU, PORĖTUMO VERTINIMAS TAIKANT SEM VAIZDŲ ANALIZĘ IR SKYSČIO IŠSTŪMIMO METODĄ 123
Andžela Šešok
Vilniustech

BRINELL HARDNESS EVALUATION AND MATERIAL VERIFICATION OF M-14P AIRCRAFT ENGINE VALVE GUIDES AND PISTON PIN.....128
Esmeralda Štyps, Valdas Speičys
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

PERFORMANCE AND FATIGUE ANALYSIS OF 3D-PRINTED TPU FOR SOFT ROBOTIC GRIPPER APPLICATIONS.....135
Aleksandrs Okunevs, Viktors Gutakovskis, Artis Iesmins
Riga Technical College

SOCIALINIŲ IR EDUKOLOGINIŲ MOKSLŲ KRYTIS 141

PROFESIONALIŲ VAIRUOTOJŲ DARBO SPECIFIKA VISUOMENINIAME TRANSPORTE: PSICHOFIZIOLOGINIŲ, ERGONOMINIŲ IR ORGANIZACINIŲ VEIKSNIŲ INTEGRUOTA ANALIZĖ SAUGOS KONTEKSTE 142
Albertas Šarinskas
Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

ANALYSIS AND DESIGN OF MICROPROCESSOR WORKBENCH ARCHITECTURE FOR EDUCATIONAL PURPOSES 155
Saulius Paukštė
Vilnius Gediminas Technical University

GOOGLE PASLAUGŲ DUOMENŲ OPTIMIZAVIMO PROGRAMA 167
Jurij Tekutov[1, 2, 3, 4], Julija Smirnova[1]
[1]Klaipėdos valstybinė kolegija, [2]Klaipėdos universitetas,
[3]SMK Aukštoji mokykla, [4]Lietuvos verslo kolegija

APLINKOS INŽINERIJOS MOKSLŲ KRYPTIS

SUSTAINABILITY AND ENERGY EFFICIENCY THROUGH FACADE-INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Esmeralda Štyps, Vilda Grybauskienė
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

Climate change and the accelerating depletion of natural resources highlight the need to transition toward low-carbon and energy-efficient buildings. Photovoltaic (PV) technologies play a central role in this shift, particularly in urban environments where building-integrated solutions can significantly reduce dependence on grid electricity. A structured methodology was developed based on publicly available solar resource datasets, building-specific analysis, PV system configuration, and performance modelling using PVGIS. Although initial amortization limits financial benefits during the first years, the overall payback period is estimated at 6–8 years, confirming the viability of façade-integrated PV as a sustainable solution for public sector buildings.

Key words: Photovoltaic (PV) technologies; PV system configuration and performance; amortization limits.

Introduction

In Europe, significant progress has been achieved in promoting sustainable and low energy buildings, largely driven by the continuously evolving regulatory framework established by the European Union. Key documents: including the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) [1] and the Renewable Energy Directive (RED II) [2] require that new and renovated buildings move toward nearly zero-energy performance by integrating on-site renewable energy sources and improving overall energy efficiency [3]. These measures are crucial as the building sector accounts for approximately 40% of total energy consumption and 36% of CO_2 emissions within the EU [4]. Lithuania follows the same strategic direction, aligning its national policies with long term EU climate-neutrality goals.

Over the past decades, photovoltaic (PV) technology has become one of the fastest-growing renewable energy sources globally. Its expansion is driven by the abundance of solar energy, decreasing technology costs, and continuous improvements in module efficiency [3]. However, the performance of PV systems strongly depends on local conditions solar irradiance, temperature, shading, and seasonal variability highlighting the need for detailed resource and site assessments prior to installation [5, 6]

The operation of PV modules is based on the photovoltaic effect occurring in semiconductor materials. In crystalline silicon cells, the energy band gap of approximately 1.1 eV [7] determines the photon energy required to generate charge carriers. Temperature changes significantly influence system performance: as module temperature increases, voltage decreases, ultimately reducing efficiency [8, 9]. Previous studies have also emphasized the importance of irradiance, series resistance, and shading, noting that their dynamic interactions determine real-world system behavior [10]. Modern performance modelling tools enable precise prediction of system output and support optimization of module orientation, tilt, and configuration [11].

The aim of this research is to design and evaluate a façade-integrated photovoltaic system capable of covering a significant share of an institutional building's electricity demand under Lithuanian climatic conditions.

Although no specific energy savings target is set, this research seeks to maximize the utilization of available solar energy to reduce electricity consumption from conventional sources. For the design and simulation of the system, IECO software will be used, which allows for evaluating the design and energy production of a photovoltaic system. Additionally, a comparison of the building's energy consumption with and without the photovoltaic system is planned to assess the benefits it may offer in terms of sustainability and efficiency.

Materials and methods

Photovoltaic technology forms the foundation of solar energy generation systems, which convert sunlight into electricity through the photovoltaic effect. This phenomenon occurs when photons from sunlight strike a semiconductor material (usually silicon), causing the movement of electrons and generating an electric current. This direct current (DC) can be converted to alternating current (AC) via an inverter and used to power electrical devices or be fed into the electrical grid.

The methodology for designing and evaluating the facade-integrated photovoltaic (PV) system was structured into four stages: (1) solar resource assessment, (2) façade suitability analysis and system configuration, (3) performance modelling, and (4) comparative analysis with institutional electricity consumption. This structure ensures transparency, reproducibility and consistency with established PV engineering practice.

Solar resource assessment. The first stage focused on determining the long-term solar potential of the installation site in Kaunas, Lithuania. Solar radiation and climatic variables were obtained from the Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), which provides validated monthly and hourly values of global horizontal irradiation (GHI), diffuse and direct components, and ambient temperature. To confirm the stability of irradiance patterns, PVGIS data were cross-checked against regional information from CAMS and the European Environment Agency, which are widely used in PV resource evaluations [4, 5, 6]. These datasets ensure that the modelling is grounded in robust, scientifically verified environmental inputs.

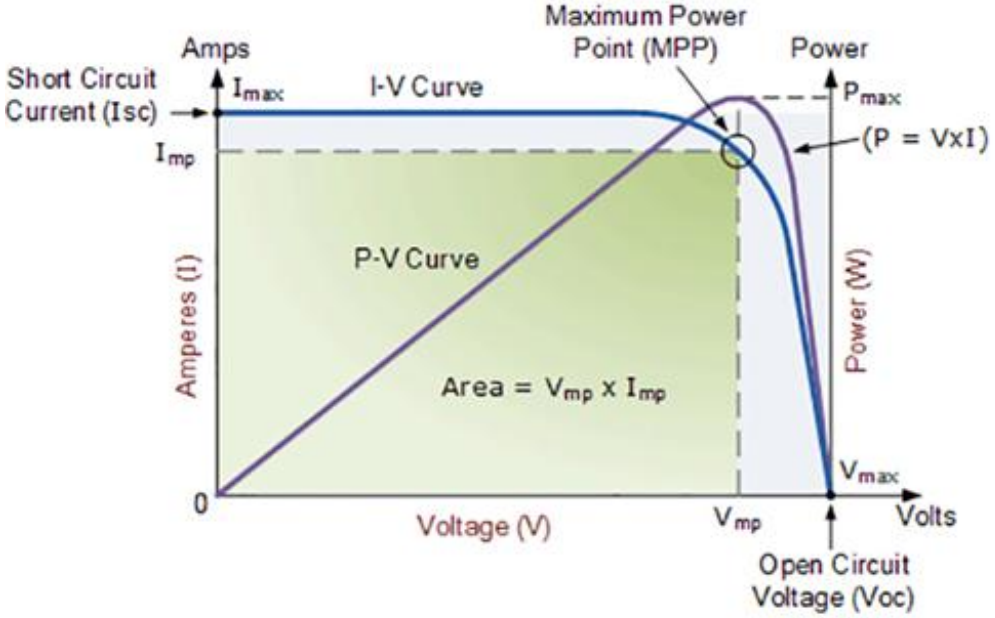


Fig. 1. Key Parameters of a Photovoltaic Module. Resources.
Source: [6]

The shape of the I-V curve (Fig. 1) varies according to solar irradiation and temperature. Higher irradiation shifts the curve toward a higher current, while an increase in temperature tends to reduce the voltage.

Facade assessment and system configuration. The second stage involved assessing the building facade to identify technically suitable areas for photovoltaic integration, noting that facade-integrated PV (FIPV) is a specific form of building-integrated PV (BIPV). The assessment considered facade orientation, usable surface dimensions, structural constraints, and potential shading. Shading analysis was performed using PVGIS horizon profiles and verified through geospatial inspection in Google Earth Pro, ensuring reproducibility based solely on publicly available tools [12, 13].

Based on the available facade area and expected irradiance, monocrystalline silicon modules were selected due to their high efficiency and favorable power-to-area ratio [10, 12]. Module characteristics-including nominal power, efficiency and thermal coefficient-were taken from publicly accessible manufacturer datasheets. Inverter selection followed European PV design principles, prioritizing devices with Euro-efficiency above 96% [5, 6].

Performance modelling. The third stage estimated the system's expected electricity generation. All simulation results were derived from the PVGIS performance engine, which includes established models for irradiance transposition, cell temperature, optical losses, electrical losses and long-term degradation [13]. IECO software was used only as a supplementary tool to inspect I–V (Figure 1) and evaluate shading sensitivity.

The presence of shadows or nearby buildings can significantly reduce energy generation. Partially shaded modules generate less current, impacting the overall system performance if modules are connected in series.

Standardized loss factors were applied in line with recognized international PV performance research. These included inverter losses (4–5%), temperature-related losses (7–12%), soiling (2–3%), mismatch (1–2%), cable losses (~2%) and an annual degradation rate of 0.5% [3]. These values reflect typical operational conditions for PV systems in European climates [5].

For a facade – roof - installation, like the Lietuvos inzinerijos kolegija Higher Education Institution in Kaunas (Fig. 2), fixed structures are often the best option due to the simplicity and spatial limitations of the setup.



Fig. 2. Panel installation on the roof of Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution
Source: created by authors

Comparative energy analysis. The final stage compared the modelled PV electricity generation with representative load profiles of institutional buildings. In the absence of on-site metering data, typical consumption trends were reconstructed using datasets from Eurostat, the Lithuanian Energy Agency, and the ENTSO-E Transparency Platform, which provide electricity use data for buildings of comparable type and size [11]. This comparison enabled the calculation of the self-consumption ratio, self-sufficiency ratio, reduction in grid electricity demand and avoided CO_2 emissions using EEA emission factors. The integration of open environmental datasets, publicly available technical specifications and validated modelling tools ensures full transparency and independent reproducibility of the methodological process.

Results

The performance of the façade-integrated photovoltaic (PV) system was evaluated using long-term solar resource datasets and PVGIS-based simulations. The PVGIS SARAH irradiance dataset indicates that Kaunas receives approximately 1,140 kWh/m²/year of global horizontal irradiation, forming the basis for system performance modelling [4, 5, 6]. Under these conditions, the 67.6 kW monocrystalline façade-mounted system is projected to generate 56,800–59,400 kWh per year, depending on annual climatic variability.

The monthly distribution of electricity generation reflects the characteristic seasonality of Baltic solar resources, with output peaking during late spring and summer and decreasing significantly during winter months. Table 1 summarises the modelled electricity generation for each month and the corresponding share of annual production.

Table 1

Monthly energy generation and monthly share of annual output.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Energy generated (kWh)	1150	1750	4300	6010	7500	8050	7820	6600	5100	3200	1800	9300
Monthly share of annual (%)	2,1	3,2	7,9	11,2	13,8	14,8	14,4	12,1	9,4	5,9	3,3	1,7

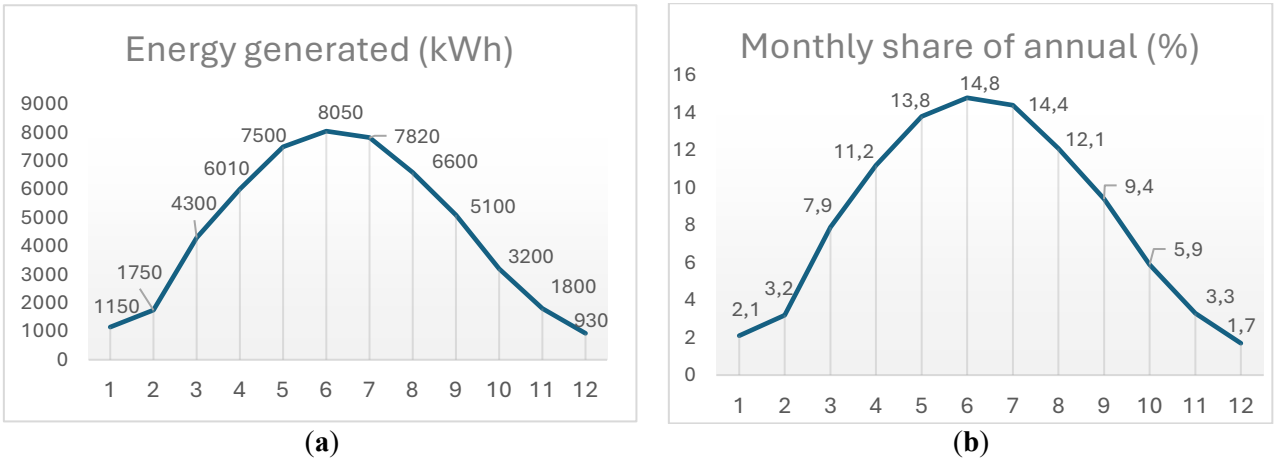


Fig.3. PV energy generation (kWh) and share of annual output: (**a**) Monthly energy output; (**b**) Monthly share of annual production.
Source: created by authors

Figure 3 provides a combined representation of monthly energy output and the monthly share of annual production. This visualization highlights the concentration of generation between May and August, as well as the substantially lower output during the winter period, consistent with the irradiance distribution patterns in the region [12, 13].

Based on the modelled annual generation, the facade-integrated system can supply approximately 40–42% of the expected annual electricity demand of a typical institutional building of comparable size [11]. Using EEA emission factors, the annual production corresponds to 27.8–29.2 tons of avoided CO_2 emissions, reflecting the environmental benefit of replacing grid electricity with locally generated renewable energy.

Photovoltaic systems use different types of panels based on the material and manufacturing process of their cells. Choosing the right type of panel is essential, as each type has unique characteristics in terms of efficiency, durability, and cost, which impact the overall system performance. The efficiency and performance of a photovoltaic system depend not only on the type of panel but also on the type of support structure used to mount the panels. Each type of panel and support structure offers advantages and limitations that should be considered based on the specific conditions of the project. For a facade installation (Figure 2), fixed structures are often the best option due to the simplicity and spatial limitations of the setup. In terms of panel type, monocrystalline silicon modules are recommended in this case, as they maximize efficiency and energy generation in a limited area.

Overall, the results confirm that the facade-integrated PV system provides a meaningful contribution to building electricity supply under Lithuanian climatic conditions, with predictable performance derived from validated irradiance datasets and standardized PVGIS modelling procedures. Finally, the modelling results confirm that facade-mounted PV systems can provide meaningful energy, environmental, and operational benefits even in regions with moderate solar resources.

The system maintains reliable performance characteristics, predictable seasonal behaviour, and favourable interaction with institutional load profiles—demonstrating its suitability for Lithuanian climatic conditions.

Discussions

The results of this study demonstrate that the façade-integrated photovoltaic (FIPV) system can achieve stable and regionally consistent performance under Lithuanian climatic conditions. The modelled annual electricity generation of 56,800–59,400 kWh corresponds well with long-term irradiance patterns derived from PVGIS and other validated European datasets [4, 5, 6]. This agreement indicates that the selected modelling approach is suitable for assessing PV performance in Baltic environments, where seasonal irradiance variations heavily influence annual output.

The seasonal distribution of electricity production is characteristic of northern latitudes, with a pronounced generation peak during late spring and summer and markedly reduced output in winter months. This pattern is consistent with the irradiance distribution incorporated in PVGIS simulations and verified through horizon-based shading analyses [12, 13]. Although winter performance is inherently low due to reduced solar altitude and shorter daylight duration, the façade orientation facilitates relatively effective

utilisation of diffuse irradiance during transitional months. This feature aligns with findings from studies evaluating vertical FIPV surfaces in similar temperate climates.

The applied system configuration-monocrystalline silicon modules combined with high-efficiency inverters-contributed to achieving yield levels within the expected range for façade-mounted systems. Loss factors used in performance modelling, including temperature-related, inverter, soiling, mismatch and cable losses, correspond to internationally recognised PV performance benchmarks [5]. The resulting loss structure supports the reliability of the estimated performance ratio and confirms that facade-mounted PV systems can perform comparably to conventional rooftop systems when high-quality components and well-oriented surfaces are used.

The comparison between PV generation and typical electricity consumption profiles of institutional buildings shows that the system can supply approximately 40–42% of annual demand [11]. This share is notable for a façade-integrated system, as such installations often face spatial limitations. Because institutional buildings primarily operate during daylight hours, a considerable portion of the generated energy can be consumed on-site, reducing the need for storage solutions. This alignment between generation and demand enhances the practical value of FIPV systems for public-sector facilities.

The estimated avoided emissions of 27.8–29.2 tonnes of CO_2 per year further underline the environmental benefits of integrating FIPV into existing building façades. When compared with electricity emission factors provided by the European Environment Agency, these reductions demonstrate the potential of medium-scale FIPV systems to meaningfully contribute to national decarbonisation efforts. Since the system relies on publicly accessible irradiance datasets, openly available technical specifications and validated modelling tools, the environmental and performance outcomes presented here can be independently verified and replicated.

The installation of a photovoltaic system in the Student Residence Hall in Kaunas brings numerous environmental and urban benefits, along with certain regulatory considerations.

1. Environmental Benefits: CO_2 Emission Reduction: By generating energy without direct emissions, the photovoltaic system significantly reduces the building's carbon footprint. It is estimated that a 67.58 kW system could reduce around 35 tons of CO_2 annually, supporting the EU's sustainability goals; Resource Conservation and Pollution Reduction: Solar energy use decreases reliance on fossil fuels and reduces air pollution, thereby improving urban quality of life and minimizing impact on natural resources; Sustainable Awareness: Integrating solar technology in a visible environment, such as a student residence, fosters a culture of sustainability and raises community awareness on responsible energy use.

2. Community and Urban Environment Impact:

Energy Resilience: Self-generated energy reduces dependency on the electrical grid, providing energy resilience during periods of high demand or price increases.

3. Legal and Regulatory Barriers in Kaunas: Installation Permits and Urban Planning Regulations: In Kaunas, a permit is required to install photovoltaic systems on façades, with reviews to ensure structural safety and visual impact, especially in protected areas; Safety and Efficiency Standards: European regulations mandate that photovoltaic systems meet quality and safety standards, particularly to withstand environmental conditions such as high winds; Financial Incentives: Lithuania and the EU offer grants and tax credits for renewable energy, which could help reduce installation costs and improve the project's feasibility.

Overall, the discussion highlights that façade-integrated PV represents a technically feasible, environmentally advantageous and operationally compatible solution for institutional buildings in Lithuania. The system's performance is supported by robust irradiance data, validated modelling methods and a configuration optimized for limited façade area. These findings align with broader trends in the adoption of BIPV technologies across Europe and support further exploration of facade-based renewable energy integration in public infrastructure.

Conclusions

The facade-integrated photovoltaic system demonstrated high technical suitability for Lithuanian climatic conditions.

Seasonal variability in solar resources results in higher summer generation. however, the system maintains stable performance during spring and autumn due to effective utilisation of diffuse irradiance. The system's strong alignment with institutional building load profiles results in a self-consumption ratio of 65–75%, enabling the PV installation to cover approximately 40% of annual electricity demand. This significantly reduces dependence on grid electricity and directly addresses the research objective of increasing on-site renewable energy generation.

PV installation on the façade enables the avoidance of 28–29 tonnes of CO_2 emissions per year, contributing to national and EU-level decarbonisation objectives and demonstrating the environmental benefits defined in the research tasks.

Economically, the estimated 6–8-year payback period confirms favourable investment potential. The findings show that façade-integrated PV offers a viable and sustainable solution for public-sector buildings, especially where roof space is limited or architectural constraints exist.

Photovoltaic systems are continually developing and improving, the only counter point is that a big amount of resources (in this case sun irradiation) are needed, and not all locations are good to carry out the installation.

References

1. European Commission. (2018). Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
2. European Commission. (2021). Renewable Energy Directive (RED II). https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
3. European Environment Agency. (2023). GHG emission factors: Electricity generation in the EU. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1
4. Jumare, I. A., Bhandari, R., & Zerga, A. (2020). Assessment of a decentralized grid-connected photovoltaic (PV)/wind/biogas hybrid power system in northern Nigeria. Energy, Sustainability and Society, 10(30). https://doi.org/10.1186/s13705-020-00260-7
5. Yadav, S. K., & Bajpai, U. (2020). Energy, economic and environmental performance of a solar rooftop photovoltaic system in India. International Journal of Sustainable Energy, 39(1), 51–66. https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1641499
6. Aprillia, H., Yang, H. T., & Huang, C. M. (2020). Short-term photovoltaic power forecasting using a convolutional neural network–salp swarm algorithm. Energies, 13(8), 1879. https://doi.org/10.3390/en13081879
7. International Energy Agency (IEA). (2023). Photovoltaic system performance and global PV trends. https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-2023/
8. Abdallah, R., Natsheh, E., Juaidi, A., Samara, S., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). A multi-level world comprehensive neural network model for maximum annual solar irradiation on a flat surface. Energies, 13(23), 6422. https://doi.org/10.3390/en13236422
9. Polo, J., Fernández-Peruchena, C., Salamalikis, V., Mazorra-Aguiar, L., Turpin, M., Martín-Pomares, L., ... & Remund, J. (2020). Benchmarking on improvement and site-adaptation techniques for modeled solar radiation datasets. Solar Energy, 201, 469–479. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.040
10. Diab, A. A. Z., Sultan, H. M., Do, T. D., Kamel, O. M., & Mossa, M. A. (2020). Coyote optimization algorithm for parameters estimation of various models of solar cells and PV modules. IEEE Access, 8, 111102–111140. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000770
11. Chung, M. H. (2020). Comparison of economic feasibility for efficient peer-to-peer electricity trading of PV-equipped residential house in Korea. Energies, 13(14), 3568. https://doi.org/10.3390/en13143568
12. Devetaković, M., Djordjević, D., Radojević, M., Krstić-Furundžić, A., Burduhos, B. G., Martinopoulos, G., ... & Lobaccaro, G. (2020). Photovoltaics on landmark buildings with distinctive geometries. Applied Sciences, 10(19), 6696. https://doi.org/10.3390/app10196696
13. Lumbreras, M., & Garay, R. (2020). Energy and economic assessment of façade-integrated solar thermal systems combined with ultra-low temperature district heating. Renewable Energy, 159, 1000–1014. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.019
14. Bonato, P., & Fedrizzi, R. (2020). Energy assessment of façade-integrated solar thermal collectors in multi-floor buildings. In EuroSun 2020 Conference Proceedings. https://proceedings.ises.org/conference/eurosun2020/papers/eurosun2020-0064-Bonato.pdf
15. Toledo, C., Gracia Amillo, A. M., Bardizza, G., Abad, J., & Urbina, A. (2020). Evaluation of solar radiation transposition models for passive energy management and building-integrated photovoltaics. Energies, 13(3), 702. https://doi.org/10.3390/en13030702
16. Goy, S., Maréchal, F., & Finn, D. (2020). Data for urban-scale building energy modelling: Assessing impacts and overcoming availability challenges. Energies, 13(16), 4244. https://doi.org/10.3390/en13164244

TVARUMAS IR ENERGIJOS VARTOJIMO EFEKTYVUMAS TAIKANT Į FASADĄ INTEGRUOTAS FOTOVOLTINES SISTEMAS

Santrauka

Klimato kaita ir spartėjantis gamtos išteklių eikvojimas formuoja poreikį pereiti prie mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančių ir energiją taupančių pastatų. Fotovoltinės (FV) technologijos vaidina pagrindinį vaidmenį šiame pokytyje, ypač miesto aplinkoje, kur į pastatus integruoti sprendimai gali gerokai sumažinti priklausomybę nuo tinklo elektros

energijos. Remiantis viešai prieinamais saulės išteklių duomenų rinkiniais, pastatų specifine analize, FV sistemos konfigūracija ir našumo modeliavimu naudojant PVGIS, buvo sukurta struktūrizuota metodika. Nors pradinė amortizacija riboja finansinę naudą pirmaisiais metais, bendras atsipirkimo laikotarpis yra 6–8 metai, o tai patvirtina, kad į fasadą integruotos FV yra tvarus sprendimas viešojo sektoriaus pastatams.

Reikšminiai žodžiai: Fotovoltinės (FV) technologijos; FV sistemos konfigūracija ir našumas; amortizacijos ribos.

ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMOS TAIKYMAS ELEKTROS ENERGIJOS VARTOJIMUI OPTIMIZUOTI

Arnas Kapočius, Nerijus Paulauskas
Vilnius Tech

Anotacija
Straipsnyje nagrinėjamas baterinio elektros energijos kaupiklio taikymas elektros suvartojimo kaštams optimizuoti. Sukurtas saulės jėgainės ir baterinio kaupiklio sistemos darbo optimizavimo matematinis modelis. Modelis įgyvendintas Python programavimo kalba, o optimizavimo uždavinys sprendžiamas taikant mišriųjų sveikųjų skaičių tiesinio programavimo (MILP) metodą. Aprašoma daugiakriterė tikslo funkcija, kuria maksimizuojamas kainų arbitražo pelnas ir saulės jėgainės pagamintos energijos suvartojimas. Atliekama metinių rezultatų analizė ir vertinama baterijos parametrų įtaka. Tyrimo metu nustatyta, kad santykinę ekonominę naudą reikšmingiausiai lemia baterijos C koeficientas.
Reikšminiai žodžiai: baterinis elektros energijos kaupiklis, matematinis optimizavimas, MILP, kainų arbitražas, daugiakriterė tikslo funkcija

Įvadas

Fotovoltinės (PV) ir vėjo jėgainės yra vienos iš pagrindinių technologijų, gaminančių elektros energiją Europos Sąjungos (ES) šalyse. Naujausių tyrimų duomenimis, ES 2024 metais 47,5 % bendros suvartojamos elektros energijos buvo pagaminta iš atsinaujinančių išteklių, iš kurių saulės ir vėjo jėgainės sudaro 61,4 % gamybos dalį (Eurostat, 2026). Vis dėlto iš 2025 metų birželio mėnesio statistinių duomenų apžvalgos matoma, kad tai buvo pirmasis mėnuo ES istorijoje, kai PV jėgainių pagaminta elektros energija buvo pagrindinis elektros energijos šaltinis (Eurostat, 2025b). Tradicinės elektros energijos tinklų sistemos nėra suprojektuotos prisitaikyti prie didelių tinklo apkrovos pasikeitimų, kuriuos sukelia saulės jėgainės ar vėjo elektrinės. Pastarieji elektros energijos šaltiniai yra nepastovūs dėl natūralios oro sąlygų kaitos, todėl elektros gamybos ir suvartojimo santykį tinkle sunku prognozuoti. Tokiu atveju vienas iš sprendimų yra sistemą stabilizuojantis elementas, pavyzdžiui, elektros energijos kaupiklis (toliau – EEK). Praktika rodo, kad energijos kaupimo sistemos integravimas yra geras sprendimas siekiant stabilizuoti tinklo įtampos lygį, užtikrinti galios perdavimo pastovumą. Sprendimo metodas yra tinklo perkrovos atveju saugoti energiją kaupimo sistemoje ir esant didesniam galios poreikiui iš pastarosios sistemos grąžinti reikalingą elektros energijos kiekį atgal į tinklą (Rey ir kt., 2023). Dėl šios priežasties, augant atsinaujinančių išteklių sugeneruotos energijos kiekiui, taip pat auga ir EEK paklausa. Remiantis statistiniais duomenimis prognozuojama, kad EEK paklausa ES iki 2030 metų sieks 200 GW ir iki 2050 metų – 600 GW įdiegtos galios (European Commission, s.a.).

Europos Sąjungoje industrijos sektorius išlieka didžiausiu elektros energijos vartotoju, todėl besikeičianti energetikos rinka skatina ištirti, kaip šio sektoriaus atstovai reaguoja į elektros kainų kintamumą bei pasiūlos nestabilumą. Elektros energija užima didžiausią dalį (33 %) ES industrijos suvartojamų energetikos produktų, todėl aukšta elektros kaina ir nestabilus tiekimas riboja konkurencingumą. Ši tendencija matoma lyginant statistinius duomenis ES ir kitų didžiausių pasaulio regionų (pvz., JAV ar Kinija), kurių vidutinės kainos industrijos vartotojams 2023–2024 metais buvo 45 % mažesnės (Eurostat, 2025a; IEA, 2025). Atsižvelgiant į elektros energijos paklausos augimą ES industrijos sektoriuje ir didėjantį poreikį suvaldyti tinklo nestabilumus, tokiems vartotojams siūloma remtis PV ir baterinių elektros energijos kaupiklių sistemos (toliau – BEEKS) technologijų kombinacija. Atlikti tyrimai įrodo, kad baterinė kaupiklio sistema gali būti panaudojama sprendžiant paklausos trūkumo problemas industrijos sektoriaus vartotojams (Heffron ir kt., 2020). Taip pat, priklausomai nuo rinkos, BEEKS gali būti gera investicija siekiant sumažinti elektros energijos suvartojimo kaštus. Europoje atliktas tyrimas parodė, kad tvarus BEEKS panaudojimas siekiant pelno kainų arbitražo principu yra pelningas 23 iš 25 tyrime nagrinėtų šalių, iš kurių pagal pelningumą pirmauja Rumunija, Latvija, Lietuva ir Estija (Shabani ir kt., 2025). Kita vertus, atsižvelgiant į Ispanijoje atlikto tyrimo rezultatus galima teigti, kad BEEKS panaudojimas PV gaminančių vartotojų atveju ne visada yra pelningas ir priklauso nuo šalyje galiojančių mokesčių įstatymų ir elektros kainos (Echevarría Camarero ir kt., 2023). Iš pateiktų tyrimų rezultatų matyti, kad BEEKS taikymas nėra universaliai pelningas sprendimas. Taigi, šiame darbe tiriamas baterinio elektros energijos kaupiklio darbo optimizavimas, siekiant sumažinti elektros energijos suvartojimo kaštus.

Tyrimo objektas – baterinio elektros energijos kaupiklio darbo optimizavimas.

Tyrimo tikslas – sukurti baterinio energijos kaupiklio darbo optimizavimo modelį saulės jėgainės ir baterinio kaupiklio sistemoje, atlikti metinių rezultatų analizę ir nustatyti baterijos parametrų įtaką.

BEEKS optimizavimo modelis

Tyrime nagrinėjamas matematinis modelis, skirtas optimizuoti baterinio elektros energijos kaupiklio veikimą sistemoje, kurią sudaro saulės jėgainė, apkrova, elektros tinklas ir baterinis kaupiklis. Modelis taikomas kitos dienos (angl. *day-ahead*) planavimo uždaviniui, kai žinomi arba prognozuojami PV generacijos, elektros energijos suvartojimo ir elektros kainų duomenys. Optimizavimo tikslas – surasti optimalų baterinio kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo grafiką, kuris sumažintų sistemos elektros energijos suvartojimo kaštus, atsižvelgiant į įvesties duomenis ir baterijos techninius parametrus.

Eksperimentams naudojamas įvesties duomenų rinkinys, apibūdinantis industrinio objekto elektros energijos suvartojimo profilį ir vidutinio pajėgumo saulės jėgainę. Daroma prielaida, kad objektas yra Lietuvoje, todėl elektros kainų duomenys pateikiami iš Nord Pool rinkos portalo (Nord Pool | Day-ahead prices, s.a.).

Tyrime nagrinėjama sistema apima saulės jėgainę, apkrovą, elektros tinklą ir baterinį elektros energijos kaupiklį. Baterijos įkrovimo ir iškrovimo grafikas priklauso nuo PV generacijos ir elektros energijos suvartojimo poreikio, todėl modelis turi įvertinti visus sistemos komponentus ir apribojimus. Optimizavimo modelis sudaro kitos dienos galios srautų pasiskirstymo planą tarp šių sistemos komponentų, siekiant sumažinti sistemos elektros energijos kaštus. Sprendimo kintamieji apibrėžia, kaip energijos suvartojimo poreikis padengiamas naudojant PV generaciją, elektros tinklą ir BEEKS (Zare Ghaleh Seyyedi ir kt., 2025).

Optimizavimo modelis apibrėžiamas fiksuotame diskretaus laiko horizonte, kuriame įvesties duomenys laikomi apibrėžtais. Sudarant kitos dienos veikimo planą neapibrėžti duomenys iš anksto prognozuojami ir modelyje naudojami kaip apibrėžti parametrai. Kiekviename laiko žingsnyje modelis suskaičiuoja galios srautų sprendimo kintamuosius ir atnaujina sistemos būsenos bei išvestinius kintamuosius. Kadangi baterijos įkrovimo būsena kiekviename momente priklauso nuo ankstesnių įkrovimo ir iškrovimo sprendimų, tai BEEKS veikimo plano sudarymo uždavinys yra susietas laike (Hu ir kt., 2021). Modelyje diskretaus laiko horizontas apibrėžiamas pagal 1 formulę, kai vieno laiko žingsnio trukmė yra 15 minučių, o visas laiko horizontas – 24 valandos.

$$t \in T = \{1, 2, \ldots, 96\},\ \Delta t = 0{,}25\,, \tag{1}$$

čia: t – laiko žingsnio indeksas, T – diskretaus laiko žingsnių aibė, Δt – vieno laiko žingsnio trukmė.

PV generuojama galia gali būti naudojama padengti apkrovos poreikį, įkrauti bateriją arba eksportuoti į tinklą. Modelyje taip pat įvertinama apribota PV generacija, kuri papildomai apmokestinama pagal nustatytą apribojimo baudą. Apkrovos poreikis padengiamas vietine PV generacija, baterijos iškrovimu arba importu iš elektros tinklo. Baterija įkraunama iš vietinės PV generacijos arba importu iš elektros tinklo, o iškraunama į apkrovą arba eksportui į tinklą. Modelio parenkami kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo galios srautai sumuojami išvestiniuose kintamuosiuose, kurie aprašomi atitinkamai 2 ir 3 formulėse.

$$p_t^{ch} = x_t^{PV,B} + x_t^{G,B},\ \forall t \in T\,, \tag{2}$$

$$p_t^{dis} = x_t^{B,L} + x_t^{B,G},\ \forall t \in T, \tag{3}$$

čia: p_t^{ch} – bendra baterijos įkrovimo galia, p_t^{dis} – bendra baterijos iškrovimo galia, $x_t^{PV,B}$ – galios srautas iš PV į bateriją, $x_t^{G,B}$ – galios srautas iš tinklo į bateriją, $x_t^{B,L}$ – galios srautas iš baterijos į apkrovą, $x_t^{B,G}$ – galios srautas iš baterijos į tinklą.

Bendra iš tinklo importuojama galia apskaičiuojama kaip galios srautų į apkrovą ir bateriją suma, kurios lygtis nurodoma 4 formulėje, o į elektros tinklą eksportuojama galia apskaičiuojama kaip PV generacijos ir baterijos galios srautų į tinklą suma, kurios lygtis nurodoma 5 formulėje.

$$g_t^{imp} = x_t^{G,L} + x_t^{G,B},\ \forall t \in T\,, \tag{4}$$

$$g_t^{exp} = x_t^{PV,G} + x_t^{B,G},\ \forall t \in T\,, \tag{5}$$

čia: g_t^{imp} – bendra importuojama galia, g_t^{exp} – bendra eksportuojama galia, $x_t^{G,L}$ – galios srautas iš tinklo į apkrovą, $x_t^{G,B}$ – galios srautas iš tinklo į bateriją, $x_t^{PV,G}$ – galios srautas iš PV į tinklą, $x_t^{B,G}$ – galios srautas iš baterijos į tinklą.

Remiantis moksline literatūra, optimizavimo modelyje baterijos talpos nusidėvėjimą galima aprašyti supaprastinta tiesine priklausomybe nuo baterijos iškrovos. LFP baterijų pelningumo tyrime teigiama, kad

talpos degradaciją laiko žingsnyje galima apskaičiuoti bendros iš baterijos iškrautos energijos ir nustatyto nusidėvėjimo koeficiento sandauga (Wankmüller ir kt., 2017). Nusidėvėjimo kaštai skaičiuojami supaprastinta tiesine išraiška (6 formulė). Priimta, kad baterijos 1 kWh talpos kaina yra 300 Eur.

$$c_{deg} = \alpha \cdot C_E = 2{,}71 \cdot 10^{-5} \cdot 300 = 0{,}00813$$

$$C_{deg} = c_{deg} \cdot \sum_{t \in T} p_t^{dis} \Delta t\,, \quad (6)$$

čia: c_{deg} – nusidėvėjimo kaštai vienam iškrautos energijos vienetui, α – nusidėvėjimo koeficientas, C_E – 1 kWh baterijos talpos kaina, C_{deg} – bendri nusidėvėjimo kaštai, p_t^{dis} – bendra baterijos iškrovimo galia.

Tikslo funkcija apibrėžia, pagal kokius kriterijus modelis ieško optimalaus lygties sprendimo. Modelyje taikoma daugiakriterė tikslo funkcija, kurioje maksimizuojamas kainų arbitražo pelnas ir PV pagamintos energijos suvartojimas. Tikslo funkcijoje taikomi svoriai, skatinantys modelį išnaudoti PV pagamintos energijos perteklių, taip pat įvertinami ir baterijos nusidėvėjimo kaštai (7 formulė).

$$J_{arb} = \sum_{t \in T} C_t g_t^{exp} \Delta t - \sum_{t \in T} C_t g_t^{imp} \Delta t - c_{curt} \sum_{t \in T} x_t^{PV,C} \Delta t - C_{deg}$$

$$J_{pref} = w_{B,L} \sum_{t \in T} x_t^{B,L} \Delta t + w_{PV,B} \sum_{t \in T} x_t^{PV,B} \Delta t - w_{B,G} \sum_{t \in T} x_t^{B,G} \Delta t$$

$$max\, J_{hyb} = J_{arb} + J_{pref}\,, \quad (7)$$

čia: J_{arb} – kainų arbitražo dedamoji, J_{pref} – galios prioritetų dedamoji, J_{hyb} – daugiakriterė tikslo funkcija, C_t – elektros kaina, g_t^{exp} – eksportuojama galia, g_t^{imp} – importuojama galia, c_{curt} – PV apribojimo bauda, $x_t^{PV,C}$ – apribota PV galia, C_{deg} – nusidėvėjimo kaštai, $w_{B,L}$, $w_{PV,B}$, $w_{B,G}$ – galios srautų svoriai.

Modelio apribojimai apibrėžia sistemos galios srautų ribas, baterijos technines ribas ir kitus sistemos veikimo limitus. Taikant apribojimo taisyklę, modelis užtikrina, kad PV gaminama energija pirmiausia priskiriama suvartojimui. Baterijos veikimas ribojamas maksimaliomis įkrovimo ir iškrovimo galiomis ir baterijos įkrovos (SOC) ribomis, o tinklo lygmenyje gali būti taikomos importo ir eksporto galios ribos. Modelyje taikomi apribojimai taip pat užtikrina, kad tame pačiame laiko žingsnyje nebūtų įkraunama ir iškraunama baterija, nevyktų importas ir eksportas tinklo lygmenyje. Dėl šios priežasties optimizavimo modelyje taikoma MILP formuluotė, kurioje galima tokius apribojimus aprašyti dvejetainiais kintamaisiais.

BEEKS optimizavimo modelio programai sukurti pasirinkta Python programavimo kalba. Python pasirinkta dėl to, kad jos ekosistemoje yra daug atvirojo kodo bibliotekų, skirtų duomenų apdorojimui, skaitiniams skaičiavimams ir rezultatų vizualizavimui. Naudojant CVXPY biblioteką programinėje aplinkoje aprašomi optimizavimo modelio kintamieji, tikslo funkcija ir apribojimai pagal MILP formuluotę. CVXPY biblioteka suderinama su daugeliu standartinių uždavinių sprendimo programų, o tyrime optimizavimo uždavinys sprendžiamas HiGHS programa.

Sudaryta eksperimentų grupė skirta metinio laikotarpio rezultatams įvertinti, kai modelis optimizuoja baterijos darbą kiekvieną metų dieną, o rezultatai lyginami tarp visų pasirinktų BEEKS parametrų konfigūracijų. Eksperimentai skirti įvertinti metinius ekonominius, techninius rezultatus bei sąsajas tarp baterijos techninių parametrų ir rezultatų. Vertinami pagrindiniai rodikliai: baterijos ekonominė nauda (9 formulė), baterijos ekonominė nauda per panaudojamą baterijos talpos vienetą, baterijos talpos nusidėvėjimas, išvengti importo kaštai (8 formulė).

$$R_{exp},B = \sum_{t \in T} C_t x_t^{B,G} \Delta t$$

$$C_{imp},B = \sum_{t \in T} C_t x_t^{G,B} \Delta t$$

$$C_{avoid} = \sum_{t \in T} C_t x_t^{B,L} \Delta t\,; \quad (8)$$

$$P_{net} = R_{exp},B + C_{avoid} - C_{imp},B - C_{deg}\,, \quad (9)$$

čia: $R_{exp,B}$ – baterijos eksporto pajamos, $C_{imp,B}$ – baterijos įkrovimo iš tinklo kaštai, C_{avoid} – išvengti importo kaštai, P_{net} – baterijos ekonominė nauda, C_t – elektros kaina, $x_t^{B,G}$ – galios srautas iš baterijos į tinklą, $x_t^{G,B}$ – galios srautas iš tinklo į bateriją, $x_t^{B,L}$ – galios srautas iš baterijos į apkrovą, C_{deg} – nusidėvėjimo kaštai.

Tyrime naudojami BEEKS įvesties duomenys parinkti taip, kad baterijų konfigūracijos skirtųsi pagrindinėmis techninėmis savybėmis: talpa, įkrovimo ir iškrovimo galia, galios-talpos santykiu (kitaip vadinama C koeficientu) ir leistinu iškrovimo gyliu. Eksperimentuose analizuojamos baterijos pateikiamos 1 lentelėje ir eksperimentuose vadinamos pagal lentelėje nurodytą identifikatorių. Svarbu paminėti, kad eksperimentų metu numatytoji pradinė baterijos įkrova yra 50 % nominalios talpos.

1 lentelė

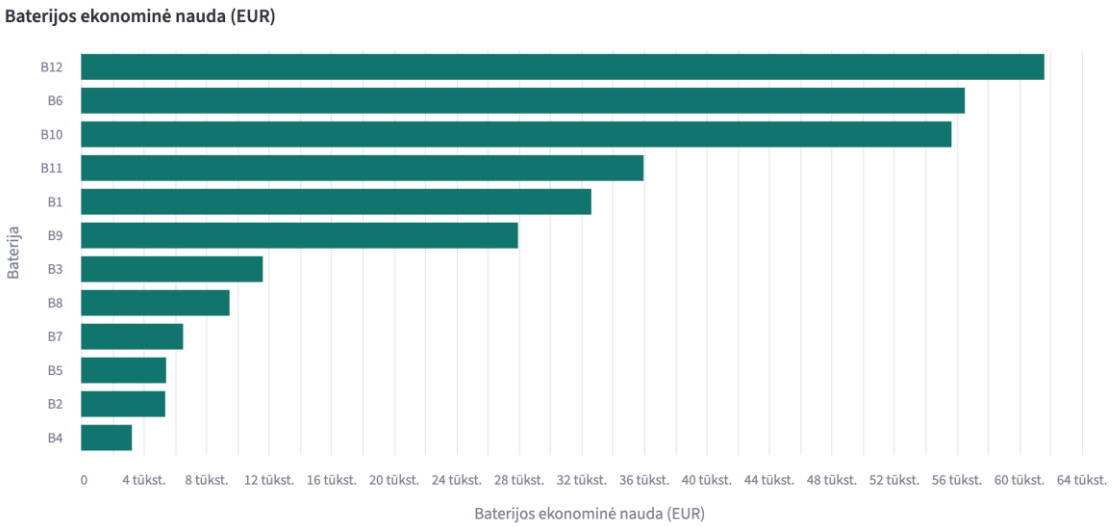
Tyrime nagrinėjamos BEEKS parametrų konfigūracijos

Baterijos ID	Talpa (kWh)	Įkrovimo galia (kW)	Iškrovimo galia (kW)	Efektyvumas	DOD	C koeficientas
B1	760	380	380	0,900	0,90	0,500
B2	120,5	50	50	0,920	0,90	0,415
B3	261,2	130,6	130,6	0,900	0,95	0,500
B4	72,3	30	30	0,920	0,90	0,415
B5	144,6	30	30	0,920	0,90	0,207
B6	1410,73	500	500	0,900	0,90	0,354
B7	216,9	30	30	0,900	0,95	0,138
B8	200,7	187,5	187,5	0,900	0,90	0,934
B9	602,1	500	500	0,900	0,90	0,830
B10	1204,2	1000	1000	0,900	0,90	0,830
B11	677	500	500	0,978	1,00	0,739
B12	1129	1000	1000	0,978	1,00	0,886

Šaltinis: sudaryta autorių remiantis oficialiomis BEEKS techninėmis specifikacijomis

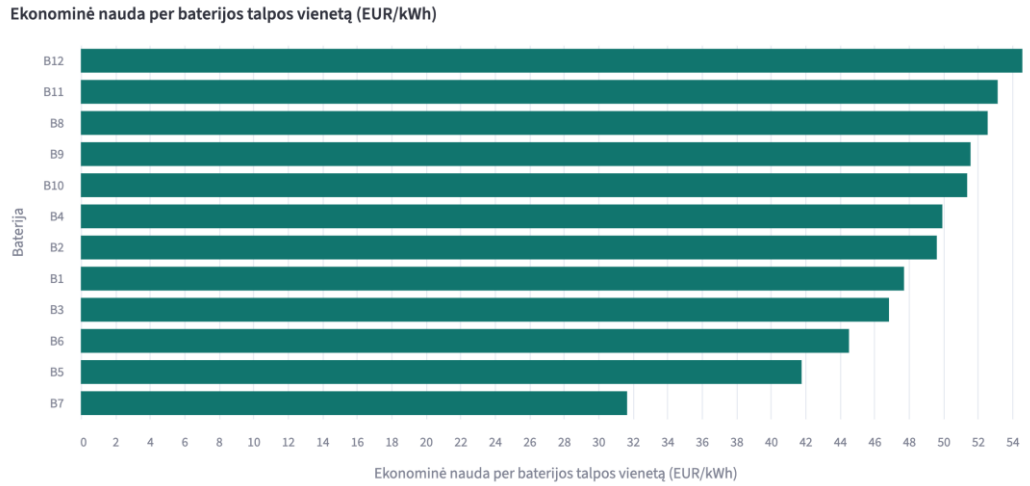
Baterijų parametrų įtakos metiniams optimizavimo rezultatams analizė

Eksperimento tikslas – objektyviai įvertinti modelio apskaičiuotą baterijų ekonominę naudą ir atlikti baterijos parametrų jautrumo analizę. Eksperimentas atliekamas 2025–2026 m. laikotarpiu, naudojant 1 lentelėje nurodytas baterijų konfigūracijas. Baterijų ekonominės naudos lyginamoji analizė atliekama atsižvelgiant į santykinį rodiklį – baterijos ekonominę naudą per baterijos talpos vienetą. Šis rodiklis įvertina baterijos ekonominį naudingumą nepriklausomai nuo talpos dydžio, todėl yra objektyvus vertinimo rodiklis. BEEKS optimizavimo skaičiavimai atliekami kiekvieną metų laikotarpio dieną 24 valandų horizonte, o galutiniai rezultatai skaičiuojami sumuojant. Baterijų ekonominės naudos rezultatai pateikiami 1 paveiksle, o ekonominės naudos per talpos vienetą rezultatai – 2 paveiksle.



1 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – baterijos ekonominė nauda
Šaltinis: sudaryta autorių

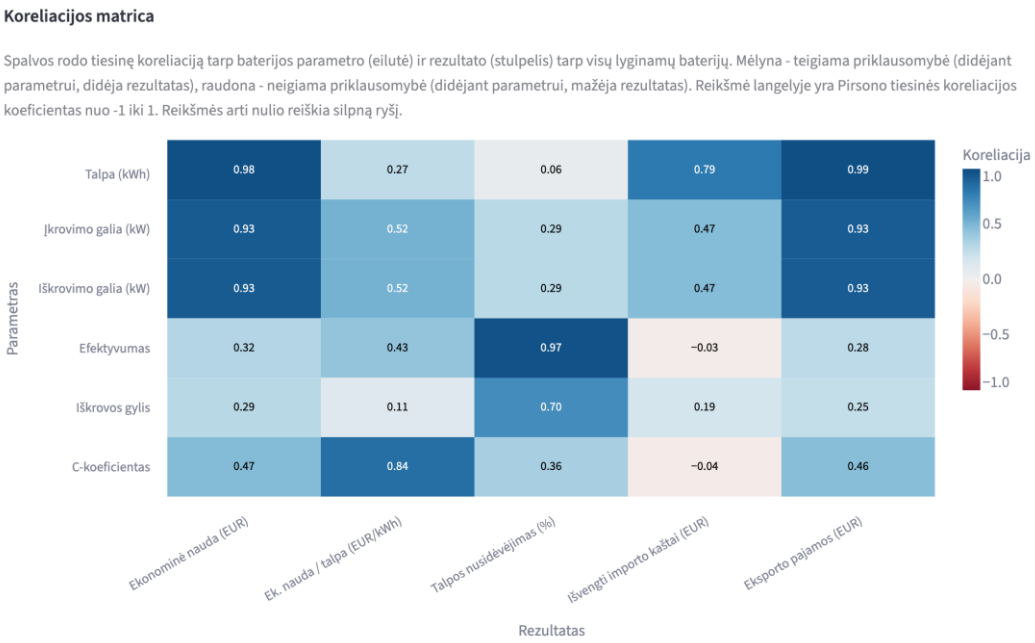
Grafikuose vaizduojami kiekvienos baterijos ekonominio naudingumo rodikliai, išrikiuoti nuo didžiausios iki mažiausios vertės.



2 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – baterijos ekonominė nauda per talpos vienetą
Šaltinis: sudaryta autorių

Atsižvelgiant į baterijos ekonominės naudos grafiką matoma tendencija, kad didesnės baterijos bendrai sugeneruoja daugiau naudos. Kaip matyti iš pateiktų grafikų, baterija B12 iš viso sugeneravo daugiausia metinės ekonominės naudos – 61 615,57 Eur. Taip pat baterija B12 vertinama kaip objektyviai naudingiausia, kai metinė ekonominė nauda per talpos vienetą buvo 54,58 Eur/kWh. Verta pažymėti, kad baterija B6 yra antra pagal sugeneruotą metinę ekonominę naudą (56 354 Eur), tačiau pagal santykinį metinės ekonominės naudos rodiklį yra viena iš žemiau reitinguojamų baterijų, kai rezultatas buvo 44,52 Eur/kWh. Kaip matyti iš tyrime nagrinėtų konfigūracijų lentelės, ši baterija yra didžiausia iš visų nagrinėjamų, todėl galima pastebėti, kad baterijos talpa nebūtinai yra svarbiausias baterijos parametras, kai vertinamas santykinis ekonominis naudingumas. Prasčiausią metinės santykinės ekonominės naudos rezultatą pasiekė baterija B7, kai rezultatas buvo 31,66 Eur/kWh. Kita vertus, baterija B4, kurios metinės ekonominės naudos rezultatas buvo mažiausias (3 249,51 Eur), pagal metinės santykinės ekonominės naudos vertinimą yra reitingo viduryje, kai rezultatas buvo 49,94 Eur/kWh.

Atsižvelgiant į tyrime nagrinėtų baterijų konfigūracijų parametrus, galima pastebėti, kad didžiausią C koeficientą turi baterija B12, o mažiausią baterija B7. Šis išsidėstymas sutampa su santykinės ekonominės naudos rezultatų reitingu, todėl pirminė rezultatų analizė leidžia daryti prielaidą, kad didesnis C koeficientas gali būti susijęs su didesniu santykiniu ekonominiu baterijos naudingumu. Baterijos parametrų įtaka skirtingiems rezultatų rodikliams toliau pateikiama 3 paveiksle, kuriame atvaizduojama koreliacijos matrica tarp baterijos parametrų ir rezultatų rodiklių, kai koreliacijos santykis vertinamas Pirsono koeficientu.

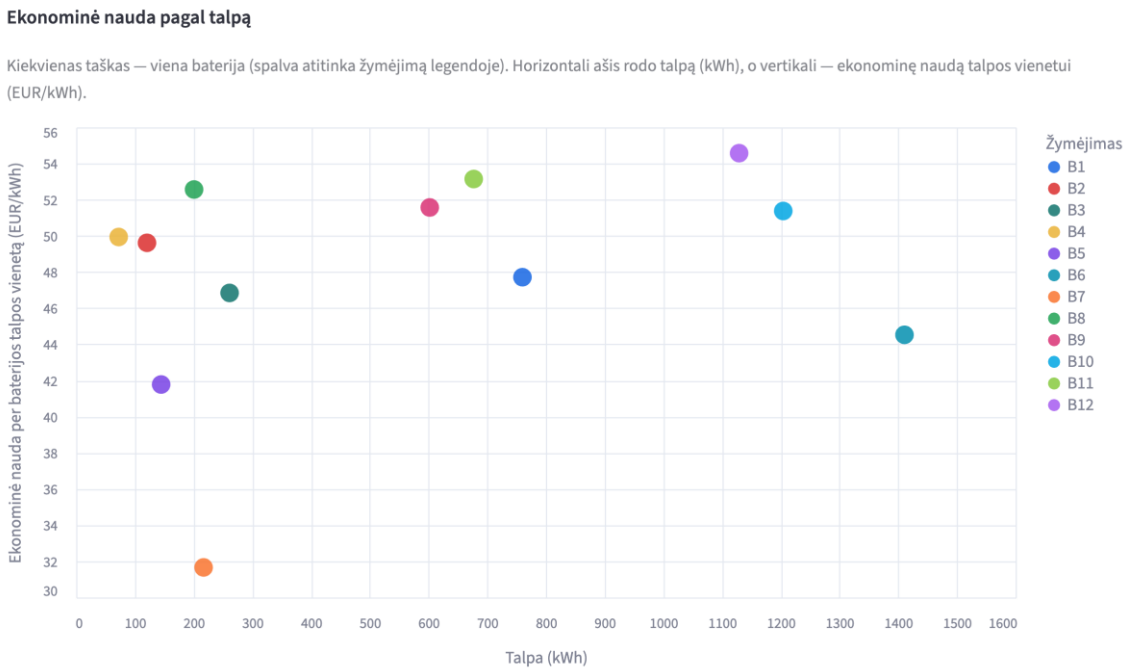


3 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – baterijos parametrų koreliacijos matrica
Šaltinis: sudaryta autorių

Analizuojant koreliacijos matricos rezultatus, galima pastebėti, kad baterijos ekonominė nauda per talpos vienetą turi stiprią statistinę tendenciją didėti, kai yra aukštos C koeficiento, baterijos įkrovimo galios ir iškrovimo galios vertės. Šiuo atveju santykinės ekonominės naudos ir C koeficiento koreliacijos koeficientas yra 0,84. Čia galima daryti išvadą, kad objektyvus baterijos ekonominis naudingumas didėja, kai baterija gali būti greitai įkraunama ar iškraunama, nes tai leidžia greitai reaguoti į momentinius elektros kainos svyravimus. Kita vertus, talpos koreliacijos koeficientas su objektyviu ekonominiu naudingumu yra tik 0,27, todėl tai patvirtina išvadą, kad didelė baterijos talpa nelemia objektyviai didelės ekonominės naudos. Pagal koreliacijos matricą didėjanti talpa siejama su išvengiamais importo kaštais, kai koreliacijos koeficiento vertė yra 0,79, o galia šiuo atveju neturi labai didelės įtakos. Todėl galima daryti išvadą, kad didesnės talpos baterija su vidutiniais galios parametrais tinkama taikyti kartu su saulės jėgaine, kai tikslas yra sumažinti objekto elektros energijos importo išlaidas. Vis dėlto talpos koreliacija su ekonomine nauda siekia 0,98, o tai rodo, kad talpa yra pagrindinis absoliučią ekonominę naudą lemiantis veiksnys. Didelės talpos ir galios baterija į tinklą gali iškrauti daugiau energijos didžiausios kainos laikotarpiu, todėl baterijos talpa ir iškrovimo galia yra svarbiausi eksporto pajamas lemiantys parametrai. Tai papildomai patvirtina beveik identiškos ekonominės naudos ir eksporto pajamų koreliacijos koeficientų vertės.

Pirsono koreliacijos koeficientų matricoje matomas teigiamas iškrovimo gylio ir talpos nusidėvėjimo ryšys – koreliacijos koeficientas lygus 0,70. Optimizavimo modelyje šis statistinis ryšys pasireiškia per baterijos naudojimo intensyvumą. Tai patvirtina ir baterijos efektyvumo bei talpos nusidėvėjimo koreliacijos koeficientas, siekiantis 0,97. Šis ryšys modelyje yra netiesioginis, nes optimizatorius efektyvesnes baterijas eksploatuoja intensyviau. Kiekvienas efektyvios baterijos ciklas uždirba didesnę ekonominę naudą, todėl išauga bendra energijos pralaida, o kartu su pralaida ir susijęs talpos nusidėvėjimas.

Apibendrinant koreliacijos matricos rezultatus matyti, kad baterijos parametrų svarba priklauso nuo vertinamo rodiklio. Talpa daro reikšmingiausią įtaką absoliučiai ekonominei naudai, tačiau objektyvus ekonominis naudingumas labiausiai priklauso nuo baterijos C koeficiento. Siekiant nustatyti, kuri baterijos konfigūracija generuoja geriausią galutinį rezultatą, toliau nagrinėjamas baterijų konfigūracijų išsidėstymo grafikas (4 paveikslas) pagal objektyvų ekonominį naudingumą ir talpą.

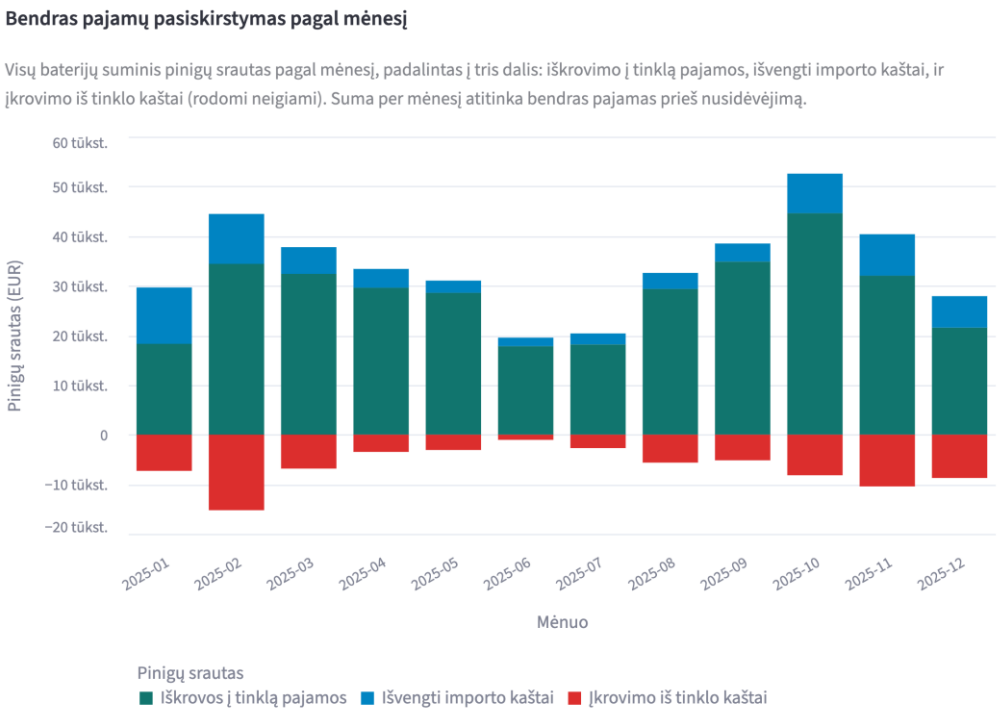


4 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – baterijų ekonominio naudingumo išsidėstymo grafikas
Šaltinis: sudaryta autorių

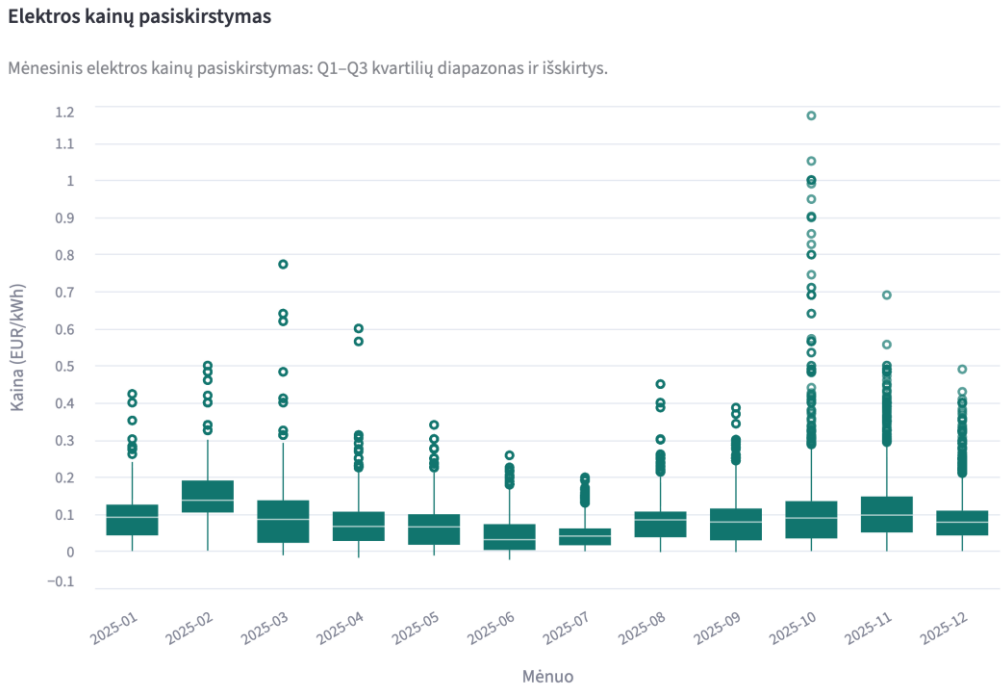
Iš grafiko pavaizduotų rezultatų matyti, kad baterijos B12 ir B10 turi geriausią objektyvios ekonominės naudos ir talpos santykį. Galima teigti, kad šių baterijų galios ir talpos parametrų santykis leidžia optimizavimo modeliui efektyviai išnaudoti elektros kainų svyravimus. Priešingai, žemesnėje ekonominio naudingumo skalės pusėje galima matyti baterijas B7 ir B5, kurių C koeficientai yra mažiausi iš visų tyrime nagrinėtų baterijų. Šie rezultatai patvirtina išvadą, kad baterijos galios-talpos santykis (C koeficientas) yra reikšmingiausias santykinio ekonominio naudingumo veiksnys.

Sezoniškumo įtakos metiniams optimizavimo rezultatams analizė

Eksperimento tikslas – įvertinti modelio apskaičiuotą baterijų ekonominę naudą ir nustatyti sezoniškumo įtaką rezultatams. Eksperimentas atliekamas 2025–2026 m. laikotarpiu, naudojant visas tyrime nagrinėtas baterijų konfigūracijas. Suminiai mėnesiniai pinigų srautai pateikiami 5 paveiksle, o elektros kainų pasiskirstymas – 6 paveiksle.



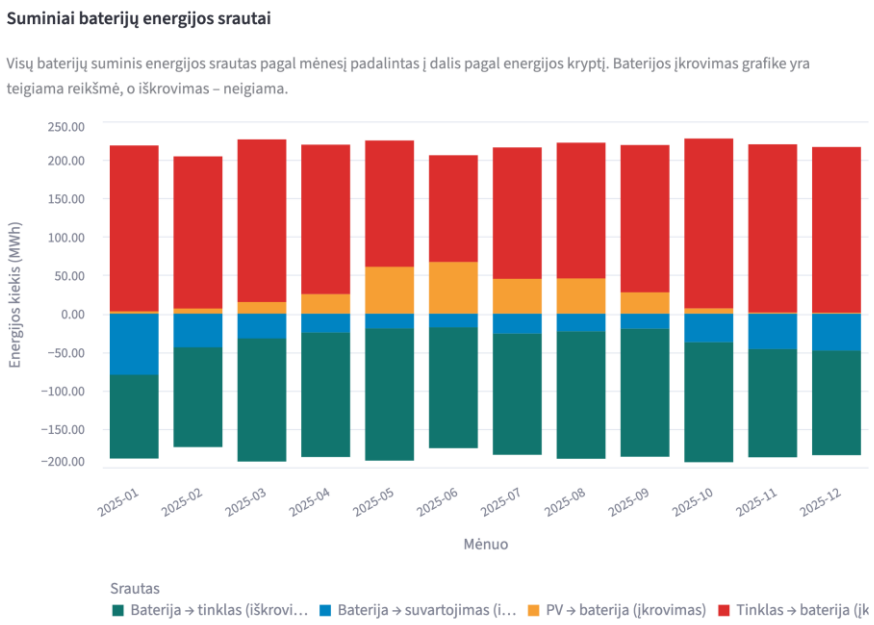
5 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – suminiai pinigų srautai pagal mėnesį
Šaltinis: sudaryta autorių



6 pav. Elektros kainų pasiskirstymas 2025–2026 m. laikotarpiu
Šaltinis: sudaryta autorių

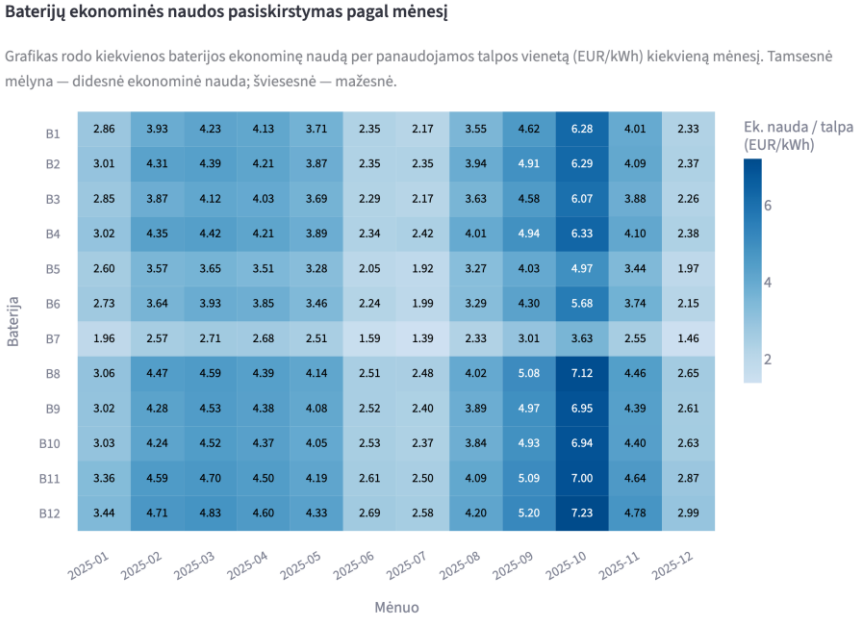
Kaip matoma iš mėnesinio pinigų srautų grafiko, daugiausia pajamų sugeneruota spalį, vasarį ir lapkritį, tačiau šie mėnesiai pasižymi ir aukštesniais įkrovimo iš tinklo kaštais. Visais mėnesiais didžioji dalis pajamų sugeneruota iškraunant bateriją į tinklą, todėl galima daryti išvadą, kad baterija ekonomiškai naudingiausiai veikia vykdant kainų arbitražą. Svyruojant elektros kainai apsimoka vykdyti kainų arbitražą,

nes kainų skirtumai yra pakankamai dideli, kad padengtų nusidėvėjimo ir įkrovimo iš tinklo kaštus. Kita vertus, birželio ir liepos mėnesiais užfiksuotos mažiausios pajamos ir mažiausi įkrovimo iš tinklo kaštai. 6 paveiksle pateikiamas kainų pasiskirstymo grafikas rodo, kad šiltuoju metų laiku sumažėja paros kainų svyravimas, o šaltuoju metų laiku matomas priešingas efektas. Didžiausi kainų svyravimai pastebimi spalio, lapkričio ir kovo mėnesiais, o mažiausi – birželio ir liepos mėnesiais.



7 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – suminiai baterijų energijos srautai
Šaltinis: sudaryta autorių

Suminių baterijų energijos srautų grafikas, pateiktas 7 paveiksle, rodo tolygų įkraunamos ir iškraunamos energijos pasiskirstymą visame metų laikotarpyje, tačiau sugeneruotos pajamos skiriasi būtent dėl kainų svyravimo. Verta pažymėti, kad daugiausia importo kaštų išvengta gruodžio, sausio ir vasario mėnesiais, kai saulės jėgainės generuoja mažiau energijos, todėl modelis dažniau parenka iškrauti bateriją į suvartojimą kainų piko metu, pakeičiant brangų importą iš tinklo. Kita vertus, 7 paveiksle matoma, kad šiltuoju metų laiku PV generacijos perteklius gali būti panaudojamas įkrauti bateriją, todėl birželio ir liepos mėnesiais baterijos importo sąnaudos yra mažiausios, lyginant su kitais mėnesiais. Baterijų ekonominės naudos pasiskirstymas pagal mėnesius pateikiamas 8 paveiksle.



8 pav. Eksperimento metiniai rezultatai – baterijų ekonominės naudos pasiskirstymas pagal mėnesį
Šaltinis: sudaryta autorių

8 paveiksle pateiktas baterijų ekonominės naudos pasiskirstymo grafikas patvirtina, kad visų baterijų ekonominė nauda buvo didžiausia rugsėjo ir spalio mėnesiais, o mažiausia – birželio ir liepos mėnesiais. Taigi eksperimento rezultatai leidžia daryti išvadą, kad PV ir BEEKS sistemos ekonominė nauda yra reikšmingai priklausoma nuo metų laiko.

Išvados

1. Sukurtas ir programiškai realizuotas BEEKS optimizavimo modelis, įvertinantis PV generaciją, objekto elektros energijos suvartojimą, elektros kainas, baterijos techninius parametrus (talpą, įkrovimo ir iškrovimo galią, naudingumo koeficientą, leistiną iškrovimo gylį), tinklo apribojimus ir baterijos talpos nusidėvėjimą. Modelis formuluojamas taikant MILP metodą kitos dienos laiko horizonte su 15 minučių laiko žingsniu. Programinė realizacija įgyvendinta Python aplinkoje, naudojant CVXPY aprašyti optimizavimo uždavinį ir HiGHS sprendimo programą jam spręsti. Sukurta daugiakriterė tikslo funkcija maksimizuoti kainų arbitražo pelną ir vietinės PV pagamintos energijos suvartojimą. Baterijos talpos nusidėvėjimas modeliuojamas taikant tiesinę priklausomybę nuo bendros iškrautos energijos pralaidos. Taip pat priimta, kad baterijos 1 kWh talpos kaina yra 300 Eur.
2. Baterijų parametrų įtakos metiniams optimizavimo rezultatams analizėje nustatyta, kad pagrindinis ekonominę naudą per talpos vienetą lemiantis veiksnys yra baterijos galios ir talpos santykis (C koeficientas). Aukštas C koeficientas leidžia bateriją greitai įkrauti ir iškrauti, todėl optimizavimo modelis kaupiklį gali panaudoti momentiniuose kainos pikuose ir kritimuose. Be to, tyrimo rezultatuose matyti, kad didžiausią dalį baterijos pajamų sugeneruoja energijos eksportas į tinklą. Kita vertus, Pirsono koreliacijos koeficientai parodė, kad talpa turi reikšmingą įtaką išvengiamiems importo iš tinklo kaštams (koreliacijos koeficientas – 0,79) ir absoliučiai ekonominei naudai (koreliacijos koeficientas – 0,98), todėl didelės talpos baterijos su vidutiniais galios parametrais yra tinkamos elektros importo kaštams mažinti. Sezoniškumo įtakos metiniams rezultatams analizėje pastebėta, kad PV ir BEEKS sistemos ekonominė nauda reikšmingai priklauso nuo metų laiko ir yra didžiausia rugsėjo ir spalio mėnesiais, o mažiausia – birželio ir liepos mėnesiais. Tokia tendencija paaiškinama elektros kainų pasiskirstymo duomenimis, nes rudenį elektros kainų svyravimai buvo reikšmingai didesni, lyginant su vasara. Metinių rezultatų analizėje nustatyta, kad baterija B12 vertinama kaip objektyviai naudingiausia, kai metinė ekonominė nauda per talpos vienetą buvo 54,58 Eur/kWh. Kita vertus, mažiausią metinę ekonominę naudą per talpos vienetą pasiekė baterija B7, kai rezultatas buvo 31,66 Eur/kWh.

Literatūra

1. Echevarría Camarero, F., Ogando-Martínez, A., Durán Gómez, P., & Carrasco Ortega, P. (2023). Profitability of Batteries in Photovoltaic Systems for Small Industrial Consumers in Spain under Current Regulatory Framework and Energy Prices. Energies, 16(1), 361. https://doi.org/10.3390/en16010361
2. European Commission. (s.a.). Key facts on energy storage. Gauta 2026 m. kovo 30 d. https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en
3. Eurostat. (2025a). Final energy consumption in industry—Detailed statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics
4. Eurostat. (2025b, rugsėjo 29). Solar: Main source of EU electricity in June with 22%. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250929-3
5. Eurostat. (2026, sausio 14). 2024: Nearly 50% of EU electricity came from renewables. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20260114-1
6. Heffron, R., Körner, M.-F., Wagner, J., Weibelzahl, M., & Fridgen, G. (2020). Industrial demand-side flexibility: A key element of a just energy transition and industrial development. Applied Energy, 269, 115026. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115026
7. Hu, J., Shan, Y., Guerrero, J. M., Ioinovici, A., Chan, K. W., & Rodriguez, J. (2021). Model predictive control of microgrids – An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 136, 110422. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110422
8. IEA. (2025). Demand – Electricity 2025 – Analysis. IEA. https://www.iea.org/reports/electricity-2025/demand
9. Nord Pool | Day-ahead prices. (s.a.). Gauta 2026 m. gegužės 10 d. https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices
10. Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the Future: A Comprehensive Review of Battery Energy Storage Systems. Energies, 16(17), 6344. https://doi.org/10.3390/en16176344
11. Shabani, M., Shabani, M., & Yan, J. (2025). Techno-economic profitability of grid-scale battery storage allocation in European wholesale markets under a novel operation optimization strategy. Energy Conversion and Management: X, 26, 100936. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100936

12. Wankmüller, F., Thimmapuram, P. R., Gallagher, K. G., & Botterud, A. (2017). Impact of battery degradation on energy arbitrage revenue of grid-level energy storage. Journal of Energy Storage, 10, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.est.2016.12.004
13. Zare Ghaleh Seyyedi, A., Gitizadeh, M., Fakhrooeian, M., & Jabareh Nasero, M. (2025). Achieving the goals of energy arbitrage, peak-shaving, and PV self-consumption using PV-BTM BESS microgrids coupled with a distribution network. Journal of Energy Storage, 112, 115479. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115479

APPLICATION OF ENERGY STORAGE SYSTEM TO OPTIMISE ELECTRICITY CONSUMPTION

Summary

The article investigates battery energy storage system use for electricity consumption cost optimisation. A mathematical optimisation model for a solar power plant and battery storage system is developed. Annual results and battery parameter sensitivity are analysed. The model is implemented using Python programming language and the optimisation problem is formulated as a mixed integer linear program (MILP) with a multi-objective function that maximises both price arbitrage profit and self-consumption of solar energy. The results show that absolute net profit is mainly driven by battery capacity, while relative net profit is mainly driven by the C-rate.

Key words: battery energy storage system, mathematical optimisation, MILP, price arbitrage, multi-objective function.

MANAGEMENT CHALLENGES OF UNFORMED STATE-OWNED LAND AT THE LOCAL LEVEL

Edita Abalikštienė, Eglė Juchnevič
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

The article analyses the management challenges of unformed state-owned land at the local level. The aim of the research is to identify and assess the management problems of unformed state-owned land at the eldership level, using Sužionys eldership as a case study. The research methods included legal and scientific literature analysis, spatial and statistical data assessment, field verification, and a semi-structured expert interview. The study identified 84 unformed state-owned land objects within the analysed territory, covering a total area of 1,194.48 ha, or 7.46% of the eldership area. Field verification revealed neglected areas, land plots overgrown with self-seeded vegetation, and areas potentially used on an unclear legal basis. The results show that the main problems are associated with complex land parcel formation procedures, a lack of information among residents, financial barriers, incomplete cadastral measurements, and insufficient inter-institutional cooperation. Unformed state-owned land complicates territorial planning, land use control, and the rational management of public assets.

Key words: State-owned land, Unformed land, Land administration, Land parcel formation, Territorial planning.

Introduction

The management of state-owned land is an important component of the land administration system, influencing the rational use of state assets, territorial development, and the protection of the public interest. Effective land administration is possible only when the legal status of land is clear, boundaries are defined, and cadastral data are registered in the Real Property Register. The scientific literature emphasises that a clear land administration system is a prerequisite for effective land use, the functioning of the land market, and territorial development (FAO, 2017).

In Lithuania, part of state-owned land has still not been formed as separate real property objects and registered in the Real Property Register. This situation complicates the administration of such land, the control of its actual use, and its integration into territorial planning and public asset management processes. Therefore, the issue of unformed state-owned land is not merely a technical deficiency in cadastral or registry data; it is directly related to the efficiency of land administration and the practical management of territories.

The emergence of this problem in Lithuania has been influenced by the consequences of land reform, the lack of territorial planning documents, complex land parcel formation procedures, the distribution of institutional functions, and insufficient inter-institutional cooperation. In Central and Eastern European countries, the processes of restitution of ownership rights and the development of land markets following political system changes have, over time, led to land use fragmentation, unclear boundaries, and more complex land administration (Pašakarnis et al., 2013).

The problem of unformed state-owned land becomes particularly evident at the local level. In municipal and eldership territories, unclear land status complicates the maintenance of specific areas, the identification of actual users, the planning of local infrastructure, and the management of public spaces. Such areas may become neglected, overgrown with self-seeded vegetation, or used on an unclear legal basis. Previous studies indicate that decentralised land management can be effective only when local institutions have clearly defined functions, sufficient administrative capacity, and access to reliable data (Ibrahim, 2024).

Since 2024, the transfer of some state-owned land management functions to municipalities has further increased responsibility at the local level. Municipalities are expected not only to administer state-owned land, but also to identify problematic areas, assess their actual condition, initiate land formation procedures, and ensure lawful and rational land use. Therefore, it is important to analyse not only national-level data, but also the problems occurring in specific territories.

The scientific novelty of this article lies in the fact that the issue of unformed state-owned land is analysed not only as a matter of legal or registry status, but also as a local-level land administration problem. The study assesses specific spatial and statistical data, the actual condition of territories, signs of possible informal use, and administrative barriers arising in practice. This approach makes it possible to demonstrate that the problem of unformed state-owned land is manifested not only in document management procedures, but also in the actual use of territories.

The research problem is that unformed state-owned land at the local level limits the possibilities for territorial planning, land use control, infrastructure development, and the activation of public assets, while the unclear legal and actual status of such areas creates preconditions for their neglect or informal use.

The object of the research is the management of unformed state-owned land at the local level.

The aim of the research is to identify and assess the management problems of unformed state-owned land at the local, i.e. eldership, level, using Sužionys eldership as a case study.

The objectives of the research are as follows:

1) examine the legal and administrative preconditions for the management of unformed state-owned land;

2) determine the extent, spatial distribution, and actual condition of unformed state-owned land in the analysed territory;

3) identify the main local-level management challenges related to the formation, use, maintenance, and control of unformed state-owned land.

Materials and methods

The empirical study was conducted in Sužionys eldership, Vilnius District Municipality, selected as a case study area to assess the management problems of unformed state-owned land at the local level. The study examined the extent, spatial distribution, actual condition, and management challenges of such land. The selected area is characterised by a predominantly rural landscape, dispersed settlement structure, agricultural land, and natural areas, where unformed state-owned land may directly affect territorial maintenance, infrastructure development, and land use control.

The research combined the analysis of legal acts and scientific literature, spatial and statistical data assessment, field verification, and a semi-structured expert interview. Legal acts and scientific literature were analysed to define the regulatory and theoretical framework of unformed state-owned land management in the context of land administration, land reform, cadastral data quality, institutional cooperation, and territorial planning.

The quantitative and spatial analysis was based on publicly available spatial data on unformed state-owned land and administrative boundaries. In a GIS environment, unformed state-owned land objects located within the boundaries of Sužionys eldership were selected, and their number, total area, and share of the eldership territory were calculated. The results were also compared with national-level data on unformed state-owned land.

Field verification was carried out to assess the actual condition of selected unformed state-owned land areas. The inspected sites represented different types of areas identified during the spatial analysis, including agricultural surroundings, areas near settlements, and territories with visible signs of abandonment or possible use. During the field inspection, maintenance condition, self-seeded vegetation, temporary objects, abandoned buildings, agricultural machinery, and other indications of human activity were recorded. The field verification was not aimed at establishing legal violations, but at identifying signs of possible informal use or unclear land use status.

A semi-structured expert interview with a local-level land administration specialist was used as an additional source of contextual information. The interview data were not treated as statistically representative; rather, they were used to interpret and explain the results obtained from spatial data analysis and field verification. The collected data were analysed using descriptive and comparative analysis, integrating legal, spatial, field, and interview-based information.

Theoretical background

Land administration is a system that includes processes related to land ownership, use, registration, valuation, and planning. Its importance becomes particularly evident when the legal status of land is unclear or when land has not been fully integrated into cadastral and registry systems. In such cases, opportunities for land use, management, territorial planning, and the activation of public assets are restricted. A clear land administration system is considered one of the essential preconditions for the effective functioning of the land market, territorial development, and the protection of the public interest (FAO, 2017).

The management problems of state-owned land are closely related to land reform processes. In Central and Eastern European countries, following political system changes, ownership rights were restored, new land parcels were formed, and land markets were established. Although these processes were necessary for the transition to a market economy, over time they also created additional administrative challenges, including land use fragmentation, unclear boundaries, more complex land parcel administration, and uneven land use efficiency (Hartvigsen, 2014; Sikor & Müller, 2009).

In the Lithuanian context, the issue of unformed state-owned land should be analysed in close connection with the national legal framework of land administration. The current versions of the Law on Land of the Republic of Lithuania, the Law on Land Reform of the Republic of Lithuania, the Law on

Territorial Planning of the Republic of Lithuania, and the Law on Local Self-Government of the Republic of Lithuania provide the basis for interpreting land ownership, use, management, territorial planning, and the functions of local self-government institutions. These legal acts define not only the formal principles of land parcel formation and administration, but also the institutional context in which decisions on the use, planning, and integration of state-owned land into cadastral and registry systems are made. In addition, the methodology approved by the Order of the Minister of Environment of the Republic of Lithuania of 19 July 2024 on the administration of state-owned land parcels of other purpose sold or leased without auction specifies procedural provisions related to the sale and lease of state-owned land parcels without auction. Therefore, in this study, legal regulation is treated as a normative framework that helps explain why unformed state-owned land areas become not only a matter of registration, but also a broader problem of territorial planning, public administration, and rational land use.

One of the key factors of effective land management is the clear definition of ownership and use rights. When the legal status, boundaries, or basis of land use are unclear, it becomes more difficult to make administrative decisions, plan investments, maintain territories, and control actual land use. Ma et al. (2024) note that the clarity of property rights has a significant impact on land use efficiency. Similarly, He et al. (2025) indicate that ambiguity in state-owned land property rights increases transaction costs and complicates the implementation of public projects. These insights are also relevant to the analysis of unformed state-owned land, as such land often lacks clearly defined boundaries, a clear basis of use, and responsibility for maintenance.

The success of land administration reforms depends not only on changes in legal acts, but also on their practical implementation. Burns (2007) identifies data quality, institutional responsibility, service accessibility, and clear performance indicators as important criteria for assessing land administration reforms. Burns et al. (2023) also emphasise that reforms often face difficulties when more attention is given to formal regulation than to the capacity of institutions to solve practical problems in a coordinated manner. This is particularly important in the case of unformed state-owned land, as the mere existence of legal acts does not ensure that specific land areas will be formed, registered, and integrated into rational use in a timely manner.

The local level is particularly important in land administration, as actual land use problems become most visible within municipal and eldership territories (Abalikštienė & Perkumienė, 2022). The unclear status of state-owned land may complicate the planning of roads, engineering networks, public spaces, recreational areas, and other infrastructure objects. It also makes it more difficult to identify actual users, address issues of territorial neglect, and ensure that state-owned land is used in accordance with the public interest. Samsudin et al. (2014) indicate that decentralisation in land administration can improve decision-making only when local institutions have clearly defined functions, sufficient administrative capacity, and access to reliable data. Ibrahim (2024) also notes that decentralisation can improve the quality of public services, but this requires clear responsibility and institutional decision-making capacity. Recent research on land decentralisation also shows that the redistribution of land management functions may influence the efficiency of land rental and administrative processes (Neyter et al., 2026).

The significance of public land is not limited to its legal status. Such land may be important for the local economy, infrastructure development, recreation, landscape quality, and community well-being. Kim and Marcouiller (2021) argue that public land areas affect local economic and social processes; however, this benefit is possible only when the status of land is clear and its use is planned in accordance with local needs. In the case of unformed state-owned land, this potential often remains unused, as the land has not been formed as an independent real property object and cannot be smoothly integrated into planning or activation processes.

Land use management is also related to the principles of sustainability. Izakovičová et al. (2018) emphasise that sustainable land use should include ecological, social, economic, and territorial aspects. The OECD (2017) also stresses that land use governance requires coordination between different levels of government, clear planning instruments, and data-based decision-making. Therefore, the issue of unformed state-owned land should be understood not only as an administrative or registration problem, but also as an obstacle to sustainable territorial development.

In summary, the issue of unformed state-owned land is related to several interrelated factors: the consequences of land reform, the clarity of ownership and use rights, the quality of cadastral data, the distribution of institutional functions, local-level administrative capacity, and the implementation of territorial planning solutions. Therefore, in this article, unformed state-owned land is treated as a complex land administration problem with legal, practical, territorial, and social significance. This approach makes it

possible to move beyond the formal issue of registering unformed areas and to analyse how these areas affect local territorial management, land use control, infrastructure planning, and the activation of public assets.

Results and discussion

The analysis showed that the issue of unformed state-owned land in Lithuania remains relevant at both the national and local levels. The total area of unformed state-owned land in the country amounts to 542,434.68 ha (NŽT, 2025). This indicates that unformed state-owned land is not only a local or technical cadastral issue, but a national land administration challenge related to territorial planning, land use control, public asset management, and the activation of state-owned land.

The significance of the analysed case is not limited to Sužionys eldership. Local-level case studies make it possible to show how this national-scale problem is expressed in practice. The Sužionys eldership case demonstrates that unformed land is not only a matter of incomplete cadastral or registry data, but also a practical challenge related to land use control, territorial maintenance, infrastructure planning, and the management of public assets. Therefore, the results of this study may be relevant for other rural and less urbanised municipalities facing similar land administration problems.

The analysed territory is characterised by a rural landscape, a dispersed settlement network, and a high proportion of agricultural and natural areas. The total area of the analysed territory is 16,014 ha. Agricultural land accounts for the largest share, covering 9,870 ha; forests occupy approximately 3,800 ha, while water bodies and other land areas cover 2,344 ha. This land use structure indicates that the clarity of legal land status, boundary determination, and control of actual land use are important not only from an administrative perspective, but also in relation to territorial maintenance, agricultural activity, infrastructure planning, and landscape quality.

Based on the analysed spatial and statistical data, 84 unformed state-owned land objects were identified in the analysed territory, covering a total area of 1,194.48 ha. This area accounts for approximately 7.46% of the total analysed territory and 0.22% of the total area of unformed state-owned land in Lithuania (Fig. 1).

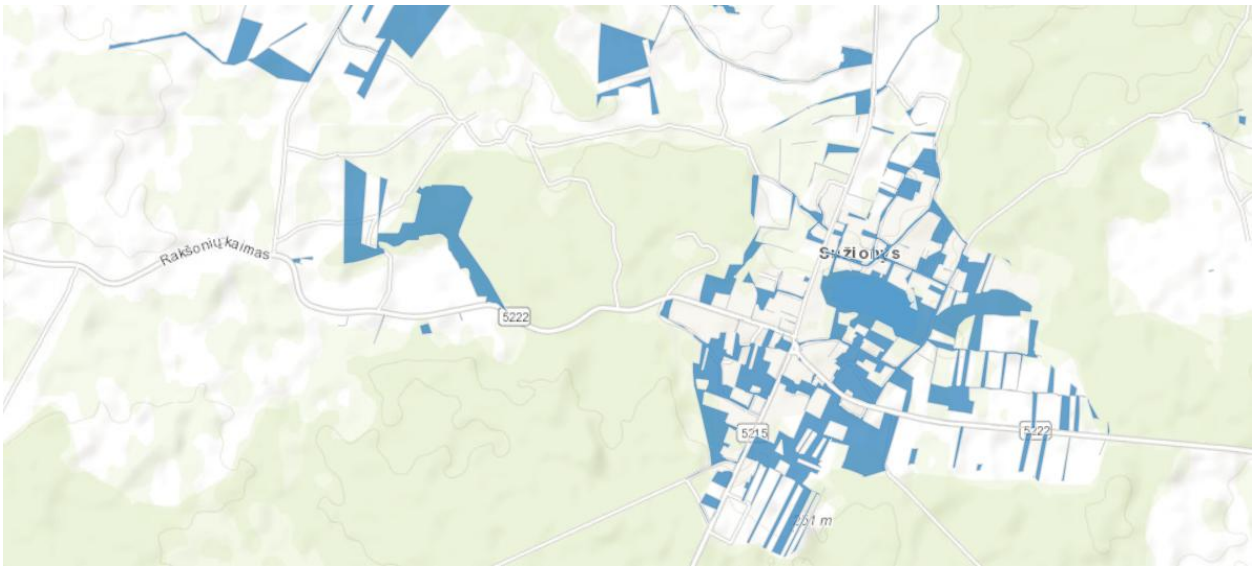


Fig. 1. Unformed state-owned land areas in Sužionys eldership, Vilnius District Municipality
Source: https://open-data.stat.gov.lt/

Although this share is not large at the national level, such an area is significant at the local level, as it may directly affect territorial planning, infrastructure development, land use control, and public asset management.

The results of the field verification showed that the issue of unformed state-owned land is not limited to the absence of cadastral or registry data. In the analysed territory, part of the unformed state-owned land areas were found to be neglected, overgrown with self-seeded vegetation, or used on an unclear legal basis. This confirms that, in the absence of a formed land parcel, clearly defined boundaries, and a registered basis for use, state-owned land becomes more difficult to administer and control (Fig. 2).



Fig. 2. An unformed land parcel and photographs from field verification
Source: authors' photo

During the field verification, signs of possible informal use were recorded. In some areas of unformed state-owned land, inventory, agricultural machinery, temporary structures, or abandoned buildings were present. In one of the investigated objects, an abandoned building and its adjacent annex had been adapted for personal use, with a chicken enclosure and a woodshed installed within the area. As no clear legal basis for such use was identified during the research, these cases may be regarded as indications of possible informal or unauthorised use of state-owned land.

Another problem highlighted during the study was the lack of maintenance of unformed state-owned land areas. Some territories were overgrown with shrubs, self-seeded trees, and dense herbaceous vegetation. Such a condition indicates long-term non-use of land and insufficient maintenance. Neglected areas gradually lose their economic potential, reduce the aesthetic quality of the landscape, and may create preconditions for further territorial degradation. From the perspective of the local community, this is not merely a formal issue of state-owned land accounting; such areas become visible abandoned patches within residential or agricultural surroundings.

The identified features confirm that the control of unformed state-owned land remains challenging at the local level. When land has not been formed as an independent real property object, it becomes more difficult to determine its boundaries, identify actual users, establish responsibility for maintenance, and apply possible management measures. As a result, a situation emerges in which state-owned land formally belongs to public assets, but in practice is not managed with sufficient clarity (Table 1).

Table 1

Local-level management problems of unformed state-owned land

Problem group	Features identified during the research	Possible consequences
Unclear actual use	Unclear basis of use, temporary objects, inventory, use of abandoned buildings	More complicated control, possible disputes, informal use of state-owned land
Lack of territorial maintenance	Shrubs, self-seeded trees, dense herbaceous vegetation	Territorial degradation, lower economic potential, poorer landscape quality
Unclear boundaries and data	Unperformed cadastral or geodetic measurements, unclear actual basis of use	Boundary inconsistencies, neighbouring disputes, more complex planning

Problem group	Features identified during the research	Possible consequences
Administrative procedures	Projects, decisions, measurements, registration procedures	Long process, procedural costs, resident passivity
Institutional coordination	Distribution of functions, lack of information, changes in legal regulation	Delayed practical decisions, insufficient local-level monitoring

Source: compiled by the authors

The results of the study show that the problem of unformed state-owned land should be interpreted not only as an unfinished cadastral or registration procedure, but also as a practical failure of land governance at the local level. Although the analysed area accounts for only 0.22% of the total area of unformed state-owned land in Lithuania, its share within Sužionys eldership reaches 7.46%. This difference is important because it demonstrates that the significance of the problem cannot be assessed only through national-level indicators. At the local level, even a relatively small share in the national context may represent a substantial part of the territory affecting land use control, maintenance, planning decisions, and the management of public assets.

The findings also indicate that the legal existence of state ownership does not automatically ensure effective land management. In the analysed territory, some unformed state-owned land areas were neglected, overgrown with self-seeded vegetation, or showed signs of possible informal use. This suggests a gap between formal ownership and practical control. When land is not formed as an independent real property object, it becomes more difficult to identify boundaries, determine actual users, assign responsibility for maintenance, and apply management measures. Therefore, the problem is not limited to the absence of cadastral data; it reflects a broader weakness in the practical implementation of land administration.

These results correspond to earlier studies on land reform and land administration in Central and Eastern Europe, which emphasise that historical land reform processes, land fragmentation, and complex administrative procedures may create long-term consequences for land use efficiency (Hartvigsen, 2014; Pašakarnis et al., 2013; Sikor & Müller, 2009). The present study supplements these insights with local-level empirical evidence, showing that unfinished land formation processes are visible not only in legal documents or registers, but also in the physical condition and actual use of territories.

The study also supports the argument that land administration reforms depend not only on formal legal regulation, but also on data quality, institutional responsibility, service accessibility, and implementation capacity (Burns, 2007; Burns et al., 2023). In the case of Sužionys eldership, legally regulated procedures exist, but their implementation is slowed down by the need for project preparation, coordination procedures, cadastral measurements, registration actions, financial costs, and insufficient awareness among residents. This shows that the effectiveness of land administration is determined not by the existence of regulation alone, but by the ability of institutions and land users to apply it in practice.

The local-level dimension becomes especially important in the context of the recent transfer of some state-owned land management functions to municipalities. Decentralisation may improve land management only if local institutions have clear responsibilities, sufficient administrative capacity, and access to reliable spatial and cadastral data. Otherwise, the transfer of functions may increase the administrative burden without solving the underlying problems. The case analysed in this study indicates that municipalities need not only formal authority, but also operational tools for identifying priority areas, monitoring their actual condition, initiating formation procedures, and coordinating actions with other institutions.

From a practical perspective, the findings suggest that the management of unformed state-owned land should be based on prioritisation. Not all unformed areas create the same level of risk or management difficulty. Priority should be given to areas located near settlements, infrastructure objects, public spaces, agricultural land, and territories where signs of neglect or possible informal use are visible. Such an approach would allow local institutions to move from passive registration of the problem towards targeted land management based on spatial data, field verification, and local knowledge.

Thus, the Sužionys eldership case demonstrates that unformed state-owned land is a multidimensional issue combining legal, spatial, administrative, and practical aspects. The problem affects not only the completeness of cadastral and registry data, but also the quality of territorial planning, the effectiveness of land use control, the maintenance of rural landscapes, and the rational use of public assets. Therefore, strengthening local-level monitoring, improving the integration of spatial and cadastral data, simplifying procedures, and providing clearer information to residents should be considered essential measures for improving the management of unformed state-owned land.

In summary, the problem of unformed state-owned land at the local level is manifested in three main directions: incomplete land formation and registration procedures, deficiencies in actual land use and maintenance, and a complex administrative process. The research results show that the management of

unformed state-owned land cannot be associated solely with the formal registration of objects. It is necessary to strengthen the monitoring of the actual condition of land use, provide residents with clearer information on land formation procedures, reduce the administrative burden, and ensure consistent inter-institutional cooperation. Only under these conditions can unformed state-owned land be integrated into lawful, rational, and locally beneficial use.

Conclusions

1. The analysis of the legal and administrative preconditions for the management of unformed state-owned land showed that the processes of formation, use, and registration of state-owned land in Lithuania are legally regulated. However, their practical implementation at the local level is complicated by the complexity of procedures, the number of coordination stages, the need for cadastral measurements, registration actions, and the distribution of institutional functions. Therefore, unformed state-owned land should not be regarded merely as a formal lack of cadastral or registry data, but as a broader land administration problem related to the uncertainty of legal status, boundaries, basis of use, and responsibility for maintenance.

2. The study identified 84 unformed state-owned land objects in Sužionys eldership, covering a total area of 1,194.48 ha, or approximately 7.46% of the eldership territory. Although this area accounts for only 0.22% of the total area of unformed state-owned land in Lithuania, it is significant at the local level, as it directly affects territorial maintenance, land use control, infrastructure planning, and the activation of public assets. Field verification showed that some of these areas are neglected and overgrown with self-seeded vegetation, while in some territories signs of possible informal use were recorded, including temporary objects, inventory, agricultural machinery, and abandoned buildings adapted for personal use.

3. The main local-level management challenges are related to incomplete land formation and registration procedures, uncertainty of actual use, lack of territorial maintenance, insufficient information among residents, financial barriers, administrative burden, and insufficient inter-institutional cooperation. Improving the management of unformed state-owned land should therefore be linked to systematic local-level monitoring, the identification of priority areas, clearer information for residents, simplification of administrative procedures, and the integration of spatial and cadastral data into municipal decision-making.

References

1. Abalikštienė, E., & Perkumienė, D. (2022). Challenges and problems of agricultural land use changes in Lithuania according to territorial planning documents: Case of Vilnius district municipality. *Land Use Policy, 117*, 106125. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106125
2. Burns, A. F., Rajabifard, A., & Shojaei, D. (2023). Undertaking land administration reform: Is there a better way? *Land Use Policy, 134*, 106824. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106824
3. Burns, T. (2007). *Land administration reform: Indicators of success and future challenges*. Agriculture and Rural Development Discussion Paper No. 37. The World Bank.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *Land administration and land management in transition countries*. Rome: FAO.
5. Hartvigsen, M. (2014). Land reform and land fragmentation in Central and Eastern Europe. *Land Use Policy, 36*, 330–341. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.016
6. He, D., Wang, J., & Sun, G. (2025). Ambiguity in state-owned land property rights increases transaction costs in China's transit-oriented development projects. *Land Use Policy, 152*, 107501. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107501
7. Ibrahim, A. H. H. (2024). Decentralization and its impact on improving public services. *International Journal of Social Sciences, 7*(2), 45–53. https://doi.org/10.21744/ijss.v7n2.2278
8. Izakovičová, Z., Špulerová, J., & Petrovič, F. (2018). Integrated approach to sustainable land use management. *Environments, 5*(3), 37. https://doi.org/10.3390/environments5030037
9. Kim, D., & Marcouiller, D. W. (2021). The role of public lands in local economies of the US Lake States: A spatial simultaneous equation approach. *Land Use Policy, 100*, 104883. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104883
10. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas „Dėl kitos paskirties valstybinių žemės sklypų, parduodamų ar išnuomojamų ne aukciono būdu, administravimo metodikos patvirtinimo" [Order of the Minister of Environment of the Republic of Lithuania "On the Approval of the Methodology for the Administration of State-Owned Land Plots of Other Purpose Sold or Leased without Auction"]. 2024 m. liepos 19 d. TAR, Nr. 2024-13319, as amended.
11. Lietuvos Respublikos teritorijų planavimo įstatymas [Law on Territorial Planning of the Republic of Lithuania]. 1995 m. gruodžio 12 d. Nr. I-1120, as amended.
12. Lietuvos Respublikos vietos savivaldos įstatymas [Law on Local Self-Government of the Republic of Lithuania]. 1994 m. liepos 7 d. Nr. I-533, as amended.

13. Lietuvos Respublikos žemės įstatymas [Law on Land of the Republic of Lithuania]. 1994 m. balandžio 26 d. Nr. I-446, as amended.
14. Ma, J., Tian, L., Zhang, Y., Yang, X., Li, Y., Liu, Z., Zhou, L., Wang, Z., & Ouyang, W. (2024). Global property rights and land use efficiency. *Nature Communications, 15*(1), 8525. https://doi.org/10.1038/s41467-024-52859-5
15. Nacionalinė žemės tarnyba prie Aplinkos ministerijos. (2025). *Žemės reformos ir valstybinės žemės fondo duomenys*. Available online: https://nzt.lrv.lt/lt/
16. Neyter, R., Gardebroek, C., Ihle, R., & Nivievskyi, O. (2026). Effects of the 2014 Ukrainian land decentralization reform on land rental auction performance. *Land Use Policy, 161*, 107852. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107852
17. OECD. (2017). *The governance of land use in OECD countries: Policy analysis and recommendations*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264268609-en
18. Pašakarnis, G., Morley, D., & Malienė, V. (2013). Rural development and challenges establishing sustainable land use in Eastern European countries. *Land Use Policy, 30*(1), 703–710. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.05.011
19. Samsudin, S., Lim, J. L.-C., & McCluskey, W. (2014). Decentralisation and good governance in land administration systems. In *FIG Congress 2014 – Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*, Kuala Lumpur, Malaysia. International Federation of Surveyors.
20. Sikor, T., & Müller, D. (2009). The limits of state-led land reform: An introduction. *World Development, 37*(8), 1307–1316. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2008.08.016

NESUFORMUOTOS VALSTYBINĖS ŽEMĖS VALDYMO PROBLEMATIKA VIETOS LYGMENIU

Santrauka

Straipsnyje analizuojama nesuformuotos valstybinės žemės valdymo problematika vietos lygmeniu. Tyrimo tikslas – Sužionių seniūnijos pavyzdžiu identifikuoti ir įvertinti nesuformuotos valstybinės žemės valdymo problemas seniūnijų lygmeniu. Tyrime taikyta teisės aktų ir mokslinės literatūros analizė, erdvinių bei statistinių duomenų vertinimas, lauko patikra ir pusiau struktūruotas ekspertinis interviu. Nustatyta, kad tiriamoje teritorijoje yra 84 nesuformuotos valstybinės žemės objektai, kurių bendras plotas sudaro 1194,48 ha, arba 7,46 proc. seniūnijos teritorijos. Lauko patikros metu nustatyta neprižiūrimų, savaimine augmenija apaugusių ir galimai neaiškiu teisiniu pagrindu naudojamų plotų. Tyrimo rezultatai parodė, kad pagrindinės problemos siejamos su sudėtingomis žemės sklypų formavimo procedūromis, gyventojų informacijos stoka, finansiniais barjerais, nebaigtais kadastriniais matavimais ir nepakankamu institucijų bendradarbiavimu. Nesuformuota valstybinė žemė apsunkina teritorijų planavimą, žemės naudojimo kontrolę ir racionalų viešojo turto valdymą.

Reikšminiai žodžiai: valstybinė žemė, nesuformuota žemė, žemės administravimas, žemės sklypų formavimas, teritorijų planavimas.

NUOTOLINIŲ MATAVIMŲ TAIKYMO IŠMATUOTŲ TOPOGRAFINIŲ ERDVINIŲ DUOMENŲ TIKSLUMUI TYRIMAS

Giedrius Balevičius [1, 2], Vaiva Stravinskienė [1]
[1] Lietuvos inžinerijos kolegija, [2] VDU Žemės ūkio akademija

Anotacija

Tyrimu siekiama įvertinti nuotoliniais tyrimo metodais sudarytų erdvinių duomenų rinkinių tikslumą ir jų atitiktį stambaus mastelio topografinių planų rengimui keliamiems reikalavimams. *Darbo tikslas* – nustatyti nuotolinių tyrimų metodais sudarytų erdvinių duomenų tikslumą. *Uždaviniai:* palyginti nuotolinių tyrimų metodais (UAS fotogrametrija ir LiDAR) bei GNSS RTK metodais gautų vietovės objektų erdvinių duomenų tikslumą. Darbe taikytas erdvinis ir grafinis modeliavimas, gautų duomenų apibendrinimas ir interpretavimas. Nuotoliniais tyrimo metodais sudarytas ortofotografinis planas taško horizontaliajai padėčiai nustatyti ir taškų debesis vertikaliai padėčiai. Siekiant nustatyti nuotolinių tyrimų metodais gautų erdvinių duomenų tikslumą, atlikti GNSS matavimai taikant LitPos-RTK metodą. Gauti rezultatai neviršijo maksimalios vidutinės kvadratinės paklaidos ribų, t. y. stambaus mastelio M 1:500 išmatuotų topografinių objektų tvirtų vietovės kontūrų horizontaliosios padėties vidutinė kvadratinė paklaida, turi būti ne didesnė kaip 0,20 m, o vertikalios padėties tvirtų vietovės kontūrų – 0,10 m, kitų paviršių – 0,20 m, su 95 proc. tikimybe, todėl UAS fotogrametrijos metodas laikytinas tinkamu tvirtų vietovės kontūrų taško padėties erdvinės padėties nustatymui. Neanalizuotas taško padėties nustatymo tikslumas kituose paviršiuose. Tačiau siekiant užtikrinti matavimų kontrolę tikslinga taikyti kombinuotus matavimų metodus.

Reikšminiai žodžiai. Bepiločių orlaivių sistema (UAS), GNSS, LIDAR, matavimai, ortofotografinis planas, taškų debesis, tikslumas.

Įvadas

Aktualumas ir mokslinė problema. Matavimų inžinerijoje vieni svarbiausių rodiklių yra išmatuotų erdvinių duomenų tikslumas ir kokybė. Šie duomenys sudaro pagrindą projektavimo, statybos bei teritorijų planavimo procesams, todėl jų surinkimas turi užtikrinti techninius reikalavimus atitinkantį tikslumą ir patikimumą. Tradiciškai topografiniai matavimai atliekami tacheometrijos, GNSS RTK. Tačiau šie metodai reikalauja intensyvių lauko darbų ir didelių laiko sąnaudų. Tobulėjant nuotolinių tyrimų technologijoms, įskaitant bepiločių orlaivių sistemas (UAS), skaitmeninę fotogrametriją ir LiDAR sistemas, atsiranda galimybė operatyviai surinkti didelės apimties erdvinių duomenų rinkinius, generuoti ortofotografinius planus, skaitmeninius paviršiaus modelius bei taškų debesis, mažinant darbų sąnaudas ir didinant duomenų surinkimo efektyvumą teoriškai yra paprasta.

Nepaisant spartaus UAS, LiDAR ir kitų nuotolinių tyrimų metodų taikymo geodeziniuose bei kartografiniuose darbuose, išlieka aktualus klausimas dėl šiais metodais gautų erdvinių duomenų tikslumo. Trūksta tyrimų, vertinančių sudėtingų objektų – vertikalių paviršių, antžeminių inžinerinių tinklų elementų ir kitų smulkių infrastruktūros objektų – padėties nustatymo tikslumą. Todėl aktuali mokslinė problema yra nustatyti, ar nuotoliniais tyrimo metodais sudaryti išmatuotų erdvinių duomenų rinkiniai atitinka stambaus mastelio topografinių planų rengimui keliamus tikslumo reikalavimus ir gali būti tiesioginė alternatyva tradiciniams geodeziniams matavimams. Siekiant tai įvertinti, būtina palyginti UAS, LiDAR ir GNSS RTK metodais gautų matavimų rezultatus bei jų taikymo galimybes matavimų praktikoje.

Darbo objektas - nuotolinių tyrimų metodais (UAS fotogrametrija ir LiDAR) bei GNSS RTK metodais gautų vietovės objektų erdvinių duomenų tikslumas. *Darbo tikslas* – nustatyti nuotolinių tyrimų metodais sudarytų erdvinių duomenų rinkinių tikslumą. *Uždaviniai:* palyginti nuotolinių tyrimų metodais (UAS fotogrametrija ir LiDAR) bei GNSS RTK metodais gautų vietovės objektų erdvinių duomenų tikslumą.

Straipsnis susideda iš anotacijos, reikšminių žodžių, teorinės įžvalgos, metodikos, tyrimo rezultatų ir išvadų.

Teorinės įžvalgos

Bepiločių orlaivių sistemos (UAS) tapo viena sparčiausiai besivystančių erdvinių duomenų rinkimo priemonių geodezijoje, fotogrametrijoje ir kartografijoje. Jų populiarumą lemia galimybė greitai surinkti didelės raiškos duomenis, sudaryti ortofotografinius planus, skaitmeninius paviršiaus modelius (SPM) ir taškų debesis mažesnėmis sąnaudomis nei taikant tradicinius aerofotografavimo metodus (Mulakala, 2019). Mokslinėje literatūroje pažymima, kad UAS fotogrametrija tampa svarbia priemone topografinių planų sudarymui bei teritorijų stebėsenai (Sužiedelyte-Visockienė ir kt., 2016; Štroner ir kt.,2021). Tyrimai rodo, kad naudojant tinkamai suplanuotą skrydį ir pakankamą nuotraukų persidengimą galima pasiekti centimetrinį erdvinių duomenų tikslumą (Clapuyt ir kt., 2016; Tamminga ir kt., 2016).

Vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių fotogrametrinių produktų tikslumą, yra georeferencinių duomenų kokybė. Tradiciškai tam naudojami antžeminiai atraminiai taškai (GCP), kurių koordinatės

nustatomos GNSS RTK metodu. RTK technologija leidžia realiuoju laiku pasiekti centimetrinį tikslumą ir yra laikoma vienu tiksliausių metodų geodeziniams matavimams atlikti (Chen ir kt.,2021). Todėl RTK duomenys dažnai naudojami kaip etaloniniai vertinant UAS fotogrametrinių duomenų kokybę (Štroner ir kt., 2021).

Pastaraisiais metais naudojami UAS su integruotais RTK imtuvais. Tokie sprendimai leidžia tiesiogiai georeferencuoti aeronuotraukas ir sumažinti atraminių taškų poreikį . Štroner ir kt. (2021) nustatė, kad GNSS RTK integracija gali užtikrinti pakankamą tikslumą stambaus mastelio kartografavimo darbams net ir naudojant minimalų GCP skaičių.

Ortofotografiniai planai yra vieni pagrindinių UAS fotogrametrijos produktų. Jų tikslumas priklauso nuo skrydžio aukščio, vaizdo raiškos, georeferencinių duomenų bei fotogrametrinio apdorojimo parametrų. Moksliniai tyrimai rodo, kad naudojant RTK technologiją horizontalus tikslumas dažnai siekia 3–6 cm, o vertikalus – apie 5–6 cm. Tokie rodikliai atitinka daugelio stambaus mastelio topografinių planų rengimo reikalavimus (Alshawabkeh ir kt., 2021). Niu ir kt. (2024) atliko RTK integruoto UAS tikslumo vertinimą ir nustatė, kad net nenaudojant atraminių taškų vertikaliosios koordinatės paklaida gali būti apie 5–6 cm. Tyrimo autoriai daro išvadą, kad RTK integruoti UAS gali būti naudojami didelio mastelio kartografavimui.

Nors horizontalūs paviršiai fotogrametriniais metodais atkuriami gana tiksliai, vertikalių objektų matavimas išlieka viena didžiausių problemų. Pastatų fasadai, atraminės sienos, šuliniai ir kiti vertikalūs elementai dažnai fotografuojami nepakankamu kampu, todėl jų geometrija atkuriama prasčiau nei horizontalių paviršių. Dėl šios priežasties vertikalių objektų koordinatės gali pasižymėti didesnėmis paklaidomis nei atviri horizontalūs paviršiai (Clapuyt ir kt., 2016; Szypuła B. 2024). Szypuła (2024) pažymi, kad skaitmeninių reljefo ir paviršiaus modelių tikslumui didelę įtaką daro georeferencinių duomenų kokybė, skrydžio geometrija bei kontrolinių taškų išdėstymas. Tyrimas parodė, kad net naudojant RTK technologiją būtina atlikti nepriklausomą tikslumo kontrolę.

Mokslinėje literatūroje vis dažniau nagrinėjama galimybė tradicinius topografinius matavimus pakeisti arba papildyti UAS technologijomis. Daugelis autorių sutaria, kad UAS fotogrametrija gali reikšmingai sumažinti lauko darbų apimtį ir paspartinti duomenų surinkimą. Tačiau taip pat pabrėžiama, kad sudėtingų inžinerinių objektų, požeminių tinklų elementų, vertikalių konstrukcijų bei tankiai apželdintų teritorijų matavimams dažnai vis dar reikalingi papildomi geodeziniai matavimai (Štroner M. ir kt., 2021). Vyrauja nuomonė, kad RTK technologija pagrįstos bepiločių orlaivių sistemos gali efektyviai užtikrinti topografinių ir kartografinių duomenų surinkimą didelėse teritorijose. Vis dėlto, vertinant aukšto tikslumo reikalaujančius inžinerinius objektus, rekomenduojama taikyti kombinuotą geodezinių matavimų metodiką, integruojant UAS fotogrametrijos ir GNSS RTK arba tacheometrinių matavimų duomenis, siekiant sumažinti matavimo neapibrėžtį ir padidinti galutinio erdvinių duomenų rinkinio kokybę (IS..., 2025).

Atlikta mokslinės literatūros analizė parodė, kad nuotoliniai tyrimo metodais gauti matavimai leidžia efektyviai generuoti aukšto tikslumo erdvinių duomenų rinkinius, o RTK technologijos integravimas reikšmingai pagerina jų tikslumą. Tačiau vis dar trūksta tyrimų, vertinančių vertikalių paviršių ir antžeminių inžinerinių tinklų objektų matavimo tikslumą bei UAS ir GNSS RTK metodais gautų duomenų palyginamumą. Nepakankamas temos ištirtumas pagrindžia šio darbo reikšmingumą ir tyrimo poreikį.

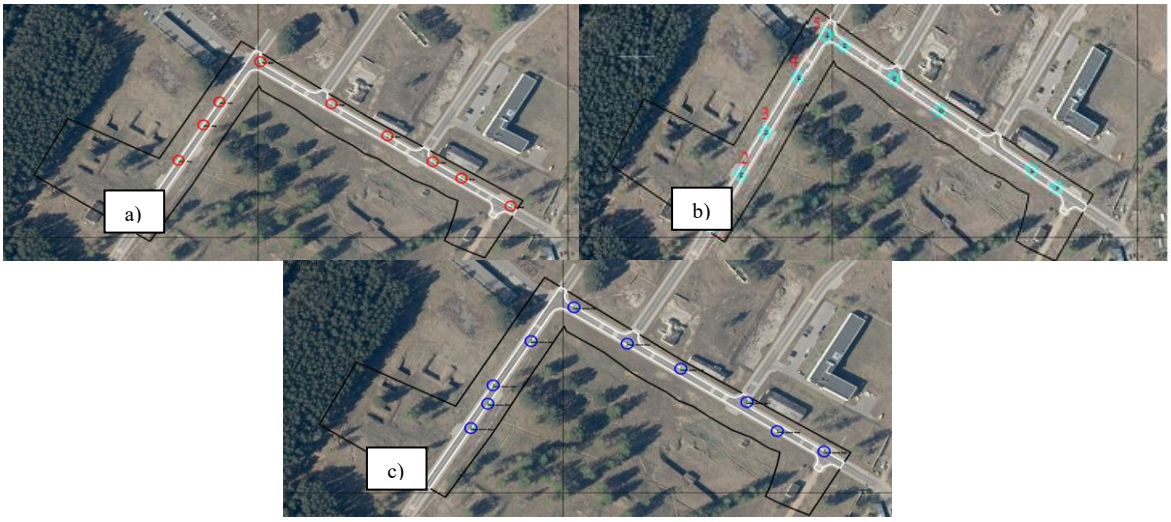
Tyrimų metodika

Darbe taikytas erdvinis ir grafinis modeliavimas, duomenų rinkimo, sisteminimo, analizės, gautų duomenų apibendrinimo ir interpretavimo metodai.

Tyrime surinktų aerofotografinių duomenų apdorojimui buvo naudojama DJI Terra programinė įranga, leidžianti automatizuotai atlikti fotogrametrinį vaizdų apdorojimą, generuoti ortofotoplanus, skaitmeninius paviršiaus modelius (SPM) ir trimačius vietovės modelius, užtikrinant efektyvų bei tikslų geoduomenų parengimą tolesnei analizei. „Agisoft Metashape“ programa atliktas nuotraukų orientavimas, tankaus taškų debesies generavimas bei ortofotoplano ir skaitmeninio paviršiaus modelio sudarymas. Geodezinių matavimų duomenų apdorojimui ir analizei buvo naudojama Geo3D programinė įranga. Jos pagalba atliktas matavimo duomenų apdorojimas, sudaryti reljefo modeliai bei apskaičiuoti tiriamų objektų geometriniai parametrai.

Tyrimas vykdytas gegužės pradžioje, Vilniaus miesto vakarinėje dalyje. Siekiant įvertinti matavimo duomenų tikslumą, buvo pasirinkta urbanizuota teritorija kurioje yra tvirti vietovės paviršiai- šaligatviai, borteliai, asfalto danga, inžinerinių tinklų šuliniai-kameros, ir kita. Šie vietovės objektai pasirinkti ir dėl tos priežasties, kad geodeziškai išmatuojant tokius objektus jiems yra taikomi griežtesni tikslumo reikalavimai, t. y. stambaus mastelio M 1:500 išmatuotų topografinių objektų tvirtų vietovės kontūrų horizontaliosios padėties vidutinė kvadratinė paklaida, turi būti ne didesnė kaip 0,20 m, o vertikalios padėties tvirtų vietovės kontūrų – 0,10 m, kitų paviršių – 0,20 m, su 95 proc. tikimybe.

Tyrimui atlikti vietovėje pažymėti taškai – 10 bortelių ir 10 kelio taškų (1a pav.), bei 10 šulinių-kamerų dangčių esančių kelio viduryje (1b pav.), bei analogiškai 10 šulinių -kamerų dangčių esančių kelio krašte (1c pav.).



1 pav. Pasirinktos vertikaliųjų pjūvių vietos: a) ties šaligatvio borteliais; b) šuliniai gatvės viduryje; c) šuliniai gatvės krašte;
Šaltinis: sudaryta autorių

Išmatuoti šaligatvio bortelių aukščius buvo pasirinkta neatsitiktinai, nes matavimo tikslumas labai priklauso nuo matuojamojo paviršiaus. Matavimo duomenų tikslumas priklauso nuo vietovės reljefo charakteristikų, kadangi didesni aukščių skirtumai ir reljefo heterogeniškumas gali lemti didesnį rezultatų neapibrėžtumą. Tikslumui įvertinti pasirinkta 20 gatvėje esančių antžeminių inžinerinių komunikacijų šulinių/kamerų dangčių, kurie sugrupuoti į šulinius gatvės viduryje (1b pav) ir šulinius gatvės krašte (1c pav.). Taško tikslumo įvertinimui horizontalioje padėtyje, buvo pasirinkti 5 šuliniai gatvės viduryje (1b pav).

Duomenų rinkimui buvo naudojama bepiločio orlaivio sistema su DJI Matrice 350 RTK platforma ir DJI Zenmuse L2 jutikliu. Skrydžiai vykdyti naudojant DJI Pilot 2 programinę įrangą. Pasirinktoje teritorijoje buvo pažymėti 3 planiniai kontūrženkliai ties tvirtais vietovės kontūrais. Žymint planinius kontūrženklius atsižvelgta, kad virš žymimų vietų nebūtų elektros laidų, ar kitų aukštų objektų. Kontūrženklio žymens forma –pasirinkta „x“ kadangi tokiu ženklu pažymėtas kontūrženklis, gerai matosi ir turi fiksuotą susikirtimo tašką, kurį lengva sutapdinti su skrydžio metu užfiksuotomis nuotraukomis. Buvo nustatyti šie skrydžio parametrai: 60 m aukštis virš žemės paviršiaus ir 6,3 m/s greitis. Esant šioms sąlygoms, pasiekta ortofotografinių vaizdų skiriamoji geba (GSD) siekė 2,20 cm/px, užtikrinant aukštą duomenų detalumą ir tinkamumą tolesniam fotogrametriniam apdorojimui bei skaitmeninių paviršiaus modelių sudarymui. Tiriamojo objekto plotas – 0,42 ha.

Ortofotografinio plano sudarymui buvo panaudoti UAS surinkti duomenys, kurių apdorojimas atliktas naudojant Agisoft Metashape programinę įrangą. Parengto ortofotografinio plano rezoliucija siekė 32161 × 20677 pikselių, erdvinė skiriamoji geba (GSD) – 2,20 cm/pixel, užtikrinant aukštą erdvinį detalumą. UAS matavimo tikslumas vertintas analizuojant aukščių skirtumus; esant RTK korekcijoms, tikėtinas vertikalus tikslumas siekiantis kelių centimetrų ribą.

Matavimų tikslumui įvertinti naudoti tiriamo objekto GNSS matavimų duomenys, surinkti naudojant Topcon HiPer SR imtuvą. Matavimai atlikti naudojant LitPOS-RTK realaus laiko kinematinį (RTK) metodą, kai korekcijos gaunamos iš nacionalinės nuolat veikiančios GNSS stočių sistemos, o duomenys perduodami GSM ryšiu, radijo bangomis arba internetu. Šios korekcijos leidžia realiuoju laiku nustatyti matuojamų taškų padėtį ir užtikrinti jų centimetro lygio tikslumą (1–3 cm).

Matavimų tikslumui įvertinti buvo atlikta skirtingais metodais nustatytų taškų planinių koordinačių analizė, apskaičiuoti koordinačių skirtumai bei įvertintas bendras horizontaliosios padėties tikslumas. Analogiškai buvo analizuoti taškų aukščiai, apskaičiuoti aukščių skirtumai ir įvertintas vertikaliosios padėties nustatymo tikslumas.

Rezultatai

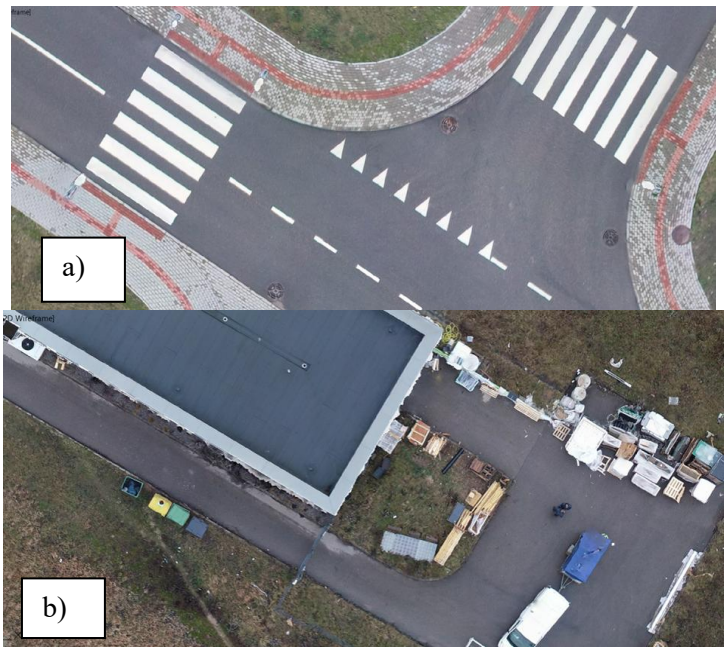
Tyrimo metu Vilniaus mieste esančios gatvės vakarinė dalis buvo išmatuota geodeziniais ir nuotoliniais fotogrametriniais metodais. Matavimai atlikti gegužės 5 d., esant vidutiniam debesuotumui, 13 °C oro temperatūrai ir 4 m/s vėjo greičiui. Išmatuotos teritorijos plotas sudaro 42 arus. Nuotolinių matavimų metu gauti duomenys buvo apdoroti programine įranga „Agisoft Metashape“, o galutiniame rezultate suformuoti ortofotografinis planas ir 3D taškų debesis (2 pav.).



2 pav. Tiriamojo objekto ortofotografinis planas
Šaltinis: sudaryta autorių

Tyrimo metu parengto ortofotografinio plano matmenys yra 32161 × 20677 pikselių. Gauta skiriamoji geba (GSD) siekia 1,71 cm/pikseliui. Tai reiškia, kad kiekvienas pikselis atitinka 1,71 cm realiame paviršiuje, todėl smulkiausių objektų identifikavimo detalumas priklauso nuo šios reikšmės.

Iš gauto ortofotografinio plano galima identifikuoti tiek gamtinius, tiek antropogeninius vietovės objektus, apimančius reljefo, žemės dangos, augmenijos, hidrografinius elementus bei inžinerinę ir urbanistinę infrastruktūrą. Dėl aukštos erdvinės skiriamosios gebos sudaromos prielaidos detaliai teritorijos analizei, objektų skaitmeniniam išskyrimui bei jų klasifikavimui, užtikrinant geometrinį ir erdvinį duomenų tikslumą (3 pav).



3 pav. Aukštos erdvinės skiriamosios gebos ortofotografinio plano dalis su tvirtais vietovės kontūrais: a – šaligatviai ir važiuojamoji danga; b – pastatas, asfaltuota aikštelė
Šaltinis: sudaryta autorių

Nors gautame ortofotografiniame plane gana ryškiai matomi pastatų kontūrai, tačiau tiksliai pastato kampo padėties, dėl atsiradusių deformuotų plotų prie pastatų kampų, kur žemės paviršiaus ir pastato aukščio peraukštėjimas yra 15 m ir daugiau, nustatyti neįmanoma.

Ortofotografinio plano tikslumui įvertinti buvo panaudoti penki kontroliniai taškai (1b pav.), kurių koordinatės nustatytos GNSS matavimais ir iš ortofotografinio plano gautais duomenimis (1 lentelė).

1 lentelė

Nuotoliniais tyrimo metodais nustatytos taškų koordinatės ir jų neatitikimai

Išmatuoto taško numeris	X GNSS	X UAS	Y GNSS	Y UAS	fx, (m)	fy, (m)
1	6069354,15	6069354,14	590840,47	590840,43	0,01	0,04
2	6069397,54	6069397,55	590865,76	590865,72	-0,01	0,04
3	6069433,40	6069433,36	590887,80	590887,83	0,04	-0,03
4	6069479,92	6069479,89	590916,95	590916,91	0,03	0,04
5	6069515,80	6069515,81	590940,58	590940,58	-0,01	0,00

Šaltinis: sudaryta autorių

Iš GNSS ir UAS matavimų apskaičiuoti koordinačių skirtumai parodė nedidelius rezultatų neatitikimus. X koordinatės skirtumai kito nuo –0,04 m iki 0,04 m, o Y koordinatės skirtumai – nuo –0,03 m iki 0,04 m. Didžiausias nustatytas skirtumas abiejų koordinačių atžvilgiu siekė 0,04 m, o mažiausias – 0,00 m. Atlikus koordinačių skirtumų analizę nustatyta, kad vidutinė kvadratinė paklaida X koordinatės atžvilgiu siekė 0,026m (2,6 cm), Y koordinatės atžvilgiu – 0,032m (3,2 cm), o bendra planinė vidutinė kvadratinė paklaida sudarė 0,041m (4,1 cm.) Gauti rezultatai rodo gerą GNSS ir UAS matavimų tarpusavio atitiktį bei pakankamą tikslumą objektų planinei padėčiai nustatyti.

Darbo metu taip pat buvo sugeneruotas taškų debesies masyvas (4 pav.).



4 pav. Iškarpa iš tiriamojo darbo metu sugeneruoto taškų debesies masyvo
Šaltinis: sudaryta autorių

Taškų debesis – tai erdvėje išsidėsčiusių taškų rinkinys, naudojamas objektų ir vietovės paviršiaus geometrijai atvaizduoti. Kiekvienas taškas apibūdinamas trimatėmis koordinatėmis X, Y ir Z. Atlikus duomenų apdorojimą buvo sugeneruotas 60 000 taškų debesis.

Sudarant erdvinių topografinių duomenų rinkinius, svarbu tiksliai nustatyti taškų aukščius. Siekiant įvertinti UAS matavimų tikslumą, buvo analizuojami gatvės kietųjų dangų elementų – šaligatvių ir bortelių – aukščių skirtumai, lyginant juos su GNSS matavimų duomenimis. Toks vertinimas pasirinktas todėl, kad fotogrametrinių matavimų tikslumas priklauso nuo vietovės reljefo ir paviršiaus ypatybių. Didėjant reljefo įvairovei ir aukščių skirtumams, didėja matavimo netikslumų tikimybė tiek ortofotografiniame plane, tiek sugeneruotame taškų debesyje.

Sugeneruoto taškų debesies vertikaliajam tikslumui įvertinti buvo analizuota 10 vertikaliųjų pjūvių. GNSS matavimais nustatyta, kad didžiausias šaligatvio bortelio aukštis LAS07 aukščių sistemoje siekė 147,26 m (1 taškas), o mažiausias – 139,44 m (10 taškas). Nors aukščiausi ir žemiausi taškai GNSS ir UAS duomenyse sutapo, jų aukščių reikšmės skyrėsi (2 lentelė).

2 lentelė

Išmatuotų taškų aukščių skirtumai

Išmatuoto taško Nr.	Kieto paviršiaus viršaus aukštis GNSS, (m)	Kieto paviršiaus apačios aukštis GNSS, (m)	Δh, (m)	Kieto paviršiaus viršaus aukštis UAS, (m)	Kieto paviršiaus apačios aukštis UAS, (m)	Δh', (m)	Aukščio neatitikimas fh, (m)
1	147,26	147,15	0,11	147,26	147,22	0,04	0,07
2	145,58	145,46	0,12	145,58	145,51	0,07	0,05
3	144,33	144,21	0,12	144,28	144,24	0,04	0,08
4	143,92	143,80	0,12	143,87	143,84	0,03	0,09
5	144,54	144,45	0,09	144,50	144,45	0,05	0,04
6	145,38	145,27	0,11	145,31	145,25	0,06	0,05
7	144,05	143,95	0,10	144,00	143,98	0,02	0,08
8	142,39	142,27	0,12	142,38	142,34	0,04	0,08
9	141,42	141,28	0,14	141,39	141,36	0,03	0,11
10	139,57	139,44	0,13	139,64	139,60	0,04	0,09

Šaltinis: sudaryta autorių

Išanalizavus šaligatvio bortelių aukščių skirtumus nustatyta, kad viršutinės bortelio briaunos aukščiai, gauti GNSS ir UAS metodais, tarpusavyje gerai sutampa. Daugeliu atvejų jų skirtumai neviršijo 0,04–0,05 m, tačiau didesni neatitikimai nustatyti apatinėje bortelio dalyje, t. y. asfaltuotos dangos paviršiuje, kur aukščių skirtumai kai kuriais atvejais siekė iki 0,16 m. Tikėtina, kad šiuos skirtumus lėmė fotogrametrinio metodo jautrumas vertikaliems paviršiams ir staigiems aukščių pokyčiams. UAS surinkti duomenys tiksliau atvaizduoja geriau matomus ir aukščiau esančius paviršius, o žemiau esančių objektų elementų aukščiai gali būti nustatomi su didesne paklaida. Nustatyta, kad vidutinis GNSS matavimais apskaičiuotas bortelio aukštis siekė 0,12 m, o nustatytas didžiausias skirtumas tarp GNSS ir UAS metodais apskaičiuotų šaligatvio bortelio aukščių skirtumų gautas 4 ir 10 taškuose – 0,09 m. Mažiausias skirtumas nustatytas 5-ajame taške – 0,04 m. Vidutinė GNSS ir UAS matavimų skirtumų reikšmė siekė 0,072 m. Apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida (RMSE) sudarė 0,075 m (7,5 cm). Gauti rezultatai rodo, kad UAS fotogrametriniu metodu nustatyti šaligatvio bortelio aukščių skirtumai sistemingai yra mažesni nei GNSS matavimų rezultatai. Tai rodo fotogrametrinio modelio sisteminį efektą, kai staigūs vertikalūs paviršiaus perėjimai yra sušvelninami dėl skaitmeninio paviršiaus modelio interpoliacijos ir riboto smulkių geometrinių detalių atvaizdavimo. Nustatyta RMSE reikšmė rodo vidutinį atitikimą tarp GNSS ir UAS metodų, leidžiantį teigti, kad UAS duomenys yra tinkami bendram topografiniam modeliavimui, tačiau mažiau tikslūs smulkių vertikalių elementų, tokių kaip šaligatvio borteliai, aukščių nustatymui.

Taško padėties aukščio atžvilgiu įvertinimui pasirinkta 20 gatvėje esančių antžeminių inžinerinių komunikacijų šulinių (kamerų) dangčių, kurie suskirstyti į dvi grupes: šulinius, esančius gatvės viduryje (1b pav.), ir šulinius, esančius gatvės krašte (1c pav.). Nustatyta, kad gatvės viduryje esantys šuliniai dėl savo padėties asfaltbetonio dangos paviršiuje pasižymi geresniu geometriniu atitikimu su taškų debesimi, todėl jų aukščių nustatymo tikslumas yra didesnis. Tuo tarpu gatvės kraštuose esantys šuliniai pasižymi mažesniu matavimo tikslumu, nes šalia jų esantis šaligatvio bortas sukelia vietinius reljefo geometrinius iškraipymus fotogrametriniame modelyje. Atlikus pirmosios grupės šulinių matavimų analizę nustatyta, kad GNSS ir UAS metodais išmatuoti aukščiai LAS07 aukščių sistemoje sutampa, o didžiausia reikšmė nustatyta 1 taške, mažiausia – 10 taške (4 lentelė).

4 lentelė

Išmatuoti taškai LAS07 aukščių sistemoje bei kiti matematiniai tikslumo parametrai

Išmatuoto taško Nr.	Šulinio aukštis GNSS, (m)	Šulinio aukštis UAS, (m)	Aukščio neatitikimas fh, (m)
1	2	3	4
1	147,30	147,32	-0,02
2	146,33	146,32	0,01
3	144,98	144,95	0,03

Išmatuoto taško Nr.	Šulinio aukštis GNSS, (m)	Šulinio aukštis UAS, (m)	Aukščio neatitikimas fh, (m)
4	143,83	143,81	0,02
5	144,46	144,42	0,04
6	144,40	144,36	0,04
7	145,29	145,21	0,08
8	144,62	144,56	0,06
9	141,33	141,31	0,02
10	140,43	140,42	0,01

Šaltinis: sudaryta autorių

Didžiausias matavimų neatitikimas tarp GNSS ir UAS metodais nustatytų šulinių aukščių siekė 0,08 m ir buvo nustatytas 7-ajame taške. Mažiausi skirtumai gauti 2-ajame ir 10-ajame taškuose – po 0,01 m. Apskaičiuota vidutinė visų matavimų skirtumų reikšmė sudarė 0,029 m (2,9 cm), kas rodo nedidelį sisteminį UAS matavimų poslinkį GNSS atžvilgiu.

Matavimų tikslumui įvertinti apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida, kuri siekė 0,039 m (3,9 cm). Gauti rezultatai rodo aukštą GNSS ir UAS matavimų tarpusavio atitikimą taško aukščio atžvilgiu. Nustatyti nedideli skirtumai gali būti siejami su modelio interpoliacijos ypatybėmis bei lokaliais paviršiaus geometriniais iškraipymais.

Išmatavus 2-ojo pogrupio, t. y. gatvės kraštuose esančių šulinių, aukščius GNSS ir UAS metodais, nustatytas didžiausias aukščių skirtumas siekė 0,05 m. 10-ajame matavimo taške šulinio dangčio aukštis abiem metodais sutapo ir sudarė 139,97 m (5 lentelė).

5 lentelė

Išmatuoti antro pogrupio šulinių taškai LAS07 aukščių sistemoje bei kiti matematiniai tikslumo parametrai

Išmatuoto taško Nr.	Šulinio aukštis GNSS, (m)	Šulinio aukštis UAS, (m)	Aukščio neatitikimas fh, (m)
1	146,04	146,02	0,02
2	145,22	145,18	0,04
3	144,62	144,58	0,04
4	143,79	143,75	0,04
5	144,33	144,28	0,05
6	145,20	145,15	0,05
7	144,63	144,59	0,04
8	142,46	142,42	0,04
9	141,40	141,37	0,03
10	139,97	139,97	0,00

Šaltinis: sudaryta autorių

Nustatyta, kad GNSS ir UAS metodais išmatuotų šulinių dangčių aukščių skirtumų vidurkis siekia 0,035 m, o vidutinė kvadratinė paklaida – 0,038 m (3,8 cm). Tai rodo nedidelį, tačiau sisteminį UAS matavimų nuokrypį GNSS atžvilgiu ir gerą metodų tarpusavio atitikimą. Palyginus pogrupius nustatyta, kad šulinių matavimai gatvės viduryje yra vidutiniškai apie 1 cm tikslesni nei gatvės kraštuose. Tai siejama su lygesniu paviršiumi gatvės viduryje, o kraštuose esantis šaligatvio bortas (10–14 cm) sukelia didesnius modelio iškraipymus. Gauti rezultatai neviršijo normatyvinių vidutinės kvadratinės paklaidos ribų t. y. stambaus mastelio M 1:500 išmatuotų topografinių objektų tvirtų vietovės kontūrų horizontaliosios padėties vidutinė kvadratinė paklaida, turi būti ne didesnė kaip 0,20 m, o vertikalios padėties tvirtų vietovės kontūrų – 0,10 m, kitų paviršių – 0,20 m, su 95 proc. tikimybe (Topografinių…, 2023), todėl UAS fotogrametrijos metodas laikytinas tinkamu taško padėties erdvinės padėties nustatymui. Neanalizuotas taško padėties nustatymo tikslumas kituose paviršiuose. Tačiau siekiant užtikrinti matavimų kontrolę tikslinga taikyti kombinuotus matavimų metodus.

Išvados

1. Atlikus koordinačių skirtumų analizę nustatyta, kad vidutinė kvadratinė paklaida X koordinatės atžvilgiu siekė 0,026m (2,6 cm), Y koordinatės atžvilgiu – 0,032m (3,2 cm), o bendra planinė vidutinė kvadratinė paklaida sudarė 0,041m (4,1 cm.). Gauti rezultatai rodo gerą GNSS ir UAS matavimų tarpusavio atitiktį bei pakankamą tikslumą objektų planinei padėčiai nustatyti.

2. Palyginus ir įvertintinus 10 vertikalių taškų debesies pjūvių, nustatytas vidutinis GNSS imtuvu išmatuotas bortelio aukštis – 0,12m, UAS – 0,04 cm. Gautas vidutinis aukščių neatitikimas – 0,072m, apskaičiuota vidutinė kvadratinė paklaida – 0,075 m (7,5 cm).

3. Palyginus kietų paviršių aukščio matavimus nustatyta, kad vidutiniškai nuotoliniais matavimais išmatuotas aukštis nuo GNSS matavimų pirmuoju atveju skiriasi 0,03 m, antruoju – 0,04 m. Apskaičiuotos matuotų taškų vidutinės kvadratinės paklaidos – 0,039 m (3,9cm) ir 0,038m(3,8cm).

4. Gauti rezultatai neviršijo maksimalios vidutinės kvadratinės paklaidos ribų t. y. stambaus mastelio M 1:500 išmatuotų topografinių objektų tvirtų vietovės kontūrų horizontaliosios padėties vidutinė kvadratinė paklaida, turi būti ne didesnė kaip 0,20 m, o vertikalios padėties tvirtų vietovės kontūrų – 0,10 m, kitų paviršių – 0,20 m, su 95 proc. tikimybe, todėl UAS fotogrametrijos metodas laikytinas tinkamu tvirtų vietovės kontūrų taško padėties erdvinės padėties nustatymui. Tai neanalizuotas taško padėties nustatymo tikslumas kituose paviršiuose. Tačiau siekiant užtikrinti matavimų kontrolę tikslinga taikyti kombinuotus matavimų metodus.

Literatūra

1. Alshawabkeh, Y., El-Khalili, M., Almasri, E., Barakat, B. ir Al-Hannawi, M., 2021. Accuracy Assessment of Low-Cost UAV Photogrammetry. Alexandria Engineering Journal, 60(6), p. 5579–5590.
2. Chen, J., Zhao, X., Liu, C., Zhu, S., Liu, Z. ir Dongjie, X., 2021. Evaluating the Latest Performance of Precise Point Positioning in Multi-GNSS/RNSS: GPS, GLONASS, BDS, Galileo and QZSS. The Journal of Navigation, 74(1), p. 247–267. https://doi.org/10.1017/S0373463320000508
3. Clapuyt, F., Vanacker, V. ir Van Oost, K., 2016. Reproducibility of UAV-based Earth Topography Reconstructions Based on Structure-from-Motion Algorithms. Geomorphology, 260, p. 4–15. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011
4. Is RTK drone scanning actually better for road feasibility and topographic studies?, 2025 [interaktyvus]. Reddit. Prieiga per internetą:
https://www.reddit.com/r/civilengineering/comments/1s7pwkf/is_rtk_drone_scanning_actually_better_for_road/
5. Mulakala, J., 2019. Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry [interaktyvus]. DJI Enterprise White Paper. Prieiga per internetą: https://docs.djicdn.com/DJI+Enterprise/measurement-accuracy-dji-phantom-4-rtk-whitepaper-f.pdf
6. Niu, Z., Li, X., Zhang, Y. ir kt., 2024. Accuracy Assessment of UAV Photogrammetry System with RTK Measurements for Direct Georeferencing. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-1-2024, p. 169–176.
7. Stroner, M., Urban, R., Seidl, J., Kotek, P., Nedvěd, O., Lidmila, M. ir kt., 2021. Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without Ground Control Points. Remote Sensing, 13(7), 1336. https://doi.org/10.3390/rs13071336
8. Sužiedelytė-Visockienė, J., Puzienė, R. ir Stanionis, A., 2016. Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry: Analysis of Orthophoto Images over the Territory of Lithuania. International Journal of Aerospace Engineering, 2016, Article ID 8729854.
9. Szypuła, B., 2024. Accuracy of UAV-based DEMs without Ground Control Points. GeoInformatica, 28(1), p. 1–26. https://doi.org/10.1007/s10707-023-00498-1
10. Tamminga, A.D., Eaton, B.C. ir Hutton, E.W.H., 2016. Spatial Accuracy of UAV-Derived Orthoimagery and Topography. Geomatica, 70(4), p. 223–236.
11. Topografinių objektų geodezinių matavimų atlikimo ir topografinių planų sudarymo tvarkos aprašas. 2023. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymas Nr. D1-284, 2023 m. rugpjūčio 29 d. Vilnius.

A STUDY ON THE APPLICATION OF REMOTE SENSING TO ASSESS THE ACCURACY OF MEASURED TOPOGRAPHIC SPATIAL DATA

Summary

The study aims to evaluate the accuracy of spatial datasets generated using remote sensing methods and their compliance with the requirements for the preparation of large-scale topographic maps. The objective of this work is to determine the accuracy of spatial data generated using remote sensing methods. Objectives: to compare the accuracy of spatial data on terrain features obtained using remote sensing methods (UAS photogrammetry and LiDAR) and GNSS RTK methods. The study involved spatial and graphical modeling, as well as the synthesis and interpretation of the obtained data. An orthophotographic map was created using remote sensing methods to determine the horizontal position of points, and a point cloud was generated to determine their vertical positions. To determine the accuracy of the spatial data obtained using remote sensing methods, GNSS measurements were performed using the LitPos-RTK method. The results obtained did not exceed the maximum mean square error limits; that is, for topographic features measured at a large scale of 1:500, the mean square error for the horizontal position of fixed terrain contours must not exceed 0.20 m, while the mean square error for the vertical position of fixed terrain features is 0.10 m, and for other surfaces, 0.20 m, with a 95% confidence level; therefore, the UAS photogrammetry method is considered suitable for

determining the spatial position of fixed terrain features. The accuracy of point position determination on other surfaces was not analyzed. However, to ensure measurement control, it is advisable to use combined measurement methods.

Key words: Unmanned aerial vehicle system (UAS), GNSS, LIDAR, measurements, orthophoto, point cloud, accuracy.

IDENTIFICATION AND COMPARISON OF WATERLOGGED AREAS IN DRAINED LAND USING DIFFERENT REMOTE SENSING METHODS

Daiva Gudritienė, Vilma Šalkauskienė
Lietuvos Inžinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

The deterioration of drainage systems and insufficient maintenance have led to increasingly frequent problems of waterlogged areas, making the application of reliable identification methods highly relevant. The aim of this study was to identify waterlogged areas in the Vandžiogala and Alovė cadastral areas using different remote sensing and mapping methods and to compare the resulting spatial datasets. The study utilized the Mel_DR10LT dataset, the ORT10LT orthophoto map, and information collected during field surveys.

The results revealed that the problem of waterlogging is more pronounced in the Alovė cadastral area than in the Vandžiogala cadastral area. The highest agreement between methods was found between the office-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map and the field survey dataset (75.2%). The study also showed that waterlogged areas most commonly occur in terrain depressions, near drainage ditches, and within cultivated agricultural land. The findings indicate that the MEL_DR10LT dataset is suitable for the preliminary identification of problematic areas; however, more accurate results are obtained through the interpretation of ORT10LT orthophoto maps and field surveys. The most reliable assessment of waterlogged reclaimed land is achieved by combining all applied methods.

Key words: Land drainage, waterlogged areas, ORT10LT, Mel_DR10LT, spatial data analysis.

Introduction

The territory of the Republic of Lithuania is located within a zone of excess moisture; therefore, drainage systems are of particular importance in the country. Due to the large extent of naturally wet areas, a significant part of the country has been drained through subsurface drainage systems. Excessively wet land accounts for approximately 52% of Lithuania's territory, making efficiently functioning drainage systems essential for agricultural production and infrastructure development. Studies indicate that drainage systems help maintain the productivity of agricultural land, provide suitable soil moisture and aeration conditions for plant growth, facilitate soil cultivation and harvesting operations, and contribute to mitigating the adverse effects of climate change (Valčiukienė et al., 2025).

The primary purpose of the installation and operation of drainage systems is to create favorable conditions for sustainable land use and to ensure an optimal soil water regime. One of the most important functions of drainage systems is the prevention of waterlogging, as excessive soil moisture negatively affects plant growth, disrupts nutrient uptake, and reduces crop yields (Islam et al., 2022). Another important function is the regulation of soil moisture, which ensures favorable conditions for crop development and efficient agricultural production. Controlled drainage is increasingly applied in modern drainage systems, allowing groundwater levels to be adjusted according to different stages of plant growth and thereby creating optimal conditions for crop development (Kęsicka et al., 2023).

Drainage systems also play a significant role in reducing soil salinity by facilitating the removal of excess salts from the plant root zone. When drainage networks function inadequately or are insufficiently developed, salts accumulate in the soil, leading to the deterioration of its physical and chemical properties, reduced productivity, and lower crop yields. Over time, such areas may become unsuitable for agricultural use (Kannazarova et al., 2024; Sun et al., 2025). Furthermore, properly designed and maintained drainage systems contribute to soil erosion control, improve water infiltration, and reduce the risk of soil compaction, thereby promoting sustainable land use and maintaining the long-term productivity of agricultural land (Fajeriana et al., 2024).

Aim of the study: To identify waterlogged areas in the Vandžiogala and Alovė cadastral areas using different remote sensing and mapping methods and to compare the resulting spatial datasets.

Objectives of the study: 1. To identify waterlogged areas in the Vandžiogala and Alovė cadastral areas through office-based and field interpretation of ORT10LT orthophoto imagery. 2. To compare the spatial datasets generated by office-based and field interpretation methods and evaluate their level of agreement within each cadastral area. 3. To assess the suitability of different remote sensing and mapping approaches for identifying waterlogged areas and evaluating drained agricultural land.

Theoretical background

In Lithuania, drained agricultural land covers approximately 2.978 million hectares, accounting for nearly half of the country's territory and about 87% of all agricultural land. Most drainage systems were installed between 1960 and 1990; therefore, they are now heavily deteriorated and often no longer ensure

the efficient removal of excess water from the soil. Due to insufficient funding, the condition of drainage infrastructure continues to decline, resulting in increasingly frequent problems associated with waterlogged land.

According to scientific literature, failures of drainage systems are most commonly manifested by changes in soil moisture conditions, surface water accumulation, and alterations in vegetation cover. Signs of malfunction can be identified both during field surveys and through the analysis of orthophoto maps and other remote sensing data. Previous studies have shown that water removal is often impeded in such areas due to clogged or damaged drainage systems. Surface water ponding is most frequently observed in terrain depressions or in locations where drainage collectors are no longer functioning properly and drainage ditches have become overgrown. As a result, these areas become more difficult to cultivate, while excessive soil moisture persists for extended periods (Abalikštienė et al., 2024).

Another important indicator of waterlogging is altered or uneven vegetation growth. In waterlogged areas, plants often exhibit reduced growth, lower density, and uneven development. Oxygen deficiency in the soil weakens root systems, reducing crop resistance to environmental stress. In some locations, vegetation characteristic of wet habitats may develop, whereas in severely waterlogged areas certain crops may fail to germinate altogether (Zhang et al., 2025; Shaheenir et al., 2025; Kummar et al., 2026). Surface runoff and soil erosion are also commonly associated with drainage system failure. When soil drainage processes are impaired, water is unable to infiltrate effectively and instead flows across the soil surface, removing the fertile top-soil layer. This leads to reduced soil productivity, deterioration of soil structure, and increased sediment accumulation in lower-lying areas and drainage ditches (Mukhopadhyay et al., 2025). The risk of soil erosion is particularly high in sloping terrain (Du et al., 2021).

An analysis of previous studies on the causes and impacts of waterlogged land indicates that this issue is not limited to Lithuania but is widespread across many European countries. The renovation and reconstruction of drainage systems require accurate identification of waterlogged areas, assessment of waterlogging intensity, determination of the underlying causes, and the availability of reliable spatial data describing the condition of drained land. Waterlogging of agricultural land is influenced by several interrelated factors, including climate conditions, precipitation patterns, groundwater levels, and soil characteristics. In recent years, waterlogging problems have become more frequent due to increasing precipitation intensity and prolonged periods of excessive moisture. The main factors contributing to waterlogging include terrain characteristics, high groundwater levels, soil compaction, inefficient drainage systems, and poorly permeable soil layers (Kaur et al., 2020; Merchán et al., 2026).

Currently, spatial data and remote sensing methods are increasingly used for the identification of waterlogged areas. Orthophoto maps and spatial datasets describing drainage conditions enable faster assessment of problematic areas, comparison of data from different sources, and more accurate identification of potential waterlogging zones (Černiauskas, 2025). Remote sensing is used to collect information about a territory without direct physical contact. These methods provide valuable information on land cover, topography, vegetation, and other environmental characteristics. Remote sensing also enables the acquisition of land condition data without conducting field surveys and facilitates the analysis of large or difficult-to-access areas (Forkuor et al., 2017). Commonly applied techniques for identifying waterlogged areas include orthophoto imagery, satellite data, LiDAR technology, and digital elevation models (Bednář et al., 2023; Lillesand et al., 2015; den Besten et al., 2021).

The review of scientific literature revealed that the formation of waterlogged areas is influenced by a combination of natural and anthropogenic factors, while the technical condition of drainage systems plays a particularly important role. Waterlogged areas have been shown to negatively affect soil properties, plant growth, and the productivity of agricultural land; therefore, their identification is essential for efficient land management. Previous studies indicate that remote sensing methods and spatial datasets provide effective tools for the rapid identification of problematic areas and for the assessment of drained agricultural land conditions.

Research Methodology

The study was conducted in the Vandžiogala cadastral area of Kaunas District Municipality and the Alovė cadastral area of Alytus District Municipality. Three spatial datasets were used for the identification of waterlogged areas and the assessment of drained agricultural land.

The first dataset was the national 1:10,000 scale spatial dataset of drainage condition and waterlogging (Mel_DR10LT) of the Republic of Lithuania (Lietuvos Respublikos..., 2025). This dataset contains mapped areas of poorly functioning drained land within the study areas and is publicly available through the Lithuanian Spatial Information Portal.

The second spatial dataset was created using office-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map. During the interpretation process, waterlogged areas were identified and delineated based on direct and indirect interpretation indicators, including color and shape characteristics. Developing waterlogged areas were recognized by darker irregularly shaped patches, visible standing water, signs of crop damage caused by excess moisture, the absence of cultivation traces, the presence of wetland vegetation, and terrain depressions.

The third spatial dataset was created using field interpretation of the ORT10LT orthophoto map. Field surveys were carried out in the spring of 2026, during which the entire study area was inspected. Information collected during the field survey was recorded on the most recent orthophoto map by preparing field sketches, which were subsequently used to create a polygon-based spatial dataset.

After the spatial datasets had been compiled, spatial and statistical analyses were performed using Geographic Information Systems (GIS). The analysis focused on the number of waterlogged areas, their total area, spatial distribution, and waterlogging categories. These data were stored as attribute information within vector datasets, enabling the application of GIS analytical functions, including attribute-based queries, statistical calculations, and spatial overlay analyses to determine the degree of overlap between different datasets. In addition, similarities and differences among datasets produced using different methods within the same study area were evaluated.

To assess the severity of waterlogging in greater detail, waterlogged areas were classified into three categories. The classification was based on visible signs of waterlogging, vegetation condition, and evidence of agricultural machinery activity. Waterlogged areas were classified as follows: 1. Slightly waterlogged areas – areas showing minor signs of waterlogging, still suitable for agricultural use; waterlogging occurs mainly during wet years, and crops exhibit damage or poor growth. 2. Moderately waterlogged areas – areas showing more pronounced signs of waterlogging; agricultural machinery avoids these areas, resulting in the absence of visible tramlines. 3. Severely waterlogged areas – areas where shrubs, woodland, or wetland vegetation have developed and where agricultural activities have not been carried out for more than three years.

Results and Discussion

The selected cadastral areas are located in different regions of Lithuania. The Vandžiogala cadastral area is situated in central Lithuania, whereas the Alovė cadastral area is located in the southern part of the country. The terrain of the Vandžiogala cadastral area is predominantly flat, while the Alovė cadastral area is characterized by a more pronounced relief, with elevations ranging from 126 m to 150 m above sea level.

The study areas differ only slightly in terms of soil texture. In the Vandžiogala cadastral area, the dominant soil types are medium loam, sandy loam, and loamy sand, whereas sandy loam and loamy sand prevail in the Alovė cadastral area. The total study area covered approximately 11,870 ha. Although the Alovė cadastral area is larger, a substantial portion of its territory is covered by forests; therefore, the extent of drained agricultural land is similar in both study areas.

According to the national 1:10,000 scale spatial dataset of drainage condition and waterlogging (Mel_DR10LT), 62 areas of poorly functioning drained land were identified in the Vandžiogala cadastral area, covering a total of 162.16 ha. In comparison, 95 such areas were identified in the Alovė cadastral area, occupying approximately 288 ha. These results indicate that both the number and total area of poorly functioning drained land are greater in the Alovė cadastral area than in the Vandžiogala cadastral area (Figure 1).

In both study areas, light-textured soils predominate. Such soils are generally characterized by relatively high water permeability; therefore, the occurrence of waterlogging is more often associated with the technical condition of drainage systems, deterioration of drainage networks, and terrain characteristics rather than with soil properties themselves.

Through office-based interpretation of the orthophoto map, 41 waterlogged areas with a total area of 24.26 ha were identified in the Vandžiogala cadastral area. In the Alovė cadastral area, 148 waterlogged areas were identified using the same method, covering a total area of approximately 73.0 ha. A comparison of the two study areas revealed that the number of waterlogged areas in Alovė was more than three times higher than in the Vandžiogala cadastral area. These results indicate a greater extent of waterlogging and a wider distribution of waterlogged areas in the Alovė cadastral area.

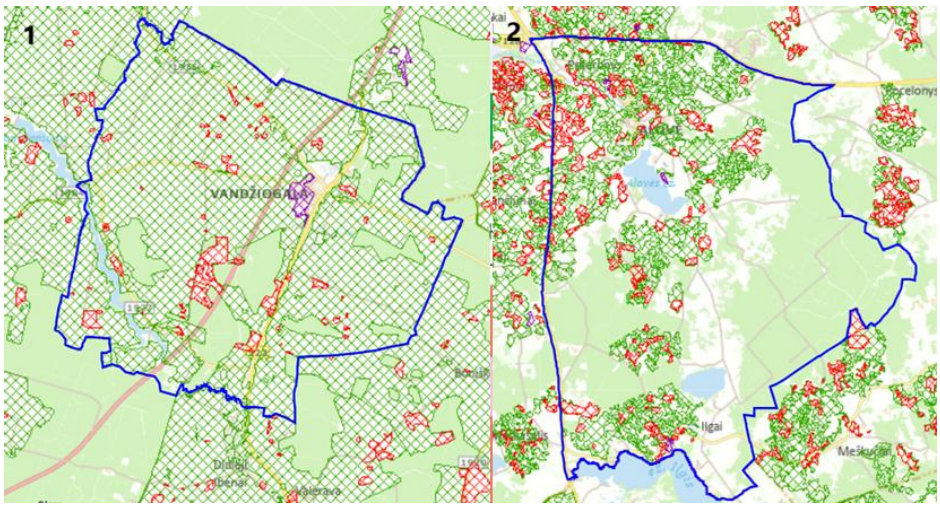


Fig. 1. Areas of poorly functioning drained land identified in the Mel_DR10LT spatial dataset in the Vandžiogala (1) and Alovė (2) cadastral areas
Source: compiled by the authors

To verify the accuracy of the spatial data obtained through office-based interpretation, field surveys were conducted. During the field investigation, clear signs of excessive soil moisture were observed throughout the study areas (Figure 2).



Fig. 2. Waterlogged areas identified during the field survey
Source: compiled by the authors

During the field survey, 36 waterlogged areas were identified in the Vandžiogala cadastral area. Most of these areas were classified as moderately waterlogged (Category 2), accounting for 18 objects. Slightly waterlogged areas (Category 1) comprised 17 objects, while only one area was classified as severely

waterlogged. The majority of waterlogged areas were located within cultivated agricultural land, in shallow depressions situated near drainage ditches. Some of the ditches were overgrown, suggesting that their poor condition may have contributed to the accumulation of excess surface water.

In the Alovė cadastral area, 181 waterlogged areas were identified during the field survey, covering a total area of approximately 107.6 ha, whereas only 36 waterlogged areas with a total area of 12.24 ha were identified in the Vandžiogala cadastral area (Table 1). These findings indicate that waterlogging is considerably more widespread in the Alovė cadastral area, both in terms of the number of affected areas and their overall extent.

Table 1

Distribution of waterlogging categories in the Vandžiogala and Alovė cadastral areas

Waterlogging category	Number of objects		Area (ha)	
	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.
1	17	130	4.9	94.0
2	18	28	6.4	10.0
3	1	23	0.94	3.6

Source: compiled by the authors

Based on the obtained results, waterlogged areas were most frequently found in terrain depressions and in areas located near drainage ditches. The Alovė cadastral area is characterized by a more pronounced relief, with numerous hills and depressions, which may explain the significantly greater number and total area of waterlogged territories identified in comparison with the Vandžiogala cadastral area. Most waterlogged areas were located within cultivated agricultural land dominated by light-textured soils. The findings suggest that the main causes of waterlogging are the accumulation of water in terrain depressions, insufficiently functioning drainage networks, and inadequate maintenance of drainage ditches.

A comparison of the Mel_DR10LT dataset (available through the Lithuanian Spatial Information Portal) with the datasets generated during this study revealed that the boundaries of some objects did not correspond to the actual extent of waterlogged areas. The analysis of the dataset produced through office-based interpretation showed that a number of waterlogged areas identified from the orthophoto map were not included in the Mel_DR10LT dataset. This indicates that orthophoto map interpretation can identify additional waterlogging hotspots that may not be captured in official drainage condition datasets, particularly when automated detection methods fail to delineate them.

Furthermore, some areas mapped in the Mel_DR10LT dataset were larger than those identified through visual interpretation, while several territories classified as waterlogged in the Mel_DR10LT dataset could not be confirmed from the orthophoto imagery. These discrepancies may be explained by differences in data acquisition periods, update frequency, and the methodologies used for spatial data generation.

In the Vandžiogala cadastral area, the highest number of objects was recorded in the Mel_DR10LT dataset; however, a substantial proportion of these objects did not coincide with the datasets generated during the present study (Figure 3).

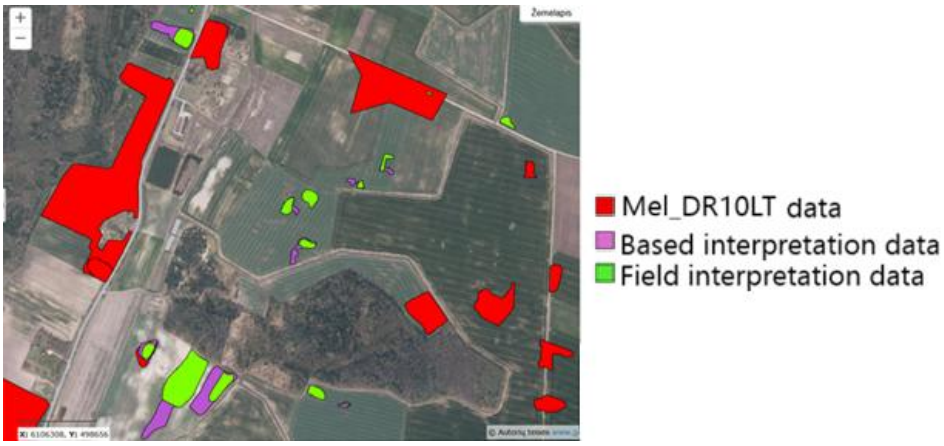


Fig. 3. Spatial discrepancies among waterlogged areas identified using different methods in the Vandžiogala cadastral area

Source: compiled by the authors

It was found that the areas classified as poorly functioning drained land in the Mel_DR10LT dataset were often larger than the waterlogged areas actually identified in the field. In some locations, the objects

mapped in the Mel_DR10LT dataset did not coincide with the waterlogged areas identified during the field survey. Only five objects were common to all three datasets. Most waterlogged areas were located within agricultural land, terrain depressions, and areas situated near drainage ditches.

The analysis revealed significant differences between the results obtained using the different methods in the investigated cadastral areas (Table 2).

Table 2

Comparison of the number and area of waterlogged territories identified using different methods

Data acquisition method	Number of objects		Area (ha)	
	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.
MEL_DR10LT dataset derived from automated satellite image analysis	62	95	162.16	288.0
Office-based ORT10LT interpretation	41	148	24.26	73.0
Field-based ORT10LT interpretation	36	181	12.24	107.6

Source: compiled by the authors

The obtained results indicate that both the number of waterlogged areas and their total extent vary considerably depending on the method applied. In the Vandžiogala cadastral area, the highest number of objects was identified in the Mel_DR10LT dataset (62 objects), while the lowest number was recorded during the field survey (36 objects). However, the analysis of the total area of waterlogged territories revealed that waterlogged areas in the Mel_DR10LT dataset covered as much as 162.16 ha, whereas the areas identified through office-based interpretation covered 24.26 ha and those identified during the field survey covered only 12.24 ha. These findings suggest that waterlogged territories in the Mel_DR10LT dataset are often generalized into larger polygons that do not always accurately represent the actual extent of waterlogged areas.

To evaluate the accuracy and consistency of the different approaches, the level of agreement between the spatial datasets was calculated (Table 3).

Table 3

Overlap between spatial datasets

Methods compared	Number of overlapping objects		Overlap area (ha)		Method agreement (%)	
	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.	Vandžiogala C. A.	Alovė C. A.
MEL_DR10LT and ORT10LT	8	38	3.11	29.05	25.8	39.8
ORT10LT and field survey	40	60	12.24	54.92	55.6	75.2
MEL_DR10LT and field survey	5	53	2.40	47.43	19.1	44.1

Source: compiled by the authors

The results showed that the highest level of agreement was achieved between the dataset generated through office-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map and the dataset obtained during the field survey. In the Alovė cadastral area, the agreement between these methods reached 75.2%, with an overlap area of 54.92 ha. In comparison, the agreement between the MEL_DR10LT dataset and the field survey data was 44.1%, while the agreement between the MEL_DR10LT dataset and the ORT10LT interpretation results was 39.8%. These findings indicate that office-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map provides the most accurate representation of the actual distribution of waterlogged areas among the evaluated remote sensing methods.

In summary, each of the applied methods possesses specific advantages and limitations. The selection of a particular approach should depend on the objectives of the study, the required level of accuracy, and the time available for data collection and processing (Table 4).

Table 4

Advantages and disadvantages of different remote sensing and mapping methods

Mapping method	Advantages	Limitations	Applications
MEL_DR10LT (automated satellite image analysis)	Enables rapid mapping of large territories. The dataset is publicly available at no cost.	The mapped areas often cover larger extents than the actual waterlogged territories. Small and newly developing waterlogged areas are often not detected.	Preliminary assessment of waterlogged areas and general evaluation of drainage conditions.

Mapping method	Advantages	Limitations	Applications
Office-based ORT10LT orthophoto map interpretation	ORT10LT orthophoto maps are publicly available free of charge. Historical orthophoto imagery from different years can be used for office-based analysis. Allows the assessment of temporal changes and the identification of long-term waterlogging patterns.	The method requires a qualified specialist capable of identifying waterlogged areas based on interpretation indicators, and the results are partly dependent on the interpreter's experience. Orthophoto maps in Lithuania are updated every three years; therefore, discrepancies may occur between the orthophoto imagery and the actual conditions in the field.	Suitable for long-term monitoring and the identification of waterlogged areas using orthophoto imagery updated every three years.
Field-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map	Highest accuracy among the evaluated methods. Represents actual field conditions at the time of data collection.	The method requires a qualified specialist capable of identifying and recording the relevant data in the field. It requires more time, labor, and resources than office-based data collection methods. Fieldwork is season dependent.	Detailed delineation of waterlogged areas. Evaluation of waterlogging intensity.

Source: compiled by the authors

The analysis revealed that each of the evaluated methods is characterized by a different level of accuracy and possesses specific advantages and limitations. The MEL_DR10LT dataset is suitable for the preliminary identification of problematic areas and for the general assessment of waterlogging conditions over large territories; however, it does not always accurately represent the actual extent of waterlogged land. Office-based interpretation of the ORT10LT orthophoto map enables relatively accurate identification of waterlogging indicators and their boundaries, although the reliability of the results depends on the timeliness of the orthophoto imagery, the experience of the interpreter, and environmental factors such as seasonality, shadows, and soil characteristics. The highest level of accuracy was achieved through field surveys, which made it possible to identify small and fragmented waterlogged areas that may not be detectable using remote sensing data alone. Nevertheless, this method is time-consuming, resource-intensive, and highly dependent on seasonal conditions. The results of the study indicate that the most reliable assessment of waterlogged areas is achieved through the combined application of all three approaches: MEL_DR10LT for the preliminary identification of problematic areas, ORT10LT orthophoto interpretation for detailed analysis of waterlogged territories, and field surveys for final verification of the results and determination of the causes of waterlogging.

Conclusions

1. The application of office-based and field interpretation of the ORT10LT orthophoto map revealed that the waterlogging problem is more pronounced in the Alovė cadastral area than in the Vandžiogala cadastral area. Through office-based interpretation, 148 waterlogged areas covering 73.0 ha were identified in the Alovė cadastral area, compared with 41 areas covering 24.26 ha in the Vandžiogala cadastral area. Field surveys identified 181 waterlogged areas covering 107.6 ha in the Alovė cadastral area, whereas only 36 waterlogged areas with a total area of 12.24 ha were identified in the Vandžiogala cadastral area.
2. The comparison of spatial datasets generated through office-based and field interpretation demonstrated that the highest level of agreement was achieved between the ORT10LT orthophoto map interpretation and the field survey datasets. In the Alovė cadastral area, the agreement between these methods reached 75.2%, with an overlap area of 54.92 ha, while in the Vandžiogala cadastral area the agreement was 55.6%, with an overlap area of 12.24 ha. The lowest agreement was observed between the MEL_DR10LT dataset and field survey data in the Vandžiogala cadastral area (19.1% and 2.40 ha), whereas in the Alovė cadastral area the agreement between these datasets reached 44.1%. These results indicate that the MEL_DR10LT dataset does not always accurately represent the actual distribution of waterlogged areas, while more reliable results are obtained through ORT10LT orthophoto interpretation and field surveys.
3. The evaluation of different remote sensing and mapping approaches showed that the MEL_DR10LT dataset is suitable for the preliminary identification of problematic areas over large territories, although it frequently overestimates the extent of waterlogged land. Office-based interpretation

of the ORT10LT orthophoto map allows relatively accurate delineation of waterlogged areas and their boundaries, whereas the highest level of accuracy is achieved through field-based interpretation. Therefore, the most reliable assessment of waterlogged areas is obtained through an integrated approach combining MEL_DR10LT data, ORT10LT orthophoto interpretation, and field surveys.

References

1. Shaheen, H. M. F., Ahmed, I., Yousaf, M. T. B., Qamar, R., & Yasin, G. (2025). Restoring Vitality to Waterlogged Soils: How Agroforestry Transforms Land Reclamation and Sustainability. In *Global Conference on Green Construction Materials and Practices* (pp. 201-209). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-09299-1_17
2. Kumar, S., Kumar, S., Birthal, P. S., Singh, R. K., Rajkumar, Bhupender, ... & Yadav, R. K. (2026). Drain, gain and sustain waterlogged-saline lands: assessing the impact of sub-surface drainage in India for policy perspectives. *Environment, Development and Sustainability*, 1-25. https://doi.org/10.1007/s10668-026-07429-8
3. Mukhopadhyay, R., Saroha, D., Narjary, B., Bundela, D. S., Kumar, S., & Sarkar, B. (2025). Impact of subsurface drainage on soil solution chemistry, structural stability and clay mineralogy of waterlogged saline soils. *Pedosphere*. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2025.10.003.
4. Abalikštienė, E. ir Šalkauskienė, V. (2024). Investigation of Waterlogged Land Areas: A Case of Lithuania. Journal of Ecological Engineering, 25(12), 340–351. https://doi.org/10.12911/22998993/194567
5. Barnhart, R. K., Marshall, D. M., & Shappee, E. (Eds.). (2021). Introduction to unmanned aircraft systems. Crc Press.
6. Du, X., Jian, J., Du, C., ir Stewart, R. D. (2021). Conservation management decreases surface runoff and soil erosion. International Soil and Water Conservation Research, 10(2), 188–196. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.08.001
7. Fajeriana, N., Ali, A., ir Rini, R. P. (2024). Soil tillage and planting along the contour on sloping land to minimize the potential for erosion and surface runoff. Sarhad Journal of Agriculture, 40 (1). https://doi.org/10.17582/journal.sja/2024/40.1.82.93
8. Islam, M. N., Bell, R. W., Barrett-Lennard, E. G., ir Maniruzzaman, M. (2022). Shallow surface and subsurface drains alleviate waterlogging and salinity in a clay-textured soil and improve the yield of sunflower in the Ganges Delta. Agronomy for Sustainable Development, 42 (2). https://doi.org/10.1007/s13593-021-00746-4
9. Kannazarova, Z., Juliev, M., Abuduwaili, J., Muratov, A. ir Bekchanov, F. (2024). Drainage in irrigated agriculture: Bibliometric analysis for the period of 2017–2021. Agricultural Water Management, 305, 109118. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109118
10. Kęsicka, B., Stasik, R., Kozłowski, M. ir Choryński, A. (2023). Is Controlled Drainage of Agricultural Land a Common Used Practice?—A Bibliographic Analysis. Land, 12(9), 1737. https://doi.org/10.3390/land12091737
11. Sun, Y., Wang, L., Yang, S., Qu, Z., ir Zhang, D. (2025). Optimizing Irrigation and Drainage Practices to Control Soil Salinity in Arid Agroecosystems: A Scenario-Based Modeling Approach Using SaltMod. Agronomy, 15 (9), 2239. https://doi.org/10.3390/agronomy15092239
12. Valčiukienė, J., Balevičius, G., Juknelienė, D. ir Vaičiukynas, V. (2025). Assessment of reclaimed agricultural land in Lithuania. Rural development 2025: resilience to global challenge: proceedings of the 12th international scientific conference. https://doi.org/10.15544/RD.2025.005
13. Zhang, Y., Chen, X., Geng, S., ir Zhang, X. (2025). A review of soil waterlogging impacts, mechanisms, and adaptive strategies. Frontiers in Plant Science, 16, 1545912. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1545912
14. Kaur G., Singh G., Motavalli P.P., Nelson K.A., Orlowski J.M., Golden B.R. (2020). Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. Agronomy Journal. https://doi.org/10.1002/agj2.20093
15. Černiauskas, V. 2025. Kartografinių ir nuotolinių duomenų taikymas teritorijų analizei. https://gs.elaba.lt/object/elaba:236682059/
16. Forkuor, G.; Hounkpatin, O. K. L.; Welp, G.; Thiel, M. 2017. High Resolution Mapping of Soil Properties Using Remote Sensing Variables in South-Western Burkina Faso: A Comparison of Machine Learning and Multiple Linear Regression Models. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170478
17. Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
18. Bednář, M., Šarapatka, B., Netopil, P., Zeidler, M., Hanousek, T., & Homolová, L. (2023). The Use of Spectral Indices to Recognize Waterlogged Agricultural Land in South Moravia, Czech Republic. Agriculture, 13(2), 287. https://doi.org/10.3390/agriculture13020287

19. den Besten, N., Steele-Dunne, S., de Jeu, R., & van der Zaag, P. (2021). Towards Monitoring Waterlogging with Remote Sensing for Sustainable Irrigated Agriculture. Remote Sensing, 13(15), 2929. https://doi.org/10.3390/rs13152929
20. Lietuvos Respublikos žemės ūkio ministerija (2025) Lietuvos Respublikos teritorijos M 1:10 000 žemių melioracinės būklės ir užmirkimo erdvinių duomenų rinkinys (Mel_DR10LT). ŽISIS. https://zisis.lt/zisis-duomenys/mel_dr10lt/
21. Merchán, D. A., Manzano, J. M., & Ierardi, C. (2026). Detecting water in agricultural landscapes from remote sensing imagery: Methodological choices, sensor constraints and performance metrics. Agricultural Water Management, 327, 110264. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110264

UŽMIRKUSIŲ MELIORUOTŲ ŽEMIŲ TERITORIJŲ NUSTATYMAS IR PALYGINIMAS TAIKANT SKIRTINGUS NUOTOLINIŲ TYRIMŲ METODUS

Santrauka

Melioracijos sistemų nusidėvėjimas ir nepakankama priežiūra lemia vis dažniau pasitaikančias užmirkusių teritorijų problemas, todėl aktualu taikyti patikimus jų nustatymo metodus. Tyrimo tikslas – nustatyti užmirkusias teritorijas Vandžiogalos ir Alovės kadastro vietovėse, taikant skirtingus nuotolinio kartografavimo būdus bei palyginti sudarytus erdvinių duomenų rinkinius. Tyrimui naudoti Mel_DR10LT duomenys, ORT10LT ortofotografinis žemėlapis ir lauko tyrimų metu surinkta informacija.

Atlikus tyrimą nustatyta, kad užmirkusios teritorijos dažniausiai formuojasi reljefo pažemėjimuose, šalia melioracijos griovių ir dirbamos žemės plotuose. Didžiausias metodų atitikimas nustatytas tarp ORT10LT ortofotografinio žemėlapio kameralaus interpretavimo ir lauko tyrimo duomenų rinkinių (75,2 %). Tyrimo rezultatai parodė, kad MEL_DR10LT duomenų rinkinys tinkamas preliminariam probleminių teritorijų nustatymui, tačiau tikslesni rezultatai gaunami taikant ORT10LT ortofotografinio žemėlapio interpretavimą ir lauko tyrimus. Patikimiausias melioruotų žemių būklės vertinimas pasiekiamas derinant visus taikytus metodus.

Reikšminiai žodžiai: Melioracija, užmirkusios teritorijos, ORT10LT, Mel_DR10LT, nuotolinis kartografavimas.

LONG-TERM ANNUAL VARIABILITY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS CONCENTRATIONS AND ESTIMATED LOADS IN THE NEMUNAS RIVER DURING 2001 – 2024

Sinilga Černulienė, Jurgita Babilienė
Lietuvos Inžinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

This study assessed long-term annual variability in nitrogen and phosphorus concentrations and estimated annual loads in the Nemunas River during 2001–2024. The analysis was based on annual monitoring data from five main-stem stations and selected major tributaries. Total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3-N), total phosphorus (TP), mean annual discharge and estimated annual TN and TP loads were evaluated. Annual TN and NO_3-N concentrations were highest and most variable at the middle-river station S2, while TP showed a less pronounced spatial pattern. Spearman correlation analysis indicated generally weak relationships between annual discharge and nutrient concentrations, with significant positive correlations detected only at S5 for TN and NO_3-N. Estimated annual TN and TP loads showed clearer spatial differences than concentrations, with the lowest loads observed at S1 and higher, more variable loads recorded in the middle reaches. The Neris and Nevėžis rivers explained approximately 48% of TN and 74% of TP load changes in the S2–S1 reach, indicating the importance of tributary inputs in this part of the river. PCA supported the separation of S2 along the nitrogen-related gradient. The study shows that annual concentration data alone are insufficient to describe nutrient pressure in large river systems. Because the analysis was based on annual mean values, seasonal and event-scale nutrient transport could not be assessed.

Key words: Nemunas River; total nitrogen; total phosphorus; nitrate nitrogen; estimated annual loads; tributary contribution; long-term monitoring; PCA.

Introduction

River systems are important pathways linking terrestrial catchments with downstream aquatic ecosystems and coastal waters. They transport water, sediments and dissolved substances, including nitrogen and phosphorus compounds, which are among the main drivers of eutrophication in freshwater and coastal environments (Gonzalez et al., 2025; Kantamaneni et al., 2025). River water quality is influenced by both natural catchment characteristics and anthropogenic pressures, including urbanisation, agricultural intensification and wastewater inputs (Zhi et al., 2024).

Nitrogen and phosphorus are particularly important in river systems because excessive inputs may promote algal growth, oxygen depletion and degradation of ecological status. Total nitrogen (TN) includes both mineral and organic nitrogen forms, while nitrate nitrogen (NO_3-N) is often an important component of nitrogen transport in agricultural and mixed-use catchments. Phosphorus is frequently considered a limiting nutrient in freshwater systems, and even relatively small increases in phosphorus availability can contribute to eutrophication (Correll, 1999; Rabalais, 2009).

At the European scale, nutrient concentrations and loads in rivers have changed substantially during recent decades. Improvements in wastewater treatment and restrictions on phosphorus use have reduced nutrient inputs in many regions, but diffuse agricultural pollution remains an important pressure on water quality (EEA, 2024; EEA, 2025). Previous studies have shown that nutrient patterns in rivers may vary depending on catchment land use, hydrological variability, river size and tributary inputs (Bouraoui & Grizzetti, 2011; Minaudo et al., 2019; Dupas et al., 2015).

The Nemunas River is the largest river in Lithuania and one of the main river systems draining towards the Curonian Lagoon and the Baltic Sea. Therefore, long-term assessment of nutrient concentrations and loads in the Nemunas River is important for understanding potential nutrient pressure on downstream ecosystems. Although the Nemunas River basin has been monitored for decades, integrated studies that jointly assess annual nutrient concentrations, estimated annual loads, spatial differences along the main river channel and the role of major tributaries remain limited.

Most long-term monitoring datasets are commonly available as annual or monthly summaries, which are useful for assessing broad temporal and spatial patterns but have important limitations. Annual mean data cannot describe seasonal dynamics, flood events or daily concentration–discharge relationships. Nevertheless, annual data can provide a consistent basis for comparing long-term nutrient variability among monitoring stations and identifying river sections where nutrient loads change most strongly.

Therefore, the aim of this study was to assess long-term annual variability in nitrogen and phosphorus concentrations and estimated annual loads in the Nemunas River during 2001–2024. The study focuses on spatial differences among main-stem monitoring stations, relationships between annual discharge and nutrient concentrations, the contribution of major tributaries to estimated load changes, and the overall structure of nutrient concentration patterns using PCA.

Materials and methods

*Study area and monitoring stations***.** The study was conducted in the Nemunas River basin, the largest river basin in Lithuania and one of the main river systems draining towards the Curonian Lagoon and the Baltic Sea. The Nemunas River drains a catchment characterized by mixed land use, including agricultural areas, urbanized zones and forested regions. This makes the river suitable for assessing long-term annual variability in nutrient concentrations and estimated nutrient loads along the main river course.

Five long-term monitoring stations located along the main stem of the Nemunas River were selected for analysis. These stations represent the upstream, middle and downstream sections of the river continuum. Station S1 represents the upstream part of the studied river section, stations S2 and S3 represent the middle section, and stations S4 and S5 represent the downstream section before discharge towards the Curonian Lagoon.

To assess the contribution of major tributaries to nutrient load changes along the Nemunas River, five tributaries were included in the analysis. These were the Neris (N1) and Nevėžis (N2), entering the Nemunas between S1 and S2, the Dubysa (N3), entering between S2 and S3, and the Šešupė (N4) and Jūra (N5), entering between S3 and S4.

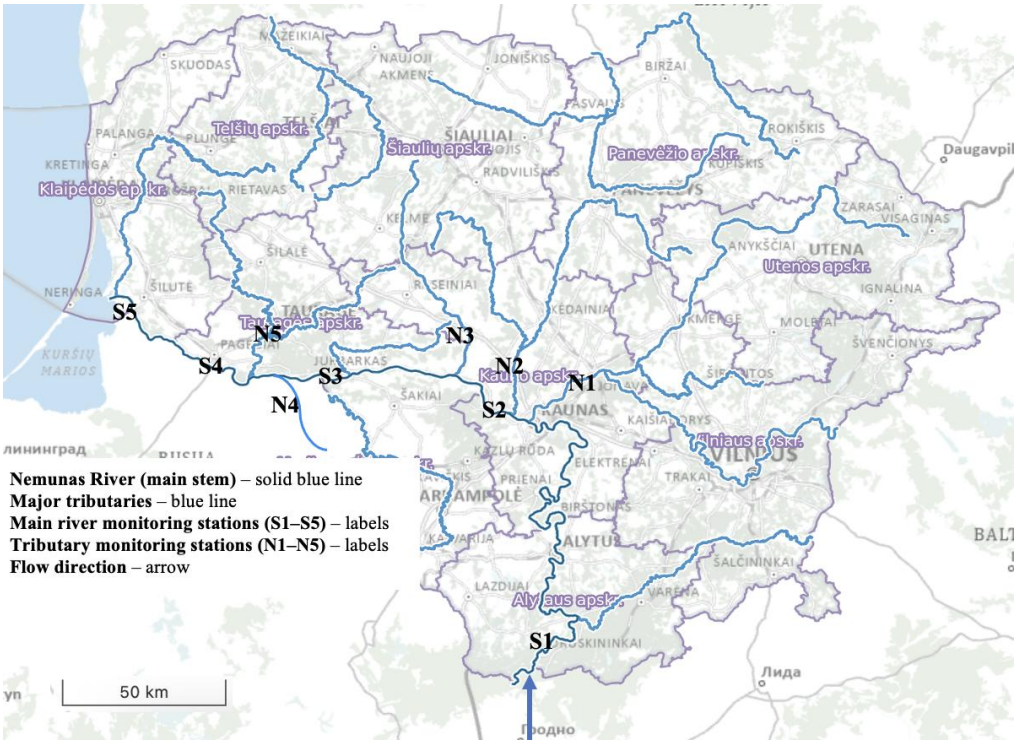


Fig. 1. Location of the Nemunas River basin, main-stem monitoring stations (S1–S5) and major tributaries (N1–N5)
Source: compiled by the authors

Data sources and water quality parameters. The analysis was based on annual water quality and hydrological data for the period 2001–2024, obtained from the national river monitoring network. The dataset included mean annual discharge (Q, $m^3\ s^{-1}$) and annual mean concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and nitrate nitrogen (NO_3-N). Only years with available paired discharge and concentration data were included in the analyses.

Because the study was based on annual mean values, it was designed to assess long-term annual variability and spatial differences among monitoring stations. Seasonal patterns, flood events and daily concentration–discharge relationships were not evaluated.

Nutrient load calculation. Annual nutrient loads were calculated by combining mean annual discharge and corresponding mean annual nutrient concentrations. Loads were expressed in tonnes per year ($t\ yr^{-1}$) and represent integrated nutrient transport at each monitoring station. This approach allows assessment of nutrient export that accounts for both concentration variability and hydrological conditions.

Statistical analysis. Spatial differences in annual nutrient concentrations and estimated annual loads among monitoring stations were assessed using the non-parametric Kruskal–Wallis test. This test was

selected because environmental monitoring data often show non-normal distributions and unequal variability among stations.

Spearman rank correlation analysis was used to evaluate relationships between mean annual discharge and nutrient concentrations at each monitoring station. Spearman correlation was also used to assess the relationship between estimated annual TN and TP loads.

Long-term monotonic trends in estimated annual TN and TP loads were evaluated using the Mann–Kendall trend test. This method is commonly applied in long-term environmental datasets and is robust for non-normally distributed data.

Principal component analysis (PCA) was used as an exploratory tool to summarize the structure of annual nutrient concentrations among monitoring stations. PCA was performed using TN, NO_3-N and TP concentrations only. Estimated loads were not included in the PCA to avoid circularity, because loads were calculated using both concentration and discharge.

All statistical analyses were performed at a significance level of $p < 0.05$.

Results

Mean annual discharge varied among years and increased downstream from S1 to S5, reflecting the cumulative contribution of the river basin.

Annual mean TN and NO_3-N concentrations differed among the Nemunas River monitoring stations (Fig. 2). The highest median concentrations and the widest variability were observed at station S2, indicating that the middle reach of the river was characterized by greater nitrogen enrichment compared with the upstream station S1 and downstream stations S3–S5. TN and NO_3-N showed a similar spatial pattern, suggesting that nitrate nitrogen represented an important component of total nitrogen variability in the studied river section.

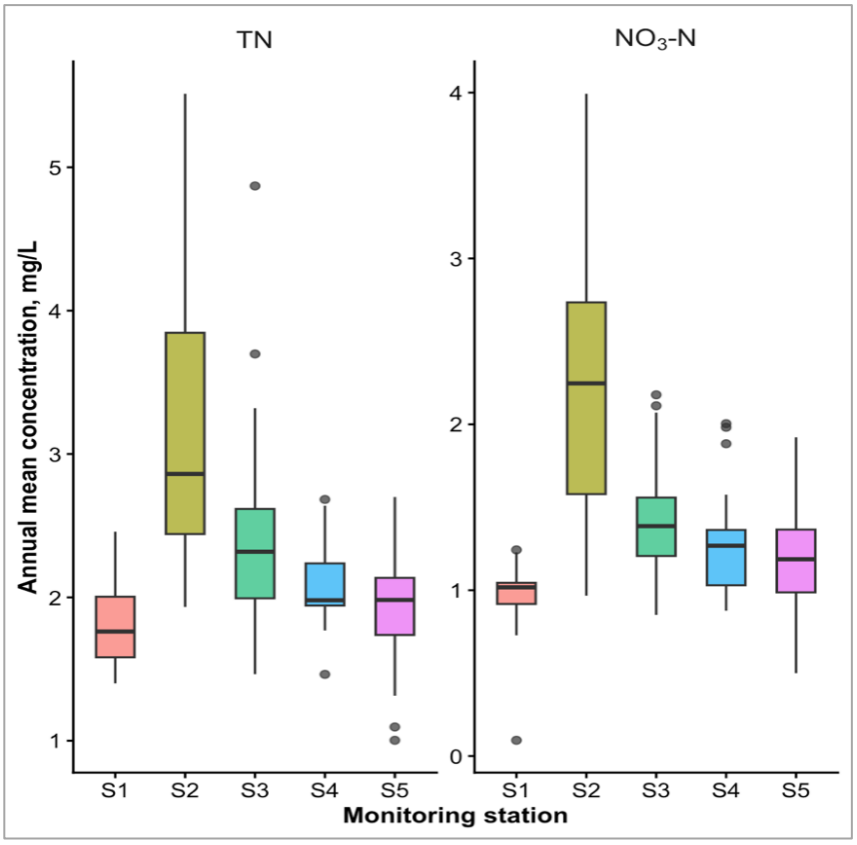


Fig. 2. Annual mean concentrations of total nitrogen (TN) and nitrate nitrogen (NO_3-N) at Nemunas River monitoring stations during 2001–2024

Source: compiled by the authors

Annual mean TP concentrations also varied among monitoring stations, although the spatial pattern was less pronounced than for nitrogen compounds (Fig. 3). Higher median TP concentrations were observed at S2 and S3, while lower median values were recorded at S4 and S5. The presence of several high values

indicates that TP concentrations varied considerably in some years, particularly in the middle and downstream sections of the river.

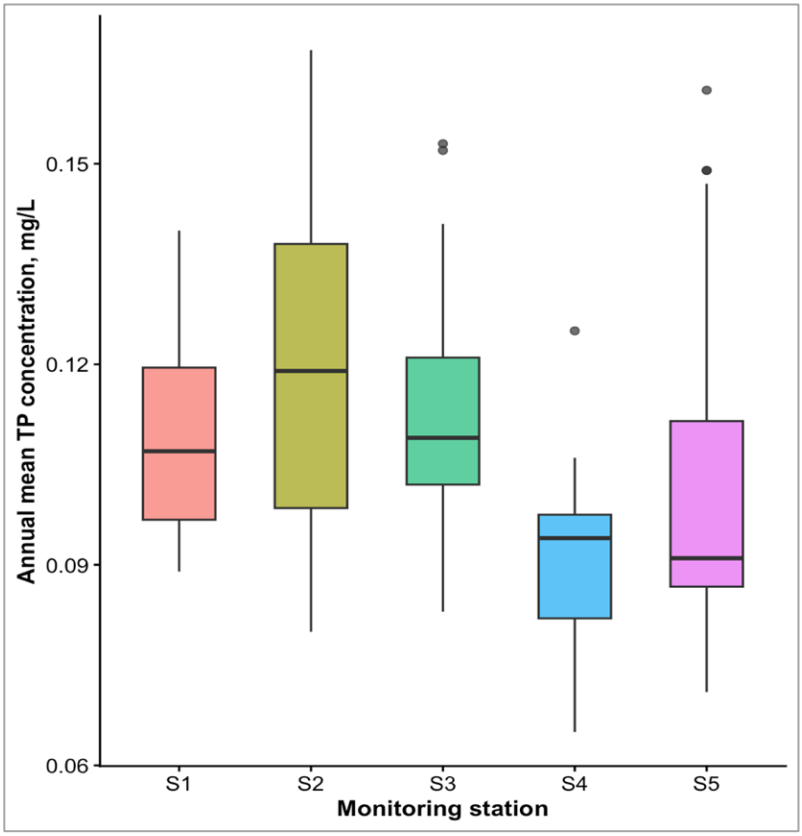


Fig. 3. Annual mean total phosphorus (TP) concentration at Nemunas River monitoring stations during 2001–2024
Source: compiled by the authors

Spearman correlation analysis showed generally weak and statistically non-significant relationships between annual discharge and nutrient concentrations (Table 1). Significant positive correlations were detected only at S5 for TN and NO_3-N. This indicates that annual nutrient concentrations were not consistently explained by discharge variability alone.

Table 1

Spearman rank correlations between discharge (Q) and nutrient concentrations at Nemunas River monitoring stations (2001–2024)

Station	TN vs Q (ρ)	p-value	TP vs Q (ρ)	p-value	NO_3^- – N vs Q (ρ)	p-value
S1	0.28	>0.05	−0.14	>0.05	0.23	>0.05
S2	0.05	>0.05	0.13	>0.05	0.09	>0.05
S3	0.14	>0.05	0.09	>0.05	0.29	>0.05
S4	−0.15	>0.05	−0.05	>0.05	0.07	>0.05
S5	**0.52**	**<0.05**	-	>0.05	**0.61**	**<0.01**

Source: compiled by the authors

However, estimated annual nutrient loads integrate both concentration and discharge. Therefore, load-based analysis was used to evaluate spatial differences in nutrient export along the Nemunas River.

Estimated annual TN and TP loads showed clearer spatial differences among stations than concentrations (Fig. 4). The lowest loads were recorded at S1, whereas higher and more variable loads occurred at S2–S4. This pattern indicates that annual load estimates reflect both nutrient concentrations and downstream increases in discharge.

TN and TP loads were positively correlated at all monitoring stations (Spearman $\rho = 0.65–0.86$, $p < 0.001$), indicating similar annual load variability patterns for both nutrients.

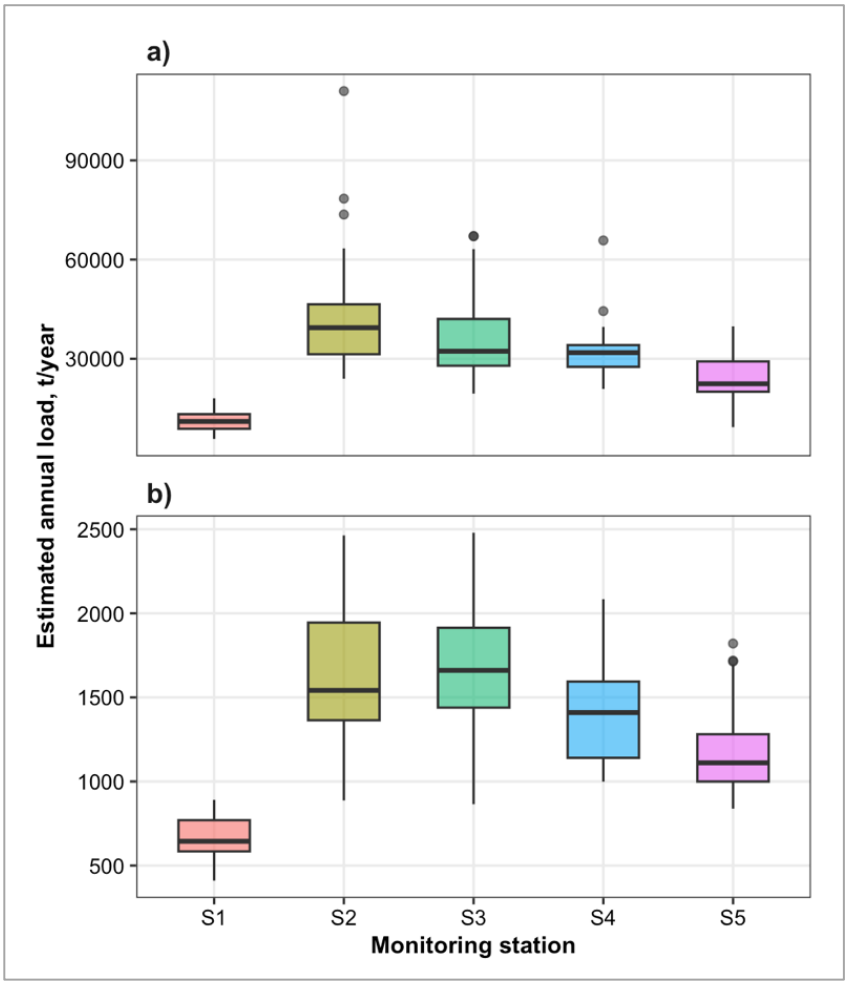


Fig. 4. Estimated annual loads of total nitrogen (a) and total phosphorus (b) at Nemunas River monitoring stations during 2001–2024

Source: compiled by the authors

Mann–Kendall analysis did not detect statistically significant long-term trends in TN or TP loads at any station ($p > 0.05$). A weak increasing tendency in TN load was observed at S5 ($\tau = 0.29$), but it was not statistically significant ($p = 0.056$). These results indicate that interannual variability was more pronounced than long-term monotonic change.

To evaluate the role of major tributaries, changes in nutrient loads between adjacent main-stem stations were compared with tributary inputs (Table 2).

Table 2

Median contribution of major tributaries to nutrient load changes along the Nemunas River (2001–2024)

Reach	Main tributaries	Median ΔTN (t yr^{-1})	Median tributary TN load (t yr^{-1})	Median explained TN (%)	Median ΔTP (t yr^{-1})	Median tributary TP load (t yr^{-1})	Median explained TP (%)
S2–S1	Neris + Nevėžis	28 600	15 400	48	867	630	74
S3–S2	Dubysa	–10 900	1 300	12	69	27	26
S4–S3	Jūra + Šešupė	–956	5 777	150	–241	198	82

Values exceeding 100% indicate that tributary inputs exceeded the net load change between adjacent main-stem stations and therefore should be interpreted as indicative rather than as a closed mass-balance estimate.

Source: compiled by the authors

The strongest tributary contribution was observed in the S2–S1 reach, where the Neris and Nevėžis rivers explained approximately 48% of TN and 74% of TP load changes. In downstream reaches, the relationship between tributary inputs and load changes was less consistent. This suggests that annual load changes along the river cannot be explained by tributary inputs alone.

A limitation of this study is the use of annual mean data. Therefore, seasonal patterns, flood events and daily concentration–discharge relationships could not be assessed. The results should be interpreted as an assessment of long-term annual variability rather than short-term nutrient transport dynamics.

PCA was used as an exploratory analysis to summarize the structure of annual nutrient concentrations. The first two principal components explained 97.0% of the total variance, with PC1 accounting for 63.6% and PC2 for 33.4% (Fig. 5). TN and NO_3-N were mainly associated with PC1, whereas TP was more strongly related to PC2. The PCA plot showed partial separation of S2 from the other stations along the nitrogen-related gradient, supporting the boxplot results that indicated higher TN and NO_3-N concentrations at this station.

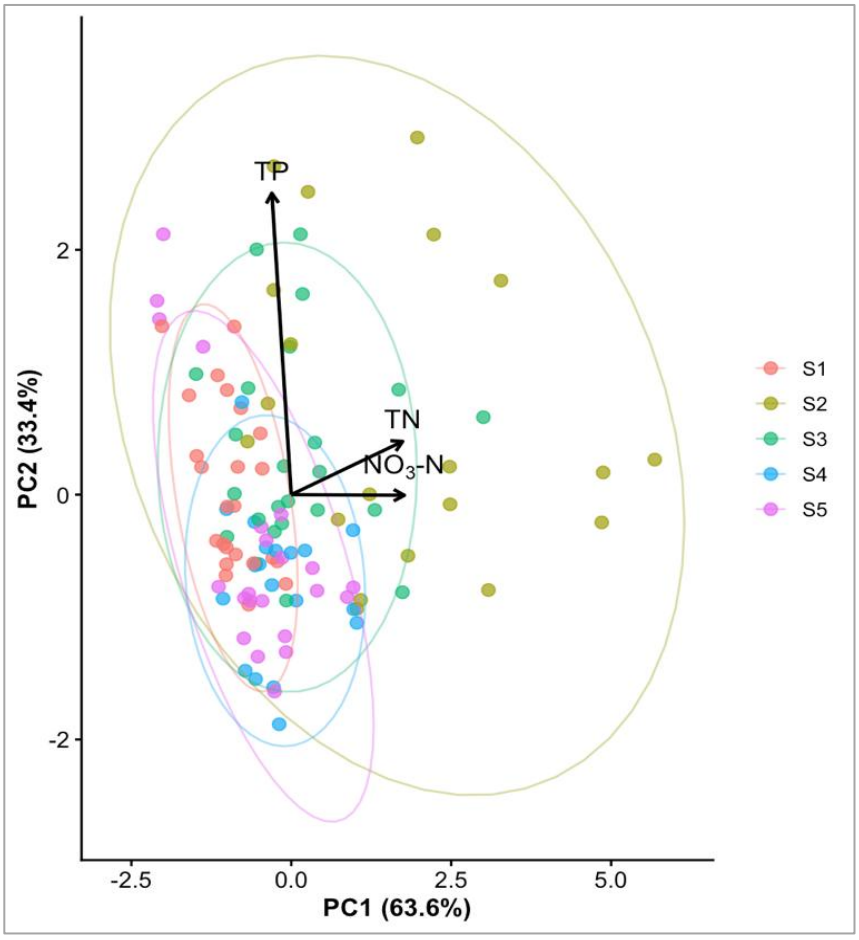


Fig. 5. PCA biplot of annual TN, NO_3-N and TP concentrations at Nemunas River monitoring stations during 2001–2024

Source: compiled by the authors

Discussion

The results of this study show that annual nutrient concentrations and estimated annual loads describe different aspects of nutrient variability in the Nemunas River. Annual TN and NO_3-N concentrations were highest and most variable at S2, whereas TP showed a less pronounced spatial pattern. This indicates that nitrogen and phosphorus did not follow identical spatial patterns along the river. Similar differences between nitrogen and phosphorus behaviour have been reported in other river systems, where nutrient concentrations and loads may respond differently to catchment characteristics, land use, tributary inputs and hydrological variability (Bouraoui & Grizzetti, 2011; Minaudo et al., 2019; Dupas et al., 2015).

The weak and mostly non-significant relationships between annual discharge and nutrient concentrations indicate that concentration patterns were not consistently explained by discharge variability alone. This finding is consistent with previous studies showing that concentration–discharge relationships in large and heterogeneous catchments may be weak, non-linear or variable over time (Minaudo et al., 2019; Stonevičius et al., 2014; Chen et al., 2025). In the present study, significant positive relationships between discharge and concentrations were detected only at S5 for TN and NO_3-N. This may suggest that discharge-

related effects become more visible in the downstream section, where cumulative catchment inputs are integrated over a larger area.

In contrast to concentrations, estimated annual TN and TP loads showed clearer spatial differences among monitoring stations. The lowest loads were recorded at S1, while higher and more variable loads occurred at S2–S4. This pattern reflects the combined influence of nutrient concentrations, increasing discharge downstream and additional inputs from tributaries. Previous studies have emphasized that load-based assessments are important because concentration data alone may not sufficiently represent nutrient pressure on downstream water bodies (Seitzinger et al., 2010; Dupas et al., 2015; Johnes et al., 1996). In the Nemunas River, this is particularly relevant because the river is an important pathway of nutrient transport towards the Curonian Lagoon and the Baltic Sea (Stakėnienė et al., 2023).

The positive correlations between TN and TP loads at all monitoring stations indicate that both nutrients showed similar annual load variability patterns. However, Mann–Kendall analysis did not detect statistically significant long-term trends in TN or TP loads. This suggests that interannual variability was more pronounced than long-term monotonic change during 2001–2024. Similar observations have been made in European river systems, where long-term nutrient changes may be partly masked by hydrological variability and annual differences in discharge (Bouraoui & Grizzetti, 2011; EEA, 2024; Räike et al., 2003).

The tributary contribution analysis showed that the Neris and Nevėžis rivers were important contributors to nutrient load changes in the S2–S1 reach, explaining approximately 48% of TN and 74% of TP load changes. This supports the importance of the Kaunas reach as a key section of the Nemunas River for annual nutrient load variability. Similar effects of major tributaries and river-network position on nutrient loads have been reported in other river systems, where nutrient export is influenced not only by main-stem discharge but also by tributary inputs and spatial differences in catchment pressure (Kronvang et al., 1999; Česonienė et al., 2021; Bouraoui & Grizzetti, 2011).

In downstream reaches, the relationship between tributary inputs and load changes was less consistent. This suggests that annual load changes along the river cannot be explained by tributary inputs alone. Such differences may reflect the combined influence of discharge variability, catchment-scale inputs and possible retention or attenuation within the river system. However, because this study is based on annual mean data, these processes cannot be directly quantified. Therefore, they should be interpreted only as possible explanations rather than confirmed mechanisms. Previous studies have shown that retention and transformation processes may affect nutrient transport in river systems, particularly for nitrogen and phosphorus compounds (Kronvang et al., 1999; Jarvie et al., 2013; Schulz-Zunkel et al., 2021).

The PCA provided an additional exploratory view of the nutrient concentration structure. The first two principal components explained most of the total variance, with PC1 mainly associated with TN and NO_3-N and PC2 more strongly related to TP. The partial separation of S2 along the nitrogen-related gradient supports the boxplot results, which showed higher TN and NO_3-N concentrations at this station. However, the overlap among stations indicates that the differences were not absolute and should be interpreted as broad annual patterns rather than strict station separation.

A limitation of this study is the use of annual mean data. Therefore, seasonal patterns, flood events and daily concentration–discharge relationships could not be assessed. The results should be interpreted as an assessment of long-term annual variability rather than short-term nutrient transport dynamics. Future studies should use higher temporal resolution monitoring data to evaluate seasonal nutrient dynamics, event-scale transport and more detailed relationships between discharge and nutrient concentrations.

Conclusions

1. During 2001–2024, annual nutrient patterns in the Nemunas River differed among monitoring stations. The middle reach, particularly station S2, was characterized by higher TN and NO_3-N concentrations and greater variability, while TP showed a less distinct spatial pattern.
2. Annual discharge was weakly related to nutrient concentrations but was important for interpreting estimated annual loads. TN and TP loads showed clearer spatial differences than concentrations, with the lowest values at S1 and higher, more variable loads in the middle reaches of the river.
3. Major tributaries contributed substantially to nutrient load changes, especially in the S2–S1 reach, where the Neris and Nevėžis rivers explained approximately 48% of TN and 74% of TP load changes. However, tributary inputs did not fully explain load variability along the river.
4. Annual concentration data alone were insufficient to assess nutrient pressure in the Nemunas River. Because the analysis was based on annual mean values, the results should be interpreted as long-term annual patterns rather than seasonal or event-scale nutrient transport dynamics.

References

1. Bouraoui, F., & Grizzetti, B. (2011). Long term change of nutrient concentrations of rivers discharging in European seas. *Science of the Total Environment*, *409*(23), 4899–4916. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.015
2. Chen, C., Chen, X., Tang, H., Feng, X., Han, Y., He, Y., Yan, L., He, Y., Yang, L., & He, K. (2025). A Quantitative Assessment of the Impacts of Land Use and Natural Factors on Water Quality in the Red River Basin, China. *Water, 17*(13), 1968. https://doi.org/10.3390/w17131968
3. Correll, D. L. (1999). Phosphorus: a rate limiting nutrient in surface waters. *Poultry Science, 78*(5), 674-682. https://doi.org/10.1093/ps/78.5.674
4. Česonienė, L., Šileikienė, D., & Dapkienė, M. (2021). Influence of Anthropogenic Load in River Basins on River Water Status: A Case Study in Lithuania. *Land, 10*(12), 1312. https://doi.org/10.3390/land10121312
5. Dupas, R., Delmas, M., Dorioz, J. M., Garnier, J., Moatar, F., & Gascuel-Odoux, C. (2015). Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk. *Ecological Indicators, 48*, 396-407. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.007
6. European Environment Agency. (2025). *Nutrients in freshwater in Europe.* European Zero Pollution Dashboard. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/nutrients-in-freshwater-in-europe-indicator
7. European Environment Agency. (2024). *Europe's state of water 2024: The need for improved water resilience*. (EEA Report No 07/2024). https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-state-of-water-2024
8. González, L., Zhiña, D. X., Avilés, A., Astudillo, A., Peralta, X., & Verdugo, T. (2025). Exploring habitat quality dynamics in an equatorial Andean basin under scenarios of land use change. *Earth, 6*, 10. https://doi.org/10.3390/earth6010010
9. Jarvie, H. P., Sharpley, A. N., Withers, P. J. A., Scott, J. T., Haggard, B. E. & Neal, C. (2013). Phosphorus Mitigation to Control River Eutrophication: Murky Waters, Inconvenient Truths, and "Postnormal" Science. *Journal of Environmental Quality, 42*, 295-304. https://doi.org/10.2134/jeq2012.0085
10. Johnes, P., Moss, B. & Phillips, G. (1996). The determination of total nitrogen and total phosphorus concentrations in freshwaters from land use, stock headage and population data: testing of a model for use in conservation and water quality management. *Freshwater Biology, 36*, 451-473. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1996.00099.x
11. Kantamaneni, K., Whitton, J., Panneer, S., Ahmad, I., Gautam, A., & Sen, D. (2025). An assessment of bio-physical and social drivers of river vulnerability and risks. *Earth, 6,* 7. https://doi.org/10.3390/earth6030077
12. Kronvang, B., Hoffmann, C. C., Svendsen, L. M., Windolf, J., & Jensen, J. P. (1999). Retention of nutrients in river basins. *Aquatic Ecology, 33*, 29–40 (1999). https://doi.org/10.1023/A:1009947907811
13. Minaudo, C., Dupas, R., Gascuel-Odoux, C., Roubeix, V., Danis, P.-A., & Moatar, F. (2019). Seasonal and event-based concentration–discharge relationships to identify catchment controls on nutrient export regimes. *Advances in Water Resources*, *131*, Article 103379. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103379
14. Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., & Justić, D. (2009). Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science, 66*(7), 1528–1537. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047
15. Räike, A., Pietiläinen, O.-P., Rekolainen, S., Kauppila, P., Pitkänen, H., Niemi, J., Raateland, A., & Vuorenmaa, J. (2003). Trends of phosphorus, nitrogen and chlorophyll a concentrations in Finnish rivers and lakes in 1975–2000. *Science of The Total Environment, 310*(1–3), 47-59. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00622-8
16. Schulz-Zunkel, C., Baborowski, M., Ehlert, T., Kasperidus, H. D., Krüger, F., Horchler, P., Neukirchen, B., Rupp, H., Scholz, M., Symmank, L., & Natho, S. (2021). Simple modelling for a large-scale assessment of total phosphorus retention in the floodplains of large rivers. *Wetlands 41*, 68. https://doi.org/10.1007/s13157-021-01458-x
17. Seitzinger, S. P., Mayorga, E., Bouwman, A. F., Kroeze, C., Beusen, A. H. W., Billen, G., Van Drecht, G., Dumont, E., Fekete, B. M., Garnier, J., & Harrison, J A. (2010). Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochem. Cycles, 24*(4), GB0A08. https://doi.org/10.1029/2009GB003587
18. Stakėnienė, R., Jokšas, K., Kriaučiūnienė, J., Jakimavičius, D., & Raudonytė-Svirbutavičienė, E. (2023). Maistinių medžiagų įkrovos ir mainai tarp Kuršių marių ir Baltijos jūros: pokyčiai per pastaruosius du dešimtmečius (2001–2020). *Water, 15*(23), Article 4096. https://doi.org/10.3390/w15234096
19. Stonevičius, E., Valiuškevičius, G., Rimkus, E., & Kažys, J. (2014). Climate induced changes of Lithuanian rivers runoff in 1960–2009. *Water Resour, 41*, 592–603. https://doi.org/10.1134/S0097807814050133
20. Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J. & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. *Nature Water, 2*, 228–241. https://doi.org/10.1038/s44221-024-00202-z

ILGALAIKĖ METINĖ AZOTO IR FOSFORO KONCENTRACIJŲ BEI APSKAIČIUOTŲ APKROVŲ KAITA NEMUNO UPĖJE 2001–2024 M.

Santrauka

Šiame tyrime vertinta ilgalaikė metinė azoto ir fosforo koncentracijų bei apskaičiuotų metinių apkrovų kaita Nemuno upėje 2001–2024 m. Analizė atlikta remiantis metiniais monitoringo duomenimis iš penkių pagrindinės upės vagos stebėsenos stočių ir pasirinktų pagrindinių intakų. Buvo vertinti bendrasis azotas (TN), nitratinis azotas (NO_3-N), bendrasis fosforas (TP), vidutinis metinis debitas ir apskaičiuotos metinės TN bei TP apkrovos. Metinės TN ir NO_3-N koncentracijos buvo didžiausios ir labiausiai kintančios vidurupio stotyje S2, o TP pasižymėjo mažiau ryškiu erdviniu pasiskirstymu. Spearmano koreliacijos analizė parodė, kad ryšiai tarp metinio debito ir maistmedžiagių koncentracijų

dažniausiai buvo silpni; reikšmingos teigiamos koreliacijos nustatytos tik S5 stotyje TN ir NO_3-N atvejais. Apskaičiuotos metinės TN ir TP apkrovos pasižymėjo aiškesniais erdviniais skirtumais negu koncentracijos: mažiausios apkrovos nustatytos S1 stotyje, o didesnės ir labiau kintančios apkrovos – vidurupio ruože. Neries ir Nevėžio upės paaiškino apie 48 % TN ir 74 % TP apkrovų pokyčių S2–S1 ruože, taip parodydamos svarbų intakų indėlį šioje upės dalyje. PCA analizė patvirtino S2 stoties atsiskyrimą pagal su azotu susijusį gradientą. Tyrimas parodė, kad vien metinių koncentracijų duomenų nepakanka maistmedžiagių apkrovai didelėse upių sistemose apibūdinti. Kadangi analizė pagrįsta metiniais vidurkiais, sezoninė ir epizodinė maistmedžiagių pernaša nebuvo vertinta.

Reikšminiai žodžiai: Nemuno upė; bendras azotas; bendras fosforas; nitratų azotas; apskaičiuotos metinės apkrovos; intakų indėlis; ilgalaikis monitoringas; PCA.

INVESTIGATIONS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED-CONCRETE SLABS USED FOR SLOPE PROTECTION AT FLUCTUATING WATER LEVELS

Raimondas Šadzevičius[1], Dainius Ramukevičius[1], Justyna Dzięcioł[2]
[1]Lietuvos inžinerijos kolegija Higher Education Institution, [2]Warsaw University of Life Sciences (SGGW)

Abstract

Continuous exposure to water can damage reinforced-concrete structures. When investigating reinforced-concrete structures of structures in service, the main attention is paid to concrete. As a porous construction material, the principal durability characteristics of concrete are strength, watertightness, frost resistance and resistance to aggressive environments.

This article discusses the results of investigations of the physical and mechanical properties of the concrete of reinforced-concrete slabs used to reinforce the stilling-basin apron slopes in the outlet section of a hydraulic node in service. The results obtained showed that when concrete pieces detached from reinforced-concrete structures were used as specimens for testing, the concrete density ranged from 2335 to 2458 kg/m³. The average water absorption of the concrete specimens was 5.9%. To determine the frost resistance of the concrete, specimens from 3 series were tested, with 3 specimens in each series. The specimens were tested after 200 freezing and thawing cycles. After the frost-resistance test, the compressive strength of the investigated concrete specimens decreased by more than 5% compared with the compressive strength of the control specimens. The investigated concrete did not pass the frost-resistance test. The largest change between the average compressive strength of the control specimens (19.17 MPa) and the average compressive strength of the specimens after freezing and thawing (17.07 MPa) was 11%.

Key words: concrete strength, frost resistance

Introduction

Lithuania's climate differs considerably across the seasons. Lithuania is divided into different regions according to average and extreme low-temperature values. The effects of the environment on construction materials and structures are very varied and, unfortunately, in most cases negative. The durability of structures in service is especially reduced by cyclically recurring positive and negative temperatures. In late autumn, winter and early spring, 50 to 120 cycles per year are recorded when the air temperature fluctuates above and below 0 °C. Such temperature variation occurs not only in Lithuania. Very similar temperature fluctuations also occur in neighboring countries. In the Scandinavian countries (Norway, Sweden and Finland), because of extremely varied terrain, a large geographical extent from south to north, and the strong influence of the Atlantic Ocean, the number of cycles of positive and negative temperature fluctuations ranges from 25 to more than 110 cycles per year.

Such temperature fluctuation is very dangerous for materials whose pores and capillaries are filled with water or aqueous salt solutions and in which the liquid state changes into a solid during freezing. Water has a great influence on concrete strength. It has been established that when water turns into ice, its volume increases by about 9%. When water in the pores or capillaries of a material freezes, the expanding ice creates high internal pressure, which gradually destroys the material structure, causing cracking and an increase in porosity; this mechanism has been linked to hydraulic pressure, ice growth and moisture movement in hardened cement paste. The rate of deterioration depends on many factors: the degree of pore saturation with water, freezing temperature, the strength of the material skeleton, and others. When concrete structures are continuously exposed to water, the water can gradually damage the concrete surface, as a result of which mechanical and chemical corrosion may begin in the concrete. The effect of water influences the degree to which concrete is filled with water.

Frost resistance is considered the principal durability characteristic of porous building materials: it is the ability of a saturated material to withstand repeated freezing and thawing cycles and to change no more than the limits established by the standard. In addition to the number of cycles, international research emphasizes the critical degree of saturation, because freeze–thaw damage becomes likely when the pore system contains enough water to generate damaging internal stresses (Fagerlund, 1977; Li et al., 2012). According to the requirements of standard LST 1428-17 applied in Lithuania, after the specified number of freezing and thawing cycles (marked by grade, for example F100, F200 or F300), the properties of hydraulic concrete may change by no more than 5% for reduction in compressive strength (compared with control specimens) and 3% for total mass loss due to scaling.

The durability of widely used construction materials - concrete and many concrete and reinforced-concrete structures (road and aerodrome pavements, dams, water treatment facilities, bridge supports, and sea and river quays) - is also determined by the frost resistance of concrete. Therefore, when certifying ready-

mixed concrete and concrete and reinforced-concrete products, and when designing concrete mixes, it is necessary to determine the durability indicator of concrete: the frost-resistance grade. Durability assessment is also closely related to the transport of water and aggressive ions through concrete, because sorptivity, permeability and other permeation properties control the ingress of moisture and salts into the pore network (Basheer et al., 2001; Hall, 1989). Control of concrete frost resistance by standard methods, based on cyclic freezing and thawing of design-strength specimens saturated with water or salt solutions, require considerable time and financial costs as well as special freezing equipment.

This article examines hydraulic concrete in the load-bearing structure of a structure in service. When investigating structures of hydraulic engineering works in service, most attention is paid to concrete strength. The concrete of such structures must be strong, dense, watertight, frost resistant and resistant to aggressive environments. Therefore, it is necessary to evaluate the physical and mechanical properties of concrete and to identify the measures required to ensure durability.

The aim of the work is to determine the physical and mechanical properties of the concrete of reinforced-concrete structures in a structure in service, using irregularly shaped concrete pieces detached from the structure.

To achieve the aim, the following tasks were formulated:

- identify the most dangerous factors for concrete structures whose surfaces are in constant contact with water;
- perform concrete strength tests using irregularly shaped concrete pieces detached from the structure;
- investigate the frost resistance of concrete according to the strength of specimens saturated in water and frozen.

Literature review

There are no materials that are absolutely resistant to external effects; therefore, any structure or structural element in service requires maintenance. The environment causes corrosion of construction materials and structures, biological effects, and provokes erosion. Erosive effects are mechanical in nature. They may include water, temperature-induced deformations, abrasive processes, and other effects.

Water can penetrate and wash out the constituent particles of concrete. As liquids containing sulfates, usually groundwater, penetrate into concrete, the sulfates can cause concrete corrosion and deterioration of cement stone. The rate and extent of such deterioration depend strongly on water transport and near-surface concrete quality (Basheer et al., 2001; Hall, 1989). When water is absorbed, evaporates, or freezes and thaws, the structure deforms and additional stresses arise, which can enlarge existing damage or cause new damage. Concrete may crack or fail due to stresses caused by temperature changes and differences as a result of alternating tensile and compressive stresses. Abrasive erosive processes are caused by wind-borne sand, rain and dust, which loosen and carry away particles from the concrete surface. Water that accumulates in irregularities, pores and cracks, especially when it freezes, causes additional deformation and stresses and destroys the concrete surface. In this way, a whole complex of erosive factors begins to act on structures at the same time. The most extensive damage to concrete and reinforced-concrete structures and their elements occurs because of provoked erosion. There are many possibilities for provoking it.

An aggressive environment causes the following damage in concrete and reinforced-concrete structures: 1) cracks appear along the reinforcement; 2) concrete detaches at the corners and edges of the structure; 3) the protective concrete layer spalls off, the reinforcement becomes visible and corrodes.

Smaller concrete defects caused by the environment are also observed. These are point detachments of the concrete surface layer. They occur because aggregates expand under the effects of corrosion, temperature and moisture. Similar to limestone in ceramic bricks, aggregates also damage deeper layers of the structure. Such defects are difficult to repair, because they cannot be removed from deeper concrete layers, and the concrete continues to deteriorate.

Concrete and reinforced concrete consist of inorganic materials. However, they can support the life of certain organisms and especially plants. There are many species of lichens, fungi and algae that can live and multiply on concrete. Dry-rot fungi can spread on and inside the concrete surface. These fungi, like lichens, have deep roots and severely damage the concrete surface and the internal layers into which they penetrate. They usually attack poor-quality concrete with open pores and voids, especially if it contains soluble substances leached by water or other liquids. Hydraulic concrete is most often affected by them. Fungi can also spread in other structures if they are in zones of variable moisture and are not illuminated by daylight.

Investigations of concrete compressive strength are performed by destructive and non-destructive methods. Non-destructive compressive-strength tests are performed according to standard LST EN 12504-2

“Testing concrete in structures. Part 2: Non-destructive testing. Determination of rebound number” using a device based on the elastic rebound principle: the Schmidt hammer.

Of all known non-destructive methods for determining the strength of concrete in structures in service, the most reliable tests are carried out by pull-off and splitting methods or by testing irregularly shaped specimens detached from the structure (Šadzevičius et al., 2021).

When testing specimens with unlevelled surfaces that have detached from the structure and are irregular in shape, cylindrical steel dies with concave working surfaces are used. The literature (Vaišvila, Mikuckis, 2005) indicates that when irregularly shaped specimens are tested with flat 100 mm diameter working surfaces, the concrete compressive strength obtained is approximately the same as that of standard 100 mm edge-length cubes tested by the standard method.

During the operation of hydraulic engineering structures, hydraulic nodes, reservoirs, quays and other concrete structures that are constantly exposed to atmospheric effects, one of the most important criteria determining how long concrete will serve is the resistance of concrete to freezing thawing cycles. Deterioration of concrete due to freezing thaw cycles eventually causes corrosion of reinforcing steel, which destroys and weakens the entire concrete structure. Water enters concrete through cracks, microcracks, pores and capillaries. Even high-quality concrete with low water absorption can be damaged, because during freezing water can appear in the concrete through condensation when moisture present in the air separates out. For this reason, freeze–thaw cycles can damage even dense concrete. The main cause of concrete deterioration and cracking is that the volume of water freezing in the pores increases by up to 9%, causing internal stresses; reviews of concrete exposed to cold climates identify saturation level, permeability and the air-void system as central factors controlling frost resistance (Pigeon & Pleau, 1995).

In Lithuania, the main method for determining the frost resistance of concrete is the volumetric freezing and thawing method, regulated by national standard LST 1428-17. This method determines the frost-resistance grade (F) of concrete, which indicates the minimum number of freezing and thawing cycles that the concrete must withstand without significant damage. Depending on the intended use of concrete products and the applicable European standards (EN), the following methods are also used alongside the volumetric method: the one-sided freezing method (according to standard LST CEN/TS 12390-9 “Resistance to cyclic freezing and thawing. Scaling”) and the surface scaling method.

The one-sided freezing method is applied when evaluating the resistance of the concrete surface layer, where one side of the structure is subjected to freezing cycles and thawing salts. It is most often used for transport structures and bridges.

The surface scaling method is specifically applied to concrete paving blocks, sidewalk slabs and kerbs (according to LST EN 1338, LST EN 1339 and LST EN 1340), by measuring the mass of material detached from the surface.

When determining the frost resistance of hydraulic concrete in Lithuania, the volumetric freezing and thawing method according to standard LST 1428-17 is used. For a hydraulic engineering structure operating in a fresh-water environment, the minimum concrete frost-resistance grade is F200, while in a fluctuating water-level zone it is F300.

In the concrete frost-resistance control standards of other countries, tests are accelerated by using a 3% NaCl solution for freezing and thawing specimens (Germany, Austria) and rapid freezing of specimens (Germany, Switzerland, USA and Finland). In some countries, the resistance of the concrete surface layer is checked under cyclically repeated positive and negative temperatures and de-icing agents: NaCl (Austria, Germany) and CaCl2 (USA). Salt scaling is a separate but related durability problem, and experimental reviews have shown that its development depends on the interaction of freezing, surface moisture, salt solution, paste microstructure and air-void protection (Valenza & Scherer, 2007a, 2007b). However, the latter methods have a number of disadvantages: complicated specimen preparation and considerable time requirements. Indirect frost-resistance testing methods, based on determining the dependence of certain properties of the concrete mix or structural indicators of hardened concrete on the number of freezing and thawing cycles, are not widely used because of their relatively low reliability and the need for special, sometimes complex, equipment.

The reviewed international literature therefore supports the evaluation approach used in this study: for concrete elements in a fluctuating water-level zone, frost durability should be interpreted together with water absorption, density, compressive strength loss after freeze–thaw cycling, and the likelihood that the concrete has reached or exceeded a critical degree of saturation (Fagerlund, 1977; Li et al., 2012; Pigeon & Pleau, 1995).

Research method

The object of the study is the slopes of the stilling-basin apron of the Krokialaukis pond hydroscheme (Alytus District), which are reinforced with reinforced - concrete slabs. The pond was formed in 1978. The earth dam is 245 m long and 8 m wide. The spillway is shaft-type and was installed in 1981.

The compressive strength of the reinforced-concrete slabs of the hydraulic node was determined during the tests. Irregularly shaped pieces of concrete detached from reinforced-concrete slab structures made of coarse-grained cement concrete were used as specimens for testing (Fig. 1). Large concrete pieces were crushed into smaller pieces. Concrete pieces without cracks and without voids were selected. Before testing, uneven surfaces covered with algae or delaminated concrete were cleaned with a wire brush.



Fig. 1. Irregularly shaped concrete pieces for specimens
Source: compiled by the authors

The volume of the concrete specimen was calculated using the formula*:*

$$V = \frac{m_{im} - m_v}{\rho_{vand}}, \quad (1)$$

where: V– volume, cm^3, m_{im} – mass of the saturated specimen, g; m_v – mass of the specimen in water, g.

Determination of concrete water absorption. The actual water absorption of concrete specimens was determined in accordance with the provisions of the Standard (1997):

$$W_m = \frac{m_{im} - m_s}{m_s} \cdot 100, \quad (2)$$

where: W_m – water absorption of the specimen, %; m_{im} – mass of the saturated specimen*, g;* m_s – mass of the dry specimen, g.

Determination of concrete specimen density. The density of detached concrete pieces from the reinforced-concrete structures of the hydraulic node was determined according to the requirements of the Standard (2019 a). The density of the concrete specimen was calculated using the formula:

$$\rho = \frac{m_{im}}{V}, \quad (3)$$

where: ρ – density, t/m^3; m_{im} – mass of the saturated specimen, g; V – volume, cm^3.

Preparation of concrete specimens for the frost-resistance test. Three series of specimens with three specimens in each series were prepared for the frost-resistance test. The frost resistance of concrete specimens was determined by applying the volumetric freezing and thawing test method according to the requirements of standard LST 1428-17. Irregularly shaped concrete pieces were used.

Concrete specimens were immersed in a bath of water at a temperature of 18±5 °C. The specimens were saturated as follows: on the first day, enough water was poured into the bath to cover about 1/3 of the specimen height. The specimens covered in this way were kept for 24 h. Then enough water was added to cover about 2/3 of the specimen height. The specimens covered in this way were again kept for 24 h. Then water was added so that all specimens were completely covered and the thickness of the water layer above the specimens and on all sides was at least 20 mm. The specimens covered in this way were kept for another 24 h. Before frost-resistance determination, the saturated specimens were removed from the bath. From 2 h to 4 h after removal from the bath, they were placed in a freezing chamber. During freezing, the temperature at the centre of the freezing chamber had to be -18±2 °C. At this temperature, the freezing duration had to be not less than 2.5 h. After frost-resistance determination, the specimens were removed from the freezing chamber and placed in a bath with water at 18±5 °C. The specimens were kept in the bath for not less than 2±0.5 h. This was repeated for the required number of freezing and thawing cycles.

The frost resistance of concrete is determined according to the compressive strength of specimens, determined in accordance with LST EN 12390-3. Concrete compressive strength was determined by testing irregularly shaped specimens with concave dies (diameter 100 mm and area 7850 mm²) and using specimen centering equipment (Fig. 2).



Fig. 2. Specimen centering equipment and irregularly shaped specimens with concave dies
Source: compiled by the authors

The tested concrete pieces were of such a size that they could be tested with 100 mm diameter dies. The specimens were prepared and centered as described in the literature (Vaišvila, Mikuckis 2005). The error of the longitudinal axis of the dies of the centered specimen did not exceed 0.2 mm, and the deviation of the planes of the contact surfaces was 0.005 of the die diameter. The recesses of the dies were filled with levelling mortar whose compressive strength was approximately equal to that of the specimen concrete.

The compressive strength of concrete in irregularly shaped specimens tested with concave dies was calculated using the formula:

$$f_c = \frac{F}{A_n}, \tag{4}$$

where: f_c – compressive strength of concrete in an irregularly shaped specimen tested with concave dies, N/mm² (MPa); F – destructive load, N; A_n – cross-sectional area of the die with the specimen, mm².

If concrete has been in service for more than 5 years, all obtained compressive-strength results must be reduced by multiplying by the time-factor coefficient, which is 0.7, because the strength of concrete deeper from the surfaces is lower.

Evaluation of concrete frost resistance and changes in compressive strength. If the average compressive strength of a specimen series (3 specimens) after the required number of freezing and thawing cycles is equal to or not more than 5% lower than the compressive strength of the control specimens, the concrete is considered to have passed the frost-resistance test. The change in compressive strength of concrete specimens after the frost-resistance test is calculated using the formula:

$$\Delta f = \frac{f_{š,cm} - f_{k,cm}}{f_{k,cm}} \cdot 100; \tag{5}$$

where: Δf – change in compressive strength of concrete specimens, in percent, compared with the strength of the control specimens; $f_{k,cm}$ – average value of the compressive strength of the control specimens before the frost-resistance test, MPa; $f_{š,cm}$ – average value of the compressive strength of the specimens after a certain number of freezing and thawing cycles, MPa.

If, after the frost-resistance test, the compressive strength of the specimens decreased by more than 5% compared with the compressive strength of the control specimens, the concrete did not pass the frost-resistance test.

Results and discussion

The results of the specimens prepared and tested in the laboratory are presented in Tables 1 and 2. The results of the investigation of the volume, water absorption and density of concrete specimens, according to Formulae 1–4, are presented in Table 1.

According to the results of physical investigations presented in Table 1, the concrete density of the reinforced-concrete slabs in the outlet-section channel of the hydraulic node ranges from 2335 to 2458 kg/m³, and the density of the specimens in Series 3 is 2335 kg/m³, which is the lowest. The average specimen density is 2396 kg/m³. The highest density is 2458 kg/m³ (Series 2), and the average water absorption is 4.1%. The highest water absorption of concrete was determined for the specimens of Series 2 (8.3%). The average water

absorption of the specimens of all three series was 5.9%. According to the previously valid construction norms, the water absorption of concrete should not have exceeded 7%.

Compressive-strength tests were carried out during the investigations. To determine specimen compressive strength, three series of specimens were investigated, with three specimens from each series. The results of destructive compressive-strength tests of irregularly shaped concrete specimens are presented in Table 2. Control specimens and specimens after 200 freezing and thawing cycles were tested.

The obtained compressive-strength values of the specimens (Table 2) show that, when the temperature drops below 0 °C, the water in the concrete pores and capillaries does not freeze immediately. This is determined by the different sizes of the pores and capillaries: as they decrease, the interaction between the water and the walls of the capillaries and pores becomes stronger, and the freezing temperature of the water in them decreases.

The specimens of Series 1 had the highest average compressive strength of the control specimens and average compressive strength after freezing and thawing, with respective values of 20.73 and 21.6 MPa. The change in compressive strength of Series 1 specimens after freezing and thawing cycles, compared with the strength of the control specimens, was 4.2%. The average density of the control specimens in Series 1 was 2400 kg/m³. The average compressive strength of the control specimens in Series 1 (20.73 MPa) was on average 9% higher than the averages of the control specimens in Series 2 and Series 3.

Table 1

Results of the investigations of volume, water absorption and density of irregularly shaped concrete specimens

Sample series / No.	*Physical properties of samples*					
	m_{im}, g	m_v, g	m_s, g	V, cm³	W_m, %	P, kg/m³
I-1	998.1	589.3	951.3	408.8	4.9	2442
I-2	1325.0	761.9	1239.2	563.1	6.9	2353
I-3	1299.2	759.5	1213.1	539.7	7.1	2407
II-1	955.5	566.8	917.7	388.7	4.1	2458
II-2	1300.9	749.9	1200.9	551.0	8.3	2361
II-3	1256.7	731.7	1201.8	525.0	4.6	2394
III-1	1249.3	730.8	1200.1	518.5	4.1	2409
III-2	1820.9	1041.0	1720.1	779.9	5.9	2335
III-3	1559.3	910.3	1459.9	649.0	6.8	2403

Source: compiled by the authors

Table 2

Change in compressive strength of concrete specimens after 200 freezing and thawing cycles

Sample series / No.	Control specimen strength $f_{k,c}$, MPa	Mean control specimen strength $f_{k,cm}$, MPa	Strength after freeze–thaw cycles $f_{š,c}$, MPa	Mean strength after freeze– thaw cycles $f_{š,cm}$, MPa	Strength change Δf, %
I-1	24.3	20.73	26.3	21.60	4.2
I-2	18.6		17.2		
I-3	19.3		21.3		
II-1	23.8	18.73	22.1	17.07	-8.9
II-2	15.7		13.9		
II-3	16.7		15.2		
III-1	18.9	19.17	16.8	17.07	-11.0
III-2	16.1		13.6		
III-3	22.5		20.8		

Source: compiled by the authors

The average compressive strength of the control specimens in Series 2 (18.73 MPa) is lower than the average compressive strength of the frozen and thawed specimens (21.6 MPa). The change in compressive strength of the concrete specimens is 8.9%; i.e., the average compressive strength of the frozen and thawed specimens is lower than the average compressive strength of the control specimens. The average density of the control specimens in Series 2 was 2404 kg/m³.

The largest change between the average compressive strength of the control specimens and the average compressive strength of the frozen and thawed specimens was found in the specimens of Series 3. The average compressive strength of the specimens of Series 3 after freezing and thawing (17.07 MPa) was 11% lower than the average compressive strength of the control specimens (19.17 MPa).

If, after the frost-resistance test, the compressive strength of the specimens decreased by more than 5% compared with the compressive strength of the control specimens, the concrete did not pass the frost-

resistance test. Fig. 3 shows that the compressive strength of the control concrete specimens after the frost-resistance test decreased by more than 5% compared with the compressive strength of the control specimens. The concrete control did not pass the frost-resistance test.

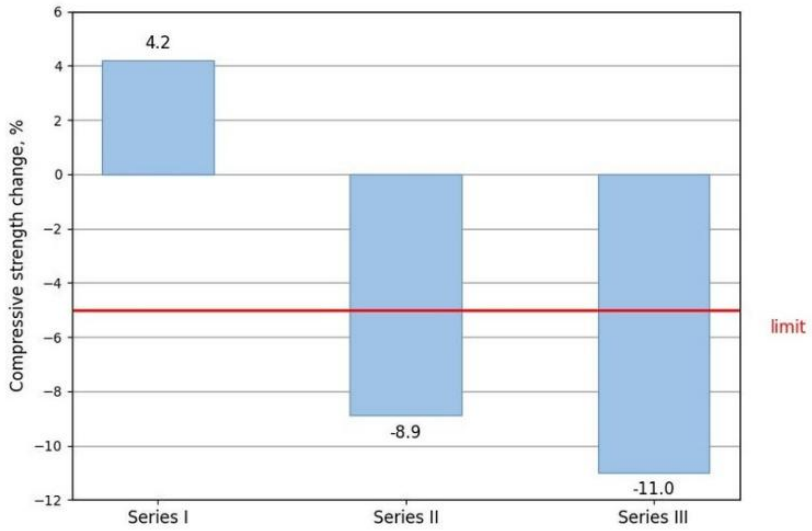


Fig. 3. Change in concrete compressive strength after 200 freezing and thawing cycles
Source: compiled by the authors

Conclusions

1. Using irregularly shaped concrete pieces for testing, the concrete density of the reinforced-concrete slabs used to reinforce the banks of the outlet-section channel of the hydraulic node was determined. The results obtained showed that when concrete pieces detached from reinforced-concrete structures were used as specimens for the tests, the concrete density ranged from 2335 to 2458 kg/m³.
2. The water absorption of the investigated concrete showed that the highest concrete-specimen absorption was determined for the Series 2 specimen—8.3%; the lowest concrete water absorption was determined in the Series 2 and Series 3 specimens—4.1%. The average water absorption of the specimens of all three series was 5.9%. According to previously valid construction norms, concrete water absorption should not have exceeded 7%.
3. When testing irregularly shaped concrete specimens after 200 freezing and thawing cycles, the compressive strength of the concrete specimens decreased by 11% compared with the compressive strength of the control specimens determined before the test. Because the decrease was more than 5%, the investigated concrete did not withstand the frost-resistance test.

References

1. Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review. Construction and Building Materials, 15(2–3), 93–103. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061800000581
2. Fagerlund, G. (1977). The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Matériaux et Construction, 10, 217–229. https://doi.org/10.1007/BF02478693
3. Hall, C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: A review. Magazine of Concrete Research, 41(147), 51–61. https://www.emerald.com/jmacr/article/41/147/51/413820
4. Li, W., Pour-Ghaz, M., Castro, J., & Weiss, J. (2012). Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze-thaw damage in concrete pavement joints. Journal of Materials in Civil Engineering, 24(3), 299–307. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000383
5. Lithuanian Standards Board. (2019). LST EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens. Lithuanian Standards Board.
6. Lithuanian Standards Board. (2021). LST EN 12504-2:2021 Testing concrete in structures—Part 2: Non-destructive testing—Determination of rebound number. Lithuanian Standards Board.
7. Lithuanian Standards Board. (2024). LST 1428-17:2024 Concrete—Test methods—Part 17: Determination of frost resistance by the volumetric freezing and thawing method. Lithuanian Standards Board.
8. Pigeon, M., & Pleau, R. (1995). Durability of concrete in cold climates. E & FN Spon. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482271447/durability-concrete-cold-climates-pigeon.

9. Šadzevičius, R., Ramukevičius, D., Sankauskienė, T., Dzięcioł, J., & Gabryś, K. (2021). Prognosis of durability of concrete by evaluating freezing and thawing cycles. Rural Development 2021 : Challenges for Sustainable Bioeconomy and Climate Change: Proceedings of the 10th International Scientific Conference, 21-23 September 2021, Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Lithuania, 149-154.
10. Vaišvila K.A., Mikuckis F. (2005). Evaluation on the compressive strength of concrete by testing the samples of irregular shape.Civil Engineering'05: International Scientific Conference: Jelgava. (in Russian).
11. Valenza, J. J., II, & Scherer, G. W. (2007a). A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research, 37(7), 1007–1021. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000737
12. Valenza, J. J., II, & Scherer, G. W. (2007b). A review of salt scaling: II. Mechanisms. Cement and Concrete Research, 37(7), 1022–1034. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000713

KINTAMO VANDENS LYGYJE NAUDOJAMŲ GELŽBETONINIŲ PLOKŠČIŲ ŠLAITAMS TVIRTINTI FIZINIŲ-MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Anotacija

Nuolatinis vandens poveikis gelžbetoninėms konstrukcijos, gali jas pažeisti. Tiriant eksploatuojamų statinių gelžbetonines konstrukcijas, daugiausia dėmesio skiriama betonui. Betono, kaip akytos statybinės medžiagos, pagrindinė ilgaamžiškumo charakteristika yra stipris, nelaidumas vandeniui, atsparumas šalčiui ir agresyviajai aplinkai.

Straipsnyje aptariami eksploatuojamo hidromazgo ištekėjimo dalies kanalo krantams tvirtinti gelžbetoninių plokščių betono fizikinių ir mechaninių savybių tyrimų rezultatai. Gauti rezultatai parodė, kad tyrimams naudojant nuo gelžbetoninių konstrukcijų atitrūkusius betono gabalus kaip bandinius, betono tankis kinta nuo 2335 iki 2458 kg/m3. Betono bandinių vidutinė įgėrio reikšmė 5,9%. Betono atsparumą šalčiui nustatyti tirta 3 imčių bandiniai, po 3 bandinius kiekvienoje imtyje. Buvo bandyti bandiniai po 200 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Tirto betono po atsparumo šalčiui bandymo bandinių stipris gniuždant sumažėjo daugiau kaip 5% lyginant su kontrolinių bandinių gniuždymo stipriu. Tirtas betonas atsparumo šalčiui bandymo neišlaikė. Didžiausias pokytis tarp kontrolinių bandinių vidutinio stiprio gniuždant (19,17 MPa) ir po užšaldymo ir atšildymo bandinių vidutinio stiprio gniuždant (17,07 MPa) sudaro 11%.

Reikšminiai žodžiai: betono stipris, atsparumas šalčiui.

KELKRAŠČIO KONSTRUKCIJOS SPRENDINIAI IR JŲ ĮTAKA DANGOS STABILUMUI

Regina Motienė
Lietuvos inžinerijos kolegija

Anotacija

Pastaraisiais metais Lietuvos kelių infrastruktūros plėtra ir atnaujinimas išlieka viena svarbiausių transporto sektoriaus sričių. Didėjantis automobilių srautas, sunkiojo transporto apkrovos ir gamtinės sąlygos lemia spartesnį dangų nusidėvėjimą bei eismo sąlygų blogėjimą. Todėl tiek valstybinės, tiek regioninės reikšmės kelių rekonstravimas tampa būtina sąlyga užtikrinti eismo saugumą, komfortą ir aplinkosauginius standartus.

Siekiant užtikrinti patikimą transporto judėjimą bei infrastruktūros ilgaamžiškumą, būtina parinkti racionalų kelkraščio įrengimo konstrukcijos sprendinį, apimantį konstrukcijos atnaujinimą ir kitų elementų modernizavimą.

Reikšminiai žodžiai: Entropinis ekspertinis vertinimo būdas, porinis ekspertinis vertinimo būdas, daugiakriterinis vertinimo būdas, žemės sankasa, asfalto danga.

Įvadas

Didėjantis sunkiojo transporto srautas ir kintančios klimato sąlygos Lietuvoje kelia vis didesnių iššūkių kelių infrastruktūros ilgaamžiškumui. Siekiant sustabdyti spartų dangų nusidėvėjimą, nepakanka sutelkti dėmesį tik į pačią važiuojamąją dalį. Kelkraštis atlieka esminį vaidmenį užtikrinant bendrą konstrukcijos stabilumą ir eismo saugumą. Kelio ir kelkraščio sandūra yra kritinė zona, lemianti visos dangos konstrukcijos stabilumą, todėl tinkamai parinkti sprendiniai neleidžia asfaltbetoniui deformuotis, atlaiko sunkiasvorio transporto apkrovas ir užkerta kelią erozijai. Šiame straipsnyje analizuojami racionalūs alternatyvūs kelkraščių įrengimo sprendiniai, leidžiantys modernizuoti esamą infrastruktūrą ir reikšmingai pailginti kelių tarnavimo laiką.

Tyrimo problema – kaip didėjant sunkiojo transporto apkrovoms ir kintant klimato sąlygoms, parinkti racionalius alternatyvius kelkraščio konstrukcijos sprendinius, kurie užtikrintų kritinės zonos (kelio ir kelkraščio sandūros) stabilumą ir užkirstų kelią asfaltbetonio deformacijoms bei erozijai?

Tyrimo objektas - alternatyvios kelkraščių įrengimo konstrukcijos, lemiančios kelio dangos stabilumą.

Tyrimo tikslas – Išanalizuoti ir įvertinti alternatyvius kelkraščių įrengimo konstrukcinius sprendinius.

Tyrimo uždaviniai:

1. Identifikuoti ir aprašyti alternatyvius kelkraščių konstrukcijų įrengimo sprendinius.
2. Atlikti kelkraščio konstrukcijų įrengimo sprendinių vertinimą.

Tyrimo metodai:

1. Daugiakriterinis naudingumo vertės metodas taikomas nustatyti racionaliausią kelkraščių konstrukcijos parinkimo varianto sprendimą pagal pasirinktus kriterijus.
2. Entropijos metodas taikomas nustatant kelkraščių konstrukcijos parinkimo alternatyvių projektinių sprendimų vertinimo kriterijų teorinį reikšmingumą.
3. Ekspertinis porinio palyginimo metodas taikomas subjektyvaus kriterijų reikšmingumo nustatymui.

Kelkraščių įrengimo technologinių alternatyvų vertinimas

Analizės tikslas – išsiaiškinti, kuris iš galimų kelkraščio įrengimo variantų yra technologiškai, ekonomiškai ir eksploatacijos atžvilgiu racionaliausias esamomis kelio sąlygomis. Siekiant to pasiekti, atliekama alternatyvių sprendinių lyginamoji analizė, įvertinant dengimo kainą Eur/m^2, darbo sąnaudas žm.val./m^2, mechanizmų darbo sąnaudas maš.val./m^2, dengimo masę kg/m^2, darbo sudėtingumą.

Rekonstruojant kelią buvo parinktos keturios galimos kelkraščių įrengimo konstrukcijos, kurias galima taikyti kelio kelkraščių įrengimui. Šios konstrukcijos analizuojamos pagal penkis pasirinktus vertinimo kriterijus:

- Dengimo kainą EUR/m^2 (K_1)
- Darbo sąnaudas žm.val./m^2(K_2)
- Mechanizmų darbo sąnaudos maš.val./m^2 (K_3)
- Dengimo masė kg/m^2 (K_4)
- Darbo sudėtingumas (K_5)

Kelkraščio sutvirtinimas skaldažole (A_1). Vienas iš nagrinėjamų kelkraščių įrengimo konstrukcijos variantų yra kelkraščių sutvirtinimas skaldažolės mišinio juosta. Šis sprendinys yra plačiai taikomas krašto

kelių rekonstrukcijose ir naudojamas tiek kaip konstrukcinė atrama dangos briaunai, tiek kaip drenažinis paviršiaus sluoksnis.

Skaldažolės kelkraščiui naudojamas nesurištasis mineralinių medžiagų mišinys, sudarytas iš dviejų pagrindinių komponentų: apie 85 % skaldažolių (skaldos ir žvyro mišinys) ir iki 15 % dirvožemio priemaišų, kurios pagerina paviršiaus rišlumą ir sudaro sąlygas žolei įsišaknyti. Mišinio sudėtis turi atitikti TRA UŽPILDAI 19 reikalavimus dėl frakcijų granuliometrinės sudėties ir TRA SBR 19 reikalavimus nesurištiesiems mišiniams.

Kelkraščio viršutiniam sluoksniui įrengti gali būti naudojamos tipinės stambiųjų užpildų frakcijos: 11/32 (kai sluoksnio storis ≥ 8 cm), 11/22 (kai sluoksnio storis 6–7 cm), 8/16 arba 11/16 (kai sluoksnio storis siekia apie 5 cm). Projektuojamų kelkraščių skersinis nuolydis numatomas 8 %, o pats kelkraštis formuojamas 3 cm žemiau asfaltbetonio dangos briaunos, siekiant apsaugoti dangos kraštą nuo trupėjimo ir užtikrinti efektyvų vandens nuvedimą.

Kelkraščio apatinis sluoksnis gali būti įrengiamas iš ŽB, ŽG, ŽP, ŽD, ŽM, SB, SG, SP, SD, SM gruntų grupių, kurių naudojimas atitinka galiojančius nesurištųjų mišinių ir gruntų įrengimo techninius reikalavimus. Įrengiant tiek viršutinį, tiek apatinį kelkraščio sluoksnius, būtina užtikrinti optimalų mišinio drėgnumą, kokybišką sluoksnio išskleidimą ir pakankamą sutankinimą, neleidžiant medžiagai išsiskirstyti frakcijomis.

Apibendrinant galima teigti, kad skaldažolės kelkraščio konstrukcija (A1) yra ekonomiškai pagrįstas ir techniniu požiūriu tinkamas variantas krašto kelių rekonstrukcijoms, pasižymintis geru pralaidumu, paprasta priežiūra ir atitiktimi normatyviniams reikalavimams.

Kelkraščio sutvirtinimas asfaltbetoniu (A_2). Asfaltuoto kelkraščio konstrukcija yra viena iš nagrinėjamų alternatyvų, kuri gali būti taikoma krašto keliuose, kai siekiama užtikrinti didesnę dangos krašto laikomąją gebą, atsparumą deformacijoms ir ilgaamžiškumą. Šis sprendinys dažniau pasirenkamas tuomet, kai eismo intensyvumas yra padidėjęs, o keliu naudojasi reikšminga sunkiasvorių transporto priemonių dalis.

Asfaltuoto kelkraščio konstrukciją paprastai sudaro du sluoksniai: viršutinis 3–4 cm AC 11 VS asfaltbetonio sluoksnis ir 6–8 cm AC 16 PS arba AC 22 PS pagrindo asfaltbetonis. Esant poreikiui, po asfaltbetoniu gali būti įrengiamas papildomas skaldos ar žvyro pagrindas, sustiprinantis dangos briauną. Kelkraštis formuojamas vienoje plokštumoje su važiuojamąja dalimi arba 1–2 cm žemiau jos, o skersinis nuolydis paprastai siekia 2,0–2,5 %, užtikrinant paviršinio vandens nutekėjimą.

Įrengiant asfaltuotą kelkraštį būtina užtikrinti tinkamą pagrindo sutankinimą, naudoti bituminę emulsiją sukibimui pagerinti ir laikytis asfaltbetonio temperatūrinių klojimo reikalavimų. Dėl to šio varianto įrengimas reikalauja specializuotos technikos ir didesnių darbo sąnaudų.

Asfaltuotas kelkraštis pasižymi didesne laikomąja geba, geru atsparumu deformacijoms ir ilgesniu tarnavimo laiku. Tačiau šis sprendinys yra brangesnis, mažiau pralaidus vandeniui ir reikalauja suderintos drenažo sistemos. Todėl asfaltuotas kelkraštis (A_2) vertinamas kaip viena iš galimų alternatyvų, kuri vėliau bus lyginama su kitais kelkraščių įrengimo sprendiniais, siekiant nustatyti optimalų variantą konkrečiam projektui.

Kelkraščio sutvirtinimas geogrotelių juosta (A_3). Vienas iš nagrinėjamų kelkraščio įrengimo alternatyvų yra kelkraščių sutvirtinimas polimerinėmis geogrotelėmis, kurios naudojamos kaip armuojantis sluoksnis, padidinantis kelkraščio laikomąją gebą ir atsparumą deformacijoms. Šis sprendinys tinkamas tais atvejais, kai kelkraštis patiria padidintas apkrovas arba yra jautrus šoniniams slinkimams. Geogrotelės įrengiamos vadovaujantis KTR 1.01:2008, TRA GRUNTAS 20, LST EN 13249–13252 reikalavimais geosintetiniams gaminiams.

Kelio kelkraščiuose naudojamos polietileno (HDPE arba LDPE) grotelės, kurios pasižymi tvirtumu, ilgaamžiškumu ir geru atsparumu apkrovoms. Pagrindinis jų privalumas – gebėjimas sustiprinti nesurištą kelkraščio sluoksnį ir sumažinti grunto slinkimą, todėl kelkraštis ilgiau išlaiko projektinę formą. Grotelės taip pat pasižymi geromis drenažinėmis savybėmis, leidžiančiomis efektyviau pasišalinti paviršiniam vandeniui.

Geogrotelės klojamos ant sutankinto pagrindo, po kuriuo gali būti naudojami vietiniai žvyro ar žvyringo smėlio gruntai. Virš grotelės paprastai įrengiamas žvyro, žemės arba skaldažolės užpildas, kuris suformuoja galutinį kelkraščio paviršių ir 8 % skersinį nuolydį. Dėl armuojančio efekto kelkraštis tampa atsparesnis transporto sukeliamoms deformacijoms ir krašto trupėjimui.

Pagrindiniai geogrotelių naudojimo privalumai – gerokai padidinta laikomoji geba, sumažintas kelkraščio sėdimas ir išsikraipymas, geras vandens nutekėjimas ir mažesnė erozijos tikimybė. Be to, grotelės yra gaminamos iš perdirbtų HDPE/LDPE atliekų, todėl šis sprendinys pasižymi ir aplinkosauginiais pranašumais.

Kelkraščio sutvirtinimas žvyro mišiniu (A_4). Ketvirtasis nagrinėjamas kelkraščio įrengimo variantas

yra kelkraštis iš žvyro mišinio, kuris dažnai naudojamas žemesnės ar vidutinės kategorijos keliuose dėl nedidelės įrengimo kainos, paprastos technologijos ir gerų drenažinių savybių. Šis sprendinys atitinka KTR 1.01:2008, TRA SBR 19 ir TRA UŽPILDAI 19 reikalavimus nesurištoms dangoms ir kelkraščiams.

Žvyro mišinio kelkraščiui paprastai naudojami 0/32, 0/45 arba 0/56 frakcijų žvyro–skaldos mišiniai, kuriuose leidžiama iki 12 % smulkių dalelių. Toks mišinys gerai tankinamas, pasižymi pakankamu tvirtumu ir laidumu vandeniui, todėl efektyviai nuveda paviršinius vandenis nuo važiuojamosios dalies. Kelkraščio paviršius formuojamas paliekant 8 % skersinį nuolydį, o jo viršuje galima įrengti žolinį sluoksnį, kuris sumažina erozijos tikimybę.

Kelkraščio konstrukcija paprastai susideda iš vieno arba dviejų nesurištų sluoksnių. Apatiniam sluoksniui gali būti naudojami vietiniai žvyro ar žvyringo smėlio gruntai, o viršutiniam – frakcinis žvyro mišinys. Įrengimo metu svarbu užtikrinti optimalų drėgnumą, tinkamą mišinio paskleidimą ir pakankamą sutankinimą, kad būtų pasiekti reikiami laikomosios gebos rodikliai.

Pagrindiniai žvyro mišinio kelkraščio privalumai – maža įrengimo kaina, gera drenažo funkcija, lengva priežiūra ir paprastas atnaujinimas. Tačiau konstrukcija yra mažiau atspari intensyviam eismui, greičiau deformuojasi ir reikalauja periodinio profiliavimo bei papildymo. Taip pat žvyro kelkraščiai yra jautresni erozijai ir šoniniams pažeidimams.

Alternatyvių kelkraščių konstrukcijų inžinerinių sprendimų vertinimas

Alternatyvių kelkraščių konstrukcijų vertinimas atliekamas taikant daugiakriterinę analizę, kuri leidžia įvertinti nagrinėjamus sprendinius pagal ekonominius, technologinius ir kokybinius požymius. Vertinimą sudaro šios pagrindinės dalys:

- Vertinimo kriterijų sistemos sudarymas ir jų reikšmių apskaičiavimas;
- Kriterijų teorinio reikšmingumo nustatymas, taikant Entropijos metodą;
- Kriterijų subjektyvaus reikšmingumo įvertinimas, taikant ekspertinį porinio palyginimo metodą;
- Racionaliausio inžinerinio sprendinio nustatymas, taikant daugiakriterinio naudingumo vertės metodą.

Vertinimo kriterijų sistemos sudarymas ir jų reikšmių apskaičiavimas**.** Kiekviena iš nagrinėjamų kelkraščių konstrukcijų alternatyvų vertinama pagal ekonomiškai ir techniškai pagrįstą kriterijų grupę. Parinkti kriterijai leidžia objektyviai įvertinti medžiagų kainą, įrengimo ypatumus, darbo sąnaudas ir kelkraščio konstrukcijos kokybę. Sudaryta tokia kelkraščių konstrukcijų vertinimo kriterijų sistema:

- **Denginio kaina (K_1), EUR/m²** – kriterijus, parodantis 1 m² medžiagos ar gaminio kainą. Jo skaitinės reikšmės nustatomos pagal gamintojų pateikiamus įkainius.
- **Darbo sąnaudos (K_2), žm.val./m²** – kriterijus, nusakantis darbo laiko poreikį 100 m² kelkraščio dangos įrengimui. Reikšmės nustatomos naudojant gamybinius normatyvus.
- **Mechanizmų darbo sąnaudos (K_3), maš.val./m²** – parodo, kiek laiko įrengimo procese dirba mechanizmai. Skaitinės vertės taip pat nustatomos remiantis gamybiniais normatyvais.
- **Denginio masė (K_4), kg/m²** – kriterijus, nusakantis 1 m² kelkraščio konstrukcijos masę. Reikšmės paimamos iš gaminių techninių charakteristikų arba normatyvų.
- **Darbo sudėtingumas (K_5), kategorija** – apibūdina konstrukcijos įrengimo sudėtingumą ir technologinius reikalavimus. Reikšmės nustatomos remiantis normatyviniais darbo procesų vertinimais.

1 lentelė

Kriterijai/Kelkraščių variantai	Kaina, (EUR/100 m² **K1**	Darbų atlikimo laikas (žm.val./ 100 m² **K2**	Mechanizmų darbo sąnaudos maš.val/100 m² **K3**	Kelkraščio masė t/100m² **K4**	Darbo sudėtingumas, kategorija **K5**
Skaldažolės kelkraštis (**A1**)	536,90	4,20	6,10	27,80	2,00
Asfaltbetonio kelkraštis (**A2**)	3012,45	11,90	4,90	12,60	4,00
Geogrotelių kelkraštis (**A3**)	1718,52	28,00	9,00	40,50	5,00
Žvyro mišinio kelkraštis (**A4**)	572,20	5,20	7,60	20,50	3,00

Šaltinis: sudaryta autorės

Alternatyvių projektinių sprendimų vertinimo kriterijų teorinio reikšmingumo nustatymas, taikant teorinį entropijos metodą. Vertinimo kriterijų teorinis reikšmingumas nustatomas tokia seka:

Remiantis 2 lentelėje pateiktomis kriterijų skaitinėmis reikšmėmis sudaroma pradinių duomenų matricą *P*. 2. Atliekamas pradinių duomenų matricos normalizavimą į bedimensinių dydžių matricą *P*.3. Nustatomas kiekvieno kriterijaus entropijos lygis. 4. Nustatomas kiekvieno kriterijaus kitimo lygis. 5. Apskaičiuojamas kriterijų teorinis reikšmingumas, sudaroma kriterijų prioritetų eilutė.

6. Skaičiavimo rezultatai pavaizduojami grafikai ir pateikiamas jų apibendrinimas.

Remiantis 2 lentelėje pateikta informacija, paruošiami skaičiavimui duomenys, sudarant pradinių duomenų matricą P (2 lentelė).

2 lentelė

Pradinių duomenų matrica

Matrica P					
Variantai/Kriterijai	**K1**	**K2**	**K3**	**K4**	**K5**
A1	536,90	4,20	6,10	27,80	2,00
A2	3012,45	11,90	4,90	12,60	4,00
A3	1718,52	28,00	9,00	40,50	5,00
A4	572,20	5,20	7,60	20,50	3,00
$\sum X_{ij}$	5840,07	49,30	27,6	101,40	14,00

Šaltinis: sudaryta autorės

Atliekamas pradinių duomenų matricos normalizavimas į bedimensinių dydžių matrica. $\bar{P}$. Normalizavimas atliekamas pagal formulę (1.1);

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\Sigma X_{ij}}; \quad (1)$$

Gauti rezultatai surašomi į normalizuotą matricą $\bar{P}$ (3 lentelė)

3 lentelė

Normalizuotos kriterijų reikšmės

Matrica $\bar{P}$				
Alternatyvos / Kriterijai	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**
K1	1,00	0,18	0,31	0,94
K2	1,00	0,35	0,15	0,81
K3	0,80	1,00	0,54	0,64
K4	0,45	1,00	0,31	0,61
K5	1,00	0,50	0,40	0,67

Šaltinis: sudaryta autorės

Pasirenkama vertinimo skalė, pvz., [0;10], [0;100] ir didžiausiai normalizuotos matricos kriterijaus reikšmei priskiriama maksimali vertinimo skalės reikšmė. Pvz.: 1→100. Kitos normalizuotos kriterijų reikšmės apskaičiuojamos pagal proporciją. Pvz.: 0,85→85, 0,72→72 ir t.t. Gauti rezultatai surašomi į kriterijų naudingumo matricą Cij (4 lentelė).

4 lentelė

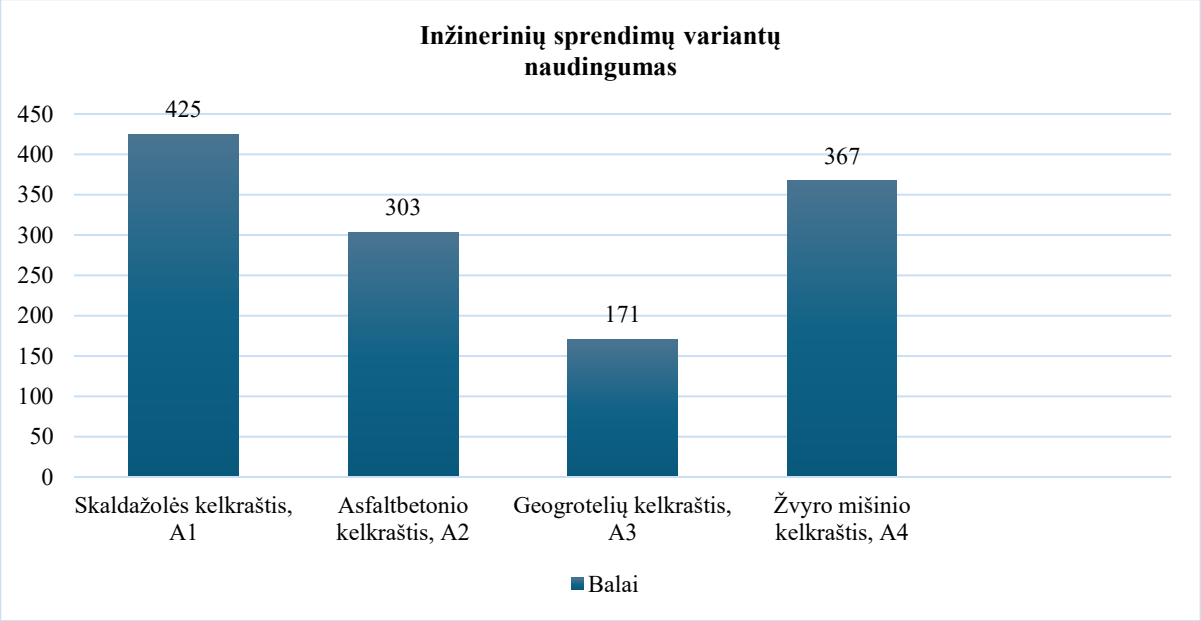
Kriterijų naudingumas (balais)

Matrica C				
Alternatyvos / Kriterijai	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**
K1	100	18	31	94
K2	100	35	15	81
K3	80	100	54	64
K4	45	100	31	61
K5	100	50	40	67
∑	**425**	**303**	**171**	**367**

Šaltinis: sudaryta autorės

Sumuojami kiekvieno kriterijaus surinkti balai, ir užrašoma inžinerinių sprendimų prioritetų eilutė. Geriausias inžinerinis sprendimas yra tas, kurio kriterijai naudingiausi, t.y. surenka didžiausią balų sumą.

Sudaroma alternatyvių kelio tiesimo variantų prioritetų eilutė, rezultatai pavaizduojami grafiškai ir padaromos išvados.



1 pav. Inžinerinių sprendimų variantų naudingumas, kai neįvertintas kriterijų reikšmingumas
Šaltinis: sudaryta autorės

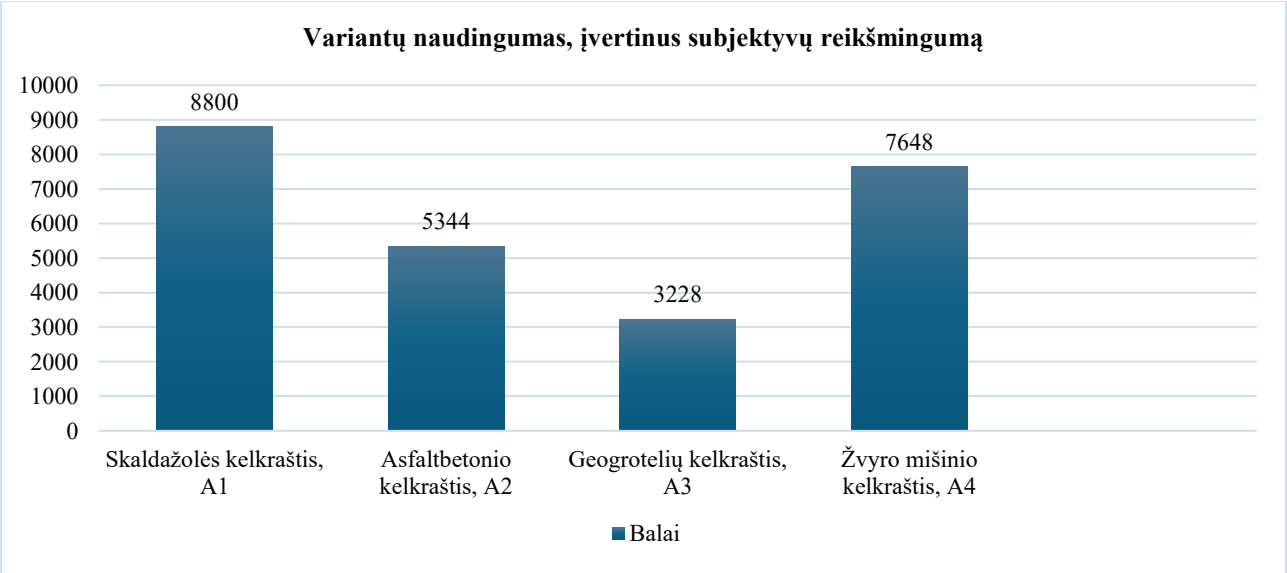
Pagal ekspertų sudarytą eilutę apskaičiuotas kriterijų subjektyvus reikšmingumas q, naudojant ekspertinį porinio palyginimo metodą. Norint įvertinti šį reikšmingumą, apskaičiuojamos kriterijų vertės balais, kurie ir atspindėtų subjektyvaus reikšmingumo įvertinimą. Tam tikslui kiekviena kriterijaus reikšmė (balais) (4 lentelė) dauginama iš kriterijaus subjektyvaus reikšmingumo (cij x qj). Gautos reikšmės surašomos į naują matricą (5 lentelė).

5 lentelė

Kriterijų naudingumas, įvertinus subjektyvų reikšmingumą

Kriterijai	Kriterijų subjektyvus reikšmingumas $\overline{q}$,%	**Matrica $\overline{C} * \overline{q}$**			
		A1	**A2**	**A3**	**A4**
K1	28	2800	504	868	2632
K2	24	2400	840	360	1944
K3	16	1280	1600	864	1024
K4	16	720	1600	496	976
K5	16	1600	800	640	1072
∑		**8800**	**5344**	**3228**	**7648**

Šaltinis: sudaryta autorės



2 pav. Inžinerinių sprendimų variantų naudingumas, kai įvertintas subjektyvus kriterijų reikšmingumas
Šaltinis: sudaryta autorės

Analogiškai nustatomas racionalus sprendimas, kai įvertintas teorinis reikšmingumas, kurio reikšmės apskaičiuotos matematiškai. Tam tikslui sudaroma svertinė matrica $C * qt$, kiekviena kriterijaus reikšmė (balais) dauginama iš kriterijaus subjektyvaus reikšmingumo (cij x qj). Gautos reikšmės surašomos į naują matricą. (6 lentelė)

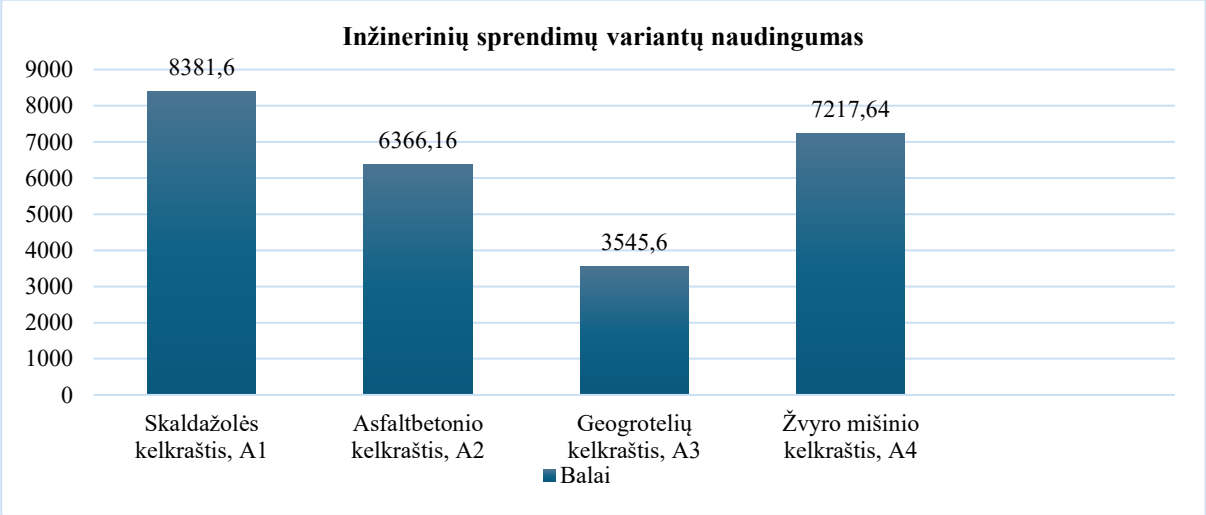
6 lentelė

Kriterijų naudingumas, įvertinus teorinį reikšmingumą

Kriterijai	Kriterijų teorinis reikšmingumas $\overline{q}_t$, %	Matrica $\overline{C} * \overline{q}$			
		A1	**A2**	**A3**	**A4**
K1	17,72	1772,00	318,96	549,32	1665,68
K2	16,72	1672,00	585,20	250,80	1354,32
K3	22,4	1792,00	2240,00	1209,60	1433,60
K4	21,28	957,60	2128,00	660,68	1298,08
K5	21,88	2188,00	1094,00	875,20	1465,96
∑		**8381,60**	**6366,16**	**3545,60**	**7217,64**

Šaltinis: sudaryta autorės

Sumuojami kiekvieno kriterijaus surinkti balai ir nustatomas racionalus inžinerinis sprendimas. Tai tas sprendimas, kurio surinktų balų suma yra didžiausia. Sudaroma sprendimų prioritetų eilutė. Visų skaičiavimų rezultatai pavaizduojami grafiškai 3 paveiksle.



3 pav. Inžinerinių sprendinių variantų naudingumas, kai įvertintas teorinis kriterijų reikšmingumas
Šaltinis: sudaryta autorės

Atlikus inžinerinių sprendinių daugiakriterinį vertinimą, nustatyta, kad didžiausią naudingumo vertę turi skaldažolės kelkraštis (A1) - 8381,6 balo. Tai rodo, kad šis variantas geriausiai atitinka projektui svarbius techninius, ekonominius ir organizacinius kriterijus.

Tinkami kelkraščio konstrukcijos sprendiniai užtikrina vandens nutekėjimą ir neleidžia kelyje susidaryti vandens pleištui (akvaplanavimui). Tai padidina dangos stabilumą, apsaugo kraštus nuo išlūžinėjimo veikiant sunkiasvoriam transportui ir sumažina provėžų susidarymo riziką.

Kelkraščio įtaka kelio dangos stabilumui pasireiškia per šiuos pagrindinius veiksnius:

- **Vandens drenavimas:** Naudojant pralaidžius, stambiagrūdžius gruntus (F1 jautrumo šalčiui klasės), vanduo efektyviai pašalinamas iš po dangos konstrukcijos. Jei kelkraštis prastai drenuoja, vanduo kaupiasi pagrindo sluoksniuose, mažindamas jų laikomąją gebą ir sukeldamas plastines deformacijas.
- **Šoninė atrama:** Tvirtas kelkraštis veikia kaip papildoma šoninė atrama važiuojamosios dalies asfalto sluoksniams. Kai kelkraštis yra nesutvirtintas, važiuojamosios dalies kraštai lieka neprilaikomi, todėl intensyvaus eismo metu greičiau atsiranda išilginių plyšių ir trupinimo defektų.
- **Apsauga nuo šlifavimo ir erozijos:** Sutvirtinti kelkraščiai (pvz., akytbetonio blokeliais ar žvyro/skaldos mišiniais) apsaugo sankasą nuo ratų išmalimo. Taip išlaikomas pastovus skersinis nuolydis, reikalingas sklandžiam lietaus vandens nutekėjimui.

Išvados

1. Identifikuojant alternatyvių įrengimo konstrukcijos sprendinius, lemiančius dangos stabilumą buvo parinktos keturios galimos kelkraščių įrengimo konstrukcijos, kurias galima taikyti kelio kelkraščių įrengimui: Kelkraščio sutvirtinimas skaldažole (A_1), Kelkraščio sutvirtinimas asfaltbetoniu (A_2), Kelkraščio sutvirtinimas geogrotelių juosta (A_3) ir Kelkraščio sutvirtinimas žvyro mišiniu (A_4).

2. Atlikus inžinerinių sprendinių daugiakriterinį vertinimą, nustatyta, kad didžiausią naudingumo vertę turi skaldažolės kelkraštis (A1) - 8381,6 balo. Tai rodo, kad šis variantas geriausiai atitinka svarbius techninius, ekonominius ir organizacinius kriterijus. Gauti rezultatai pagrindžia, kad skaldažolės kelkraštis (A1) yra racionaliausias ir ekonomiškai efektyviausias kelkraščio konstrukcijos sprendinys, tai rodo, kad šis variantas geriausiai atitinka svarbius techninius, ekonominius ir organizacinius dangos stabilumo kriterijus. Kelkraščio įtaka kelio dangos stabilumui pasireiškia per šiuos pagrindinius veiksnius: vandens drenavimas, šoninė atrama, apsauga nuo šlifavimo ir erozijos.

Literatūra

1. Automobilių keliai. Kelių techninis reglamentas KTR 1.01:2008. Patvirtintas 2008 m. sausio 9 d. įsakymu Nr. D1-11/3-3.
2. Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklės (ĮT ŽS 17). Patvirtintos 2017 m. balandžio 3 d. įsakymu Nr. V-111
3. Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 19. Patvirtintos 2019 m. sausio 25 įsakymu Nr. V-16.
4. Automobilių kelių mineralinių medžiagų techninių reikalavimų aprašas TRA MIN 07. Patvirtintas 2007 m. sausio 30 d. įsakymu Nr. V-16.
5. Automobilių kelių mineralinių medžiagų mišinių naudojamų sluoksniams be rišiklių techninių reikalavimų aprašas TRA SBR 07. Patvirtintas 2019 m. gruodžio 20 d. įsakymu Nr. V-191.
6. Automobilių kelių dangos konstrukcijos sluoksnių be rišiklių įrengimo taisyklės ĮT SBR 07. Patvirtintos 2007 m. sausio 30 d. įsakymu Nr. V-18.
7. Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas TRA ASFALTAS 08. Patvirtintas 2009 m. sausio 12 d. įsakymu Nr. V-15.
8. Automobilių kelių dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių įrengimo taisyklės ĮT ASFALTAS 08. Patvirtintos 2009 m. sausio 12 d. įsakymu Nr. V-16.
9. Automobilių kelių transporto priemonių apsauginių atitvarų sistemų projektavimo taisyklės KPT TAS 09 Patvirtintos 2010 m. sausio 7 d. įsakymu Nr. V-8.
10. Automobilių kelių darbo vietų aptvėrimo ir eismo reguliavimo taisyklės DVAER 12. Patvirtintos 2012 m. balandžio 16 d. įsakymu Nr. V-87.
11. Automobilių kelių vertikaliųjų kelio ženklų įrengimo taisyklės ĮT VŽ 14. Patvirtintos 2014 m. kovo 7 d. įsakymu Nr. V-81.
12. Guminė kelio danga [žiūrėta 2026 05 12]. Prieiga per internetą: https://www.skelbiu.lt/skelbimai/gumine-kelio-danga-39578883.html.
13. Kelių horizontaliojo ženklinimo taisyklės. Patvirtintos 2012 m. sausio 31 d. įsakymu Nr. 3-82.
14. Kelio ženklų atramų parinkimo, projektavimo ir įrengimo taisyklės PĮT KŽA 08. Patvirtintos 2008 m. rugsėjo 29 d. įsakymu Nr. V-298.
15. Kelio ženklų įrengimo ir vertikaliojo ženklinimo taisyklės. Patvirtintos 2012 m. sausio 31 d. įsakymu Nr. 3-83.
16. Lietuvos automobilių kelių direkcija. Valstybinės reikšmės kelių priežiūra ir plėtra 2019–2035 metais [žiūrėta 2026 05 12]. Prieiga per internetą https://bit.ly/2wsnPHt
17. Lietuvos Respublikos kelių įstatymas. Įstatymas paskelbtas: Žin. 1995, Nr. 44-1076, i. k. 0951010ISTA000I-891 Nauja redakcija nuo 2002-10-23:Nr. IX-1113, 2002-10-03, Žin. 2002, Nr. 101-4492 (2002-10-23), i. k. 1021010ISTA0IX. Kelių įstatymo Nr. I-891 17 straipsnio pakeitimo įstatymas. Patvirtintas 2020 m. lapkričio 10 d. Nr. XIII-3421.
18. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. Valstybinės reikšmės kelių priežiūra ir plėtra 2019–2035.

ROADSIDE CONSTRUCTION SOLUTIONS AND THEIR INFLUENCE ON PAVEMENT STABILITY

Summary

In recent years, the development and renovation of Lithuania's road infrastructure remain one of the most important areas of the transport sector. The increasing traffic flow, heavy transport loads and natural conditions lead to faster wear of pavements and deterioration of traffic conditions. Therefore, the reconstruction of both national and regional roads is becoming a prerequisite for ensuring traffic safety, comfort and environmental standards.

To ensure reliable transport movement and the durability of the infrastructure, it is necessary to choose a rational solution for the construction of the roadside, which includes the renovation of the structure and the modernization of other elements.

Key words. Entropic expert evaluation method, pairwise expert evaluation method, multi-criteria evaluation method, soil subgrade, asphalt pavement.

TECHNOLOGIJŲ, VAIRUOTOJŲ ELGSENOS IR MATEMATINIŲ MODELIŲ INTEGRACIJA VISUOMENINIO TRANSPORTO SISTEMOSE: SAUGOS IR APLINKOSAUGINIO EFEKTYVUMO VERTINIMAS

Albertas Šarinskas
Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

Anotacija

Visuomeninio transporto sistemų efektyvumas ir tvarumas vis labiau priklauso nuo technologinių sprendimų, vairuotojų elgsenos ir jų tarpusavio sąveikos. Nepaisant spartaus transporto technologijų vystymosi, žmogaus vaidmuo išlieka kritinis, ypač vertinant energijos sąnaudas, emisijas ir saugos rodiklius. Šio tyrimo tikslas – sistemingai išanalizuoti technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveiką visuomeninio transporto sistemose, įvertinant jų poveikį saugai ir aplinkosauginiam efektyvumui. Tyrimas grindžiamas sistemine literatūros apžvalga ir naratyvine sinteze, integruojant transporto inžinerijos, aplinkosaugos ir taikomosios matematikos tyrimus. Nustatyta, kad vairavimo stilius yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių energijos sąnaudas ir emisijas, o pažangios technologijos, tokios kaip ADAS ir telematika, gali reikšmingai optimizuoti šiuos procesus. Tačiau technologijų poveikis yra dvilypis, nes jos ne tik mažina fizinį krūvį, bet ir didina kognityvinę apkrovą bei keičia vairuotojo vaidmenį. Matematiniai ir statistiniai modeliai leidžia integruoti skirtingus veiksnius į vieningą analizės sistemą, suteikdami galimybę prognozuoti riziką, energijos sąnaudas ir emisijas. Tyrimas atskleidžia, kad efektyvus transporto sistemų valdymas reikalauja integruoto požiūrio, jungiančio technologinius sprendimus, vairuotojų elgsenos analizę ir duomenimis grįstą modeliavimą. Gauti rezultatai gali būti taikomi kuriant tvarias, saugias ir efektyvias transporto sistemas.

Reikšminiai žodžiai. Visuomeninis transportas; technologijos; ADAS; emisijos; ekologiškas vairavimas; matematiniai modeliai; transporto tvarumas

Įvadas

Visuomeninio transporto sistemų transformacija pastaraisiais dešimtmečiais yra glaudžiai susijusi su technologijų plėtra, skaitmenizacija ir didėjančiais aplinkosauginiais reikalavimais. Urbanizacijos procesai, augantys transporto srautai ir klimato kaitos iššūkiai lemia poreikį kurti efektyvesnes, saugesnes ir tvaresnes transporto sistemas (Junevičius, 2012: 15). Šiame kontekste visuomeninis transportas atlieka svarbų vaidmenį mažinant individualaus transporto poveikį aplinkai, tačiau jo efektyvumas vis labiau priklauso ne tik nuo techninių sprendimų, bet ir nuo vairuotojų elgsenos bei technologijų integracijos.

Nors technologinė pažanga, įskaitant pažangias vairuotojo pagalbos sistemas, telematiką ir dalinę automatizaciją, suteikia naujų galimybių optimizuoti transporto sistemų veikimą, žmogaus vaidmuo išlieka esminis. Vairuotojų sprendimai daro tiesioginę įtaką ne tik eismo saugai, bet ir energijos sąnaudoms bei emisijoms. Todėl šiuolaikiniai tyrimai vis dažniau orientuojasi į technologijų ir žmogaus sąveiką, siekiant suprasti, kaip šie veiksniai kartu formuoja transporto sistemos efektyvumą (Adamidis et al., 2020: 94-99).

Aplinkosauginis aspektas tampa vienu iš pagrindinių transporto sektoriaus transformacijos veiksnių. Transportas yra vienas didžiausių šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltinių, todėl emisijų mažinimas yra prioritetinis tikslas tiek nacionaliniu, tiek tarptautiniu lygmeniu. Nors transporto priemonių elektrifikacija ir alternatyvūs energijos šaltiniai yra svarbūs sprendimai, vairuotojų elgsena išlieka reikšmingu veiksniu, lemiančiu realų energijos vartojimą (Creutzig et al., 2015: 911).

Matematiniai ir statistiniai modeliai šiame kontekste tampa svarbia analitinė priemonė, leidžianti integruoti skirtingus veiksnius ir prognozuoti jų poveikį. Tokie modeliai suteikia galimybę pereiti nuo aprašomosios analizės prie duomenimis grįsto sprendimų priėmimo, kuris yra būtinas kuriant pažangias transporto sistemas. Integruotas modeliavimo požiūris leidžia vienu metu vertinti saugos, efektyvumo ir aplinkosaugos aspektus, kurie dažnai yra tarpusavyje susiję.

Šio straipsnio tikslas – sistemingai išanalizuoti technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveiką visuomeninio transporto sistemose, įvertinant jų poveikį saugai ir aplinkosauginiam efektyvumui. Siekiama ne tik apibendrinti esamus tyrimus, bet ir pateikti integruotą požiūrį, leidžiantį suprasti kompleksinius procesus, vykstančius šiose sistemose.

Metodologija

Šiame tyrime taikoma metodologinė prieiga grindžiama sisteminės literatūros apžvalgos principais, orientuotais į technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveikos analizę visuomeninio transporto sistemose. Atsižvelgiant į nagrinėjamos problematikos tarpdisciplinišKumą, metodologija integruoja transporto inžinerijos, aplinkosaugos, duomenų analizės ir taikomosios matematikos tyrimus, siekiant sukurti konceptualiai nuoseklų ir analitiškai pagrįstą vertinimo modelį. Skirtingai nei pirmojo

straipsnio atveju, šiame tyrime didesnis dėmesys skiriamas kiekybiniams metodams, modeliavimui ir technologinių sistemų poveikiui.

Tyrimas grindžiamas sistemine literatūros apžvalga su naratyvinės sintezės elementais, leidžiančiais integruoti skirtingų metodologinių prieigų rezultatus. Tokia kombinacija yra būtina dėl nagrinėjamų tyrimų heterogeniškumo, nes analizuojami darbai apima tiek eksperimentinius, tiek modeliavimo, tiek empiriniais duomenimis grįstus tyrimus. Naratyvinė sintezė leidžia ne tik apibendrinti rezultatus, bet ir identifikuoti tarpusavio sąsajas tarp technologinių, elgsenos ir aplinkosauginių veiksnių.

Metodologinis požiūris taip pat apima vairuotojų elgsenos analizę, kuri vertinama kaip vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių tiek saugą, tiek emisijas. Ši analizė grindžiama telematikos duomenimis, empiriniais tyrimais ir modeliavimo rezultatais, leidžiančiais identifikuoti elgsenos modelius ir jų poveikį transporto sistemai. Toks požiūris leidžia integruoti žmogaus veiksnius į technologinius ir matematinius modelius, sukuriant vieningą analizės sistemą.

Nepaisant metodologinio nuoseklumo, tyrimas turi tam tikrų ribotumų, susijusių su analizuojamų tyrimų heterogeniškumu ir duomenų prieinamumu. Skirtingos metodikos, skirtingi vertinimo rodikliai ir nevienodi duomenų šaltiniai apsunkina tiesioginį rezultatų palyginimą. Be to, dalis tyrimų remiasi laboratoriniais duomenimis, kurie ne visada atspindi realias eksploatacijos sąlygas. Šie ribotumai buvo įvertinti interpretuojant rezultatus ir formuluojant išvadas.

Pastarųjų metų metodologinės tendencijos rodo aiškų perėjimą prie duomenimis grįstų ir adaptyvių analizės metodų, kurie leidžia realiu laiku vertinti transporto sistemų veikimą. Dirbtinio intelekto ir didžiųjų duomenų analizės metodai suteikia galimybę integruoti skirtingus duomenų šaltinius ir kurti dinamiškus modelius, kurie gali prisitaikyti prie besikeičiančių sąlygų. Tokios metodologijos tampa vis svarbesnės, siekiant efektyviai valdyti sudėtingas transporto sistemas.

Apibendrinant galima teigti, kad taikyta metodologija leidžia sistemingai ir kritiškai įvertinti technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveiką visuomeninio transporto sistemose. Integruotas požiūris, apimantis literatūros analizę, modeliavimo metodus ir elgsenos vertinimą, suteikia pagrindą formuoti duomenimis grįstus sprendimus, orientuotus į saugos ir aplinkosauginio efektyvumo didinimą.

Technologijų ir transporto sistemų įtaka

Technologijų plėtra yra vienas svarbiausių veiksnių, transformuojančių šiuolaikines visuomeninio transporto sistemas ir iš esmės keičiančių profesionalių vairuotojų darbo pobūdį (Skardžiūtė, 2017: 18). Skaitmenizacija, automatizacija ir pažangių valdymo sistemų integracija ne tik didina transporto priemonių techninį efektyvumą, bet ir keičia žmogaus vaidmenį sistemoje, perkelia dalį funkcijų iš žmogaus į technologiją bei sukuria naują žmogaus–mašinos sąveikos paradigmą. Dėl šios priežasties technologijų įtaka turi būti analizuojama kompleksiškai, vertinant ne tik jų tiesioginį poveikį saugai ir efektyvumui, bet ir jų sąveiką su vairuotojo elgsena bei kognityviniais procesais.

Vienas svarbiausių technologinių pokyčių transporto sektoriuje yra pažangių vairuotojo pagalbos sistemų diegimas, kuris leidžia automatizuoti dalį vairavimo funkcijų ir sumažinti žmogiškųjų klaidų tikimybę (Cicchino, 2017: 289). Tokios sistemos, kaip automatinis avarinis stabdymas, adaptyvi greičio kontrolė ar eismo juostos palaikymas, veikia kaip papildomas saugos sluoksnis, galintis kompensuoti žmogaus reakcijos ribotumus kritinėse situacijose. Šios technologijos ypač svarbios miesto transporto aplinkoje, kur eismo intensyvumas ir situacijų sudėtingumas yra didžiausi. Tačiau kartu su jų privalumais atsiranda ir naujų iššūkių, susijusių su vairuotojo vaidmens transformacija.

Automatizacijos poveikis vairuotojo veiklai pasižymi dvilypumu. Viena vertus, automatizuotos sistemos sumažina fizinį krūvį ir leidžia vairuotojui deleguoti dalį funkcijų technologijai, taip sumažinant nuovargį. Kita vertus, šis procesas keičia kognityvinę veiklą, nes vairuotojas iš aktyvaus valdytojo tampa sistemos stebėtoju (Parasuraman et al., 2000: 286-297). Toks pokytis reikalauja nuolatinio budrumo išlaikymo, tačiau esant mažam aktyvių veiksmų skaičiui gali atsirasti monotonija ir sumažėti situacinis suvokimas. Šis reiškinys, dažnai apibūdinamas kaip „out-of-the-loop“ efektas, rodo, kad automatizacija gali sukelti naujo tipo rizikas, kurios nėra tiesiogiai susijusios su techniniais gedimais, bet kyla iš žmogaus ir sistemos sąveikos.

Technologijų poveikis vairuotojų elgsenai taip pat pasireiškia per pasitikėjimo sistemomis lygį. Per didelis pasitikėjimas automatizuotomis sistemomis gali lemti sumažėjusį dėmesį ir pavėluotą reakciją situacijose, kuriose reikalingas žmogaus įsikišimas. Tuo tarpu nepakankamas pasitikėjimas gali riboti technologijų naudojimą ir sumažinti jų efektyvumą. Todėl svarbu užtikrinti optimalų pasitikėjimo lygį, kuris leistų efektyviai išnaudoti technologijų teikiamas galimybes, išlaikant vairuotojo įsitraukimą.

Telematikos ir duomenų analizės technologijos suteikia naujų galimybių objektyviai vertinti vairuotojų elgseną ir transporto sistemų veikimą. Šios sistemos leidžia realiu laiku rinkti duomenis apie vairavimo parametrus, tokius kaip greitis, pagreitis, stabdymas ar maršruto laikymasis. Analizuojant šiuos duomenis galima identifikuoti neefektyvaus ar rizikingo vairavimo modelius, kurie turi tiesioginį poveikį tiek saugai, tiek energijos sąnaudoms. Toks duomenimis grįstas požiūris leidžia pereiti nuo subjektyvaus vertinimo prie objektyvios analizės, kuri yra būtina kuriant efektyvias valdymo strategijas.

Žmogaus–mašinos sąsaja yra vienas kritinių aspektų, lemiančių technologijų efektyvumą. Informacijos pateikimo būdas, valdymo elementų išdėstymas ir signalizacijos struktūra turi tiesioginę įtaką vairuotojo kognityvinei apkrovai ir dėmesio paskirstymui. Per didelis informacijos kiekis gali sukelti informacinę perkrovą, o nepakankamas – sumažinti situacinį suvokimą. Todėl būtina kurti intuityvias ir ergonomiškai pagrįstas sąsajas, kurios leistų vairuotojui efektyviai apdoroti informaciją ir priimti sprendimus.

Vairuotojo būklės stebėsenos technologijos tampa vis svarbesnės siekiant užtikrinti saugą ir efektyvumą. Tokios sistemos, naudojančios jutiklius ir algoritmus, leidžia realiu laiku vertinti nuovargį, dėmesio lygį ir kitus psichofiziologinius parametrus. Šių sistemų privalumas yra jų gebėjimas anksti identifikuoti rizikines būsenas ir inicijuoti prevencines priemones. Tačiau jų efektyvumas priklauso nuo duomenų tikslumo, algoritmų patikimumo ir integracijos į bendrą transporto sistemą.

Technologijų integracija taip pat vyksta sisteminiu lygmeniu, kuriant išmaniąsias transporto sistemas, kurios apima eismo valdymą, maršrutų optimizavimą ir energijos naudojimo kontrolę. Tokios sistemos leidžia efektyviau paskirstyti transporto srautus, sumažinti vėlavimus ir optimizuoti išteklių naudojimą. Vairuotojas šioje sistemoje tampa vienu iš elementų, sąveikaujančių su skaitmenine infrastruktūra, todėl jo veikla vis labiau priklauso nuo informacinių sistemų kokybės ir patikimumo.

Svarbus aspektas yra technologijų poveikio sąveika su vairuotojų elgsena. Technologijos gali skatinti efektyvesnį vairavimą, tačiau jų poveikis priklauso nuo to, kaip jos yra naudojamos. Pavyzdžiui, telematikos sistemos gali būti naudojamos kaip mokymo ir grįžtamojo ryšio priemonė, skatinanti racionalų vairavimą, tačiau netinkamas jų naudojimas gali būti suvokiamas kaip kontrolės priemonė ir didinti stresą. Todėl technologijų diegimas turi būti lydimas organizacinių sprendimų, užtikrinančių jų priimtinumą ir efektyvumą.

Ateities technologinės tendencijos rodo, kad transporto sistemos taps vis labiau automatizuotos ir integruotos(Stankevičius, 2019: 63). Dirbtinio intelekto sprendimai leis kurti adaptyvias sistemas, kurios galės prognozuoti vairuotojo elgseną ir optimizuoti transporto procesus realiu laiku. Autonominio transporto plėtra gali iš esmės pakeisti vairuotojo vaidmenį, tačiau net ir tokiose sistemose žmogaus vaidmuo išliks svarbus, ypač sprendžiant nestandartines situacijas.

Apibendrinant galima teigti, kad technologijų įtaka visuomeninio transporto sistemoms yra daugialypė ir dinamiška. Nors technologijos suteikia reikšmingų galimybių didinti saugą ir efektyvumą, jos taip pat keičia vairuotojo darbo pobūdį ir sukuria naujų iššūkių, susijusių su žmogaus ir sistemos sąveika. Todėl technologijų diegimas turi būti grindžiamas integruotu požiūriu, kuris apimtų techninius, kognityvinius ir organizacinius aspektus, siekiant užtikrinti optimalų jų veikimą transporto sistemose.

Aplinkosauginiai ir emisijų aspektai

Aplinkosauginiai ir emisijų aspektai visuomeninio transporto sistemose tampa vis svarbesniu tyrimų objektu, ypač atsižvelgiant į globalius klimato kaitos iššūkius ir griežtėjančius tarptautinius reikalavimus mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. Nors visuomeninis transportas laikomas viena iš efektyviausių priemonių mažinti individualaus transporto poveikį aplinkai, jo eksploatacinis efektyvumas ir realus emisijų lygis išlieka stipriai priklausomi nuo veiklos organizavimo, technologinių sprendimų ir, svarbiausia, vairuotojų elgsenos. Dėl šios priežasties aplinkosauginiai aspektai turi būti analizuojami integruotai, vertinant technologijų, žmogaus veiksnių ir eksploatacinių sąlygų sąveiką.

Transporto sektorius yra vienas didžiausių anglies dioksido ir kitų teršalų šaltinių, ypač urbanizuotose teritorijose, kuriose transporto srautai yra intensyviausi (Kažukauskas, 2016: 7). Visuomeninis transportas, nors ir pasižymi mažesnėmis emisijomis vienam keleiviui, vis dėlto generuoja reikšmingą absoliutų emisijų kiekį dėl nuolatinės eksploatacijos ir didelio maršrutų tankio. Todėl siekiant mažinti bendrą transporto sistemos poveikį aplinkai būtina ne tik modernizuoti transporto priemones, bet ir optimizuoti jų eksploataciją bei vairuotojų elgseną.

Vairavimo stilius yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių energijos sąnaudas ir emisijų kiekį (Ericsson, 2001: 325-345). Agresyvus vairavimas, pasižymintis staigiais greitėjimais, intensyviu stabdymu ir dažnais greičio svyravimais, didina variklio apkrovą ir lemia neefektyvų kuro naudojimą. Tokie vairavimo modeliai ne tik didina anglies dioksido emisijas, bet ir skatina azoto oksidų bei kietųjų dalelių susidarymą.

Priešingai, tolygus ir iš anksto planuojamas vairavimas leidžia optimizuoti variklio darbo režimą, sumažinti energijos sąnaudas ir išlaikyti stabilesnį emisijų lygį. Ši priklausomybė rodo, kad vairuotojų elgsena yra vienas iš svarbiausių kintamųjų, kurį galima valdyti siekiant mažinti aplinkosauginį poveikį (Šlapikaitė, 2014: 69).

Ekologiško vairavimo principai yra vienas efektyviausių būdų mažinti emisijas be didelių technologinių investicijų. Šie principai apima racionalų greičio pasirinkimą, ankstyvą stabdymą, optimalią pavarų keitimo strategiją ir bendrą transporto priemonės darbo režimo optimizavimą. Tokia vairavimo strategija leidžia ne tik sumažinti kuro sąnaudas, bet ir sumažina mechaninių komponentų nusidėvėjimą, kas ilgainiui didina transporto sistemos efektyvumą. Tačiau praktinis šių principų įgyvendinimas priklauso nuo vairuotojų mokymo, motyvacijos ir darbo sąlygų, todėl būtina užtikrinti sisteminį požiūrį į jų diegimą.

Transporto priemonių elektrifikacija yra viena pagrindinių strategijų, siekiant mažinti transporto sektoriaus emisijas. Elektriniai autobusai pasižymi nulinėmis tiesioginėmis emisijomis ir didesniu energijos panaudojimo efektyvumu, palyginti su vidaus degimo varikliais. Be to, jie sumažina triukšmo taršą, kas yra svarbu miesto aplinkoje. Tačiau svarbu pažymėti, kad elektrifikacija nepanaikina žmogaus vaidmens, nes vairavimo stilius vis dar daro reikšmingą įtaką energijos suvartojimui (Meškauskienė, 2022: 33). Pavyzdžiui, regeneracinio stabdymo efektyvumas priklauso nuo vairuotojo gebėjimo optimaliai valdyti transporto priemonę, todėl net ir pažangiausios technologijos negali užtikrinti maksimalaus efektyvumo be tinkamos elgsenos.

Vertinant aplinkosauginį poveikį, būtina taikyti gyvavimo ciklo analizės principus, kurie leidžia įvertinti transporto priemonės poveikį visais jos gyvavimo etapais. Nors elektrinės transporto priemonės eksploatacijos metu neišskiria teršalų, jų gamyba ir energijos tiekimas gali turėti reikšmingą netiesioginį poveikį aplinkai. Todėl tikrasis aplinkosauginis efektyvumas priklauso nuo energijos gamybos šaltinių ir visos transporto sistemos struktūros. Šis aspektas rodo, kad emisijų analizė turi būti atliekama kompleksiškai, integruojant technologinius ir eksploatacinius veiksnius.

Svarbus šio tyrimo aspektas yra aplinkosauginių ir psichofiziologinių veiksnių sąveika. Vairuotojų būklė, ypač nuovargis ir stresas, gali turėti netiesioginį poveikį emisijoms, nes ji lemia vairavimo stiliaus pokyčius. Nuovargis gali sumažinti vairavimo tikslumą ir padidinti greičio svyravimus, o stresas gali skatinti agresyvesnį vairavimą (Zaranka, 2013: 4). Be to, darbo organizavimas, ypač laiko spaudimas ir nerealūs tvarkaraščiai, gali versti vairuotojus rinktis mažiau efektyvias vairavimo strategijas. Tai rodo, kad aplinkosauginis efektyvumas yra glaudžiai susijęs su žmogaus veiksniais ir negali būti vertinamas atskirai nuo darbo sąlygų.

Technologijos suteikia papildomų galimybių mažinti emisijas, ypač naudojant telematikos ir realaus laiko duomenų analizės sistemas. Šios sistemos leidžia stebėti vairavimo stilių, identifikuoti neefektyvius elgsenos modelius ir teikti rekomendacijas vairuotojams. Tokie sprendimai gali būti naudojami tiek mokymų procese, tiek kasdienėje veikloje, siekiant skatinti racionalų vairavimą. Be to, maršrutų optimizavimo sistemos leidžia sumažinti nereikalingus sustojimus ir greičio pokyčius, kas taip pat prisideda prie emisijų mažinimo.

Pastaraisiais metais aplinkosaugos tyrimuose vis didesnis dėmesys skiriamas integruotam požiūriui, kuris apima technologijas, vairuotojų elgseną ir sisteminį valdymą. Tokie modeliai leidžia vienu metu vertinti kelis kriterijus, tokius kaip sauga, energijos sąnaudos ir emisijos, ir ieškoti optimalių sprendimų. Tai ypač svarbu kuriant tvarias transporto sistemas, kuriose skirtingi tikslai turi būti suderinti.

Ateities tyrimų kryptys rodo, kad aplinkosauginis efektyvumas vis labiau priklausys nuo duomenimis grįstų sprendimų ir dirbtinio intelekto taikymo. Tokios technologijos leis prognozuoti energijos sąnaudas, optimizuoti vairavimo strategijas ir adaptuoti transporto sistemas realiu laiku. Taip pat tikėtina, kad didės individualizuotų sprendimų svarba, leidžianti atsižvelgti į konkrečių vairuotojų elgsenos ypatumus ir pritaikyti rekomendacijas pagal jų darbo stilių.

Apibendrinant galima teigti, kad aplinkosauginiai ir emisijų aspektai yra integrali visuomeninio transporto sistemų dalis, kuri tiesiogiai priklauso nuo technologijų, vairuotojų elgsenos ir darbo organizavimo. Efektyvus emisijų mažinimas reikalauja kompleksinio požiūrio, kuris apimtų ne tik techninius sprendimus, bet ir žmogaus veiksnių integraciją, siekiant sukurti tvarią ir efektyvią transporto sistemą..

Matematiniai ir statistiniai modeliai

Matematiniai ir statistiniai modeliai sudaro pagrindą šiuolaikinei transporto sistemų analizei, leidžiančiai kiekybiškai įvertinti technologijų, vairuotojų elgsenos ir aplinkosauginių veiksnių sąveiką (Baublys, 1997: 102). Kompleksinė visuomeninio transporto sistema pasižymi dideliu kintamųjų skaičiumi, nelinearinėmis priklausomybėmis ir reikšmingu neapibrėžtumu, todėl tradiciniai deterministiniai metodai

dažnai yra nepakankami. Dėl šios priežasties vis dažniau taikomi pažangūs modeliavimo metodai, kurie leidžia integruoti skirtingus duomenų šaltinius ir prognozuoti sistemos elgseną įvairiomis sąlygomis.

Vienas svarbiausių modeliavimo objektų yra vairuotojų elgsenos ir psichofiziologinės būklės poveikis transporto sistemos veikimui. Nuovargio ir reakcijos laiko modeliai leidžia kiekybiškai įvertinti žmogaus būklės įtaką sprendimų priėmimui ir eismo saugai. Tokie modeliai dažnai grindžiami dinaminėmis funkcijomis, kurios aprašo nuovargio kaupimąsi priklausomai nuo darbo trukmės, poilsio intervalų ir cirkadinių veiksnių. Šių modelių svarba yra ta, kad jie leidžia identifikuoti kritines būsenas, kuriose vairuotojo veiklos efektyvumas reikšmingai sumažėja, ir prognozuoti galimas rizikas.

Reakcijos laiko modeliavimas yra svarbus tarpinis etapas, leidžiantis susieti psichofiziologinę būklę su saugos rezultatais. Statistiniai modeliai rodo, kad reakcijos laikas yra jautrus nuovargio, streso ir kognityvinės apkrovos pokyčiams, o jo padidėjimas turi disproporcingą poveikį eismo įvykių tikimybei. Ši nelinearinė priklausomybė yra svarbi kuriant rizikos vertinimo sistemas, nes ji leidžia identifikuoti ribines būsenas, kuriose sauga staigiai blogėja.

Eismo saugos analizėje plačiai taikomi tikimybiniai modeliai, leidžiantys įvertinti įvairių veiksnių įtaką eismo įvykių tikimybei. Logistinė regresija yra vienas dažniausiai naudojamų metodų, nes ji leidžia modeliuoti dvejetainius rezultatus ir įvertinti skirtingų kintamųjų svarbą. Tokie modeliai suteikia galimybę nustatyti, kaip nuovargis, darbo krūvis ar vairavimo elgsena veikia riziką, ir leidžia identifikuoti kritinius slenksčius, kuriuos viršijus tikimybė ženkliai padidėja. Be to, daugiamatė analizė leidžia įvertinti veiksnių sąveiką, kuri yra būtina analizuojant kompleksines sistemas.

Transporto emisijų modeliavimas taip pat remiasi matematiniais metodais, kurie leidžia nustatyti ryšius tarp vairavimo parametrų ir energijos sąnaudų (Pareigis, 2012: 5). Greitis, pagreitis ir transporto priemonės darbo režimas yra pagrindiniai kintamieji, kurie daro įtaką emisijų lygiui. Modeliai rodo, kad staigūs pagreičiai ir dažni greičio pokyčiai ženkliai didina kuro sąnaudas, o stabilus vairavimas leidžia pasiekti optimalų energijos naudojimą. Tokie modeliai yra ypač svarbūs vertinant eco-driving strategijų efektyvumą ir jų poveikį aplinkosaugai.

Neapibrėžtumo analizėje svarbi vieta tenka simuliaciniams metodams, kurie leidžia modeliuoti atsitiktinius procesus ir įvertinti skirtingų scenarijų tikimybes. Monte Carlo tipo simuliacijos suteikia galimybę generuoti daugybę galimų situacijų ir analizuoti jų pasiskirstymą, kas yra ypač svarbu transporto sistemose, kuriose egzistuoja didelis variabilumas. Šie metodai leidžia įvertinti ne tik vidutines reikšmes, bet ir ekstremalias situacijas, kurios dažnai yra svarbiausios saugos požiūriu.

Daugiakriterinė analizė tampa vis svarbesnė, nes transporto sistemose reikia vienu metu vertinti kelis tikslus, kurie dažnai yra tarpusavyje prieštaringi. Saugos, efektyvumo ir aplinkosaugos tikslai ne visada sutampa, todėl būtina rasti kompromisinius sprendimus. Daugiakriteriniai metodai leidžia struktūruotai įvertinti skirtingus kriterijus ir nustatyti optimalias strategijas, atsižvelgiant į jų svarbą. Tokie metodai yra ypač naudingi planuojant transporto sistemas ir vertinant skirtingų technologinių sprendimų poveikį.

Statistiniai metodai sudaro pagrindą empirinių duomenų analizei ir modelių validacijai. Regresinė analizė, koreliacijos analizė ir dispersinė analizė leidžia nustatyti ryšius tarp kintamųjų ir įvertinti jų statistinį reikšmingumą. Tačiau svarbu užtikrinti duomenų kokybę ir tinkamą metodų taikymą, nes netinkamai parinkti modeliai gali lemti klaidingas išvadas. Todėl vis didesnis dėmesys skiriamas duomenų paruošimui, filtravimui ir validacijai.

Integruotas modeliavimo požiūris tampa vienu svarbiausių šiuolaikinių tyrimų elementų, nes leidžia sujungti skirtingus modelius į vieningą sistemą. Tokie modeliai gali apimti vairuotojų būklės analizę, eismo saugą ir emisijų vertinimą vienu metu, leidžiant geriau suprasti jų tarpusavio sąveiką. Pavyzdžiui, nuovargio modeliai gali būti naudojami prognozuoti reakcijos laiką, kuris integruojamas į rizikos modelius, o vairavimo elgsena gali būti siejama su emisijų modeliais. Toks požiūris leidžia kurti holistinius sprendimus, kurie atsižvelgia į visus svarbiausius veiksnius.

Pastaraisiais metais modeliavimo metodai sparčiai evoliucionuoja, integruojant dirbtinio intelekto ir mašininio mokymosi sprendimus. Šie metodai leidžia analizuoti didelius duomenų kiekius ir identifikuoti sudėtingas priklausomybes, kurios nėra lengvai aprašomos tradiciniais metodais. Mašininio mokymosi modeliai gali būti naudojami prognozuoti vairuotojų elgseną, energijos sąnaudas ar eismo įvykių tikimybę, remiantis realaus laiko duomenimis. Tokie modeliai yra adaptyvūs ir gali nuolat tobulėti, didindami prognozavimo tikslumą.

Ateities tyrimų kryptys rodo, kad modeliavimas taps dar labiau individualizuotas ir integruotas. Skirtingi vairuotojai pasižymi skirtingomis elgsenos ir fiziologinėmis savybėmis, todėl universalūs modeliai gali būti nepakankamai tikslūs. Individualizuoti modeliai, kurie atsižvelgia į konkretaus vairuotojo ypatumus, gali reikšmingai pagerinti sprendimų efektyvumą. Be to, skaitmeninių dvynių koncepcija suteikia

galimybę kurti virtualias transporto sistemų kopijas, leidžiančias testuoti įvairius scenarijus be realios rizikos.

Apibendrinant galima teigti, kad matematiniai ir statistiniai modeliai yra būtini siekiant suprasti ir valdyti visuomeninio transporto sistemas. Jie leidžia integruoti technologijų, vairuotojų elgsenos ir aplinkosauginių veiksnių poveikį į vieningą analizės sistemą, kuri yra būtina kuriant efektyvias ir tvarias transporto strategijas. Integruotas, duomenimis grįstas ir adaptyvus modeliavimo požiūris tampa pagrindiniu įrankiu sprendžiant šiuolaikinius transporto sektoriaus iššūkius (Vipartas, 2013: 12).

Diskusija

Atlikta analizė leidžia teigti, kad technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveika visuomeninio transporto sistemose sudaro kompleksinę, daugiasluoksnę struktūrą, kurios veikimą lemia ne pavieniai veiksniai, o jų integruotas poveikis. Skirtingai nei tradicinėse transporto analizėse, kuriose technologijos ir žmogaus elgsena dažnai nagrinėjamos atskirai, šis tyrimas atskleidžia, kad jų sąveika yra esminė siekiant užtikrinti tiek saugą, tiek aplinkosauginį efektyvumą. Todėl diskusija orientuojama į šių veiksnių tarpusavio priklausomybės ir jų integracijos reikšmę.

Vienas pagrindinių rezultatų yra tai, kad technologijos negali būti laikomos universaliu sprendimu transporto sistemų problemoms spręsti, jei neatsižvelgiama į vairuotojų elgseną ir kognityvinius procesus. Nors pažangios vairuotojo pagalbos sistemos ir automatizacija gali sumažinti klaidų tikimybę, jų efektyvumas priklauso nuo to, kaip vairuotojai sąveikauja su šiomis sistemomis. Automatizacijos poveikis yra dvilypis – ji mažina fizinį krūvį, tačiau tuo pačiu gali sumažinti budrumą ir situacinį suvokimą. Šis reiškinys rodo, kad technologijų integracija turi būti grindžiama žmogaus–mašinos sąveikos principais, o ne vien techniniu efektyvumu.

Vairuotojų elgsena išlieka vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių tiek saugą, tiek emisijas. Analizė parodė, kad net ir pažangiausios technologijos negali užtikrinti optimalaus sistemos veikimo, jei vairavimo stilius yra neefektyvus. Agresyvus vairavimas didina ne tik eismo įvykių tikimybę, bet ir energijos sąnaudas bei emisijas, todėl šie aspektai turi būti vertinami kartu. Tai leidžia daryti išvadą, kad vairuotojų elgsena yra jungiamasis elementas tarp saugos ir aplinkosaugos tikslų.

Matematiniai ir statistiniai modeliai suteikia galimybę integruoti šiuos veiksnius į vieningą analizės sistemą, tačiau jų taikymas susiduria su tam tikrais iššūkiais. Vienas iš pagrindinių iššūkių yra modelių sudėtingumas ir duomenų prieinamumas. Nors pažangūs modeliai gali tiksliai atspindėti realias sąlygas, jų efektyvumas priklauso nuo duomenų kokybės ir kiekio. Be to, dauguma modelių remiasi supaprastintomis prielaidomis, kurios ne visada atitinka realias transporto sistemų sąlygas. Todėl būtina toliau plėtoti modelius, kurie galėtų geriau atspindėti nelinearines sąveikas ir dinamiškus procesus.

Svarbus diskusijos aspektas yra integruoto požiūrio būtinybė. Tradiciškai sauga, efektyvumas ir aplinkosauga buvo nagrinėjami kaip atskiri tikslai, tačiau šis tyrimas rodo, kad jie yra glaudžiai susiję. Pavyzdžiui, vairavimo strategijos, kurios mažina emisijas, dažnai tuo pačiu mažina ir eismo įvykių riziką, nes jos grindžiamos tolygiu ir prognozuojamu vairavimu. Tai rodo, kad integruoti modeliai, vertinantys kelis kriterijus vienu metu, gali būti efektyvesni nei atskirų aspektų optimizavimas.

Technologijų vaidmuo šiame kontekste yra svarbus, tačiau jų poveikis priklauso nuo jų integracijos lygio ir naudojimo strategijos. Telematikos ir duomenų analizės sistemos suteikia galimybę realiu laiku stebėti vairuotojų elgseną ir teikti grįžtamąjį ryšį, kuris gali būti naudojamas tiek mokymui, tiek operatyviam valdymui. Tačiau svarbu užtikrinti, kad šios sistemos būtų naudojamos kaip pagalbos priemonė, o ne kaip kontrolės mechanizmas, nes priešingu atveju jos gali didinti stresą ir mažinti darbuotojų motyvaciją.

Metodologiniu požiūriu analizė atskleidžia, kad esami tyrimai dažnai yra fragmentuoti ir orientuoti į atskirus aspektus, o ne į jų integraciją. Skirtingos disciplinos naudoja skirtingus metodus ir rodiklius, todėl sunku sukurti vieningą analizės sistemą. Tai rodo, kad būtina plėtoti tarpdisciplininius tyrimus, kurie sujungtų technologinius, elgsenos ir aplinkosauginius aspektus į vieną modelį. Tokie tyrimai galėtų suteikti naujų įžvalgų ir padėti kurti efektyvesnes transporto sistemas.

Dar viena svarbi problema yra realaus laiko duomenų naudojimo trūkumas. Nors telematikos sistemos suteikia galimybę rinkti didelius duomenų kiekius, jų integracija į analizės ir sprendimų priėmimo procesus dar nėra pakankamai išplėtota. Ateityje būtina plėtoti sistemas, kurios galėtų ne tik rinkti duomenis, bet ir juos analizuoti realiu laiku, leidžiant dinamiškai adaptuoti transporto sistemų veikimą.

Praktiniu požiūriu tyrimo rezultatai rodo, kad efektyvus transporto sistemų valdymas reikalauja kompleksinių sprendimų (Juchnevičius, 2022: 6). Pirma, būtina integruoti technologijas su vairuotojų mokymu ir elgsenos valdymu, siekiant užtikrinti jų efektyvų naudojimą. Antra, svarbu naudoti matematinius modelius sprendimų priėmimui pagrįsti, ypač planuojant maršrutus ir optimizuojant energijos naudojimą.

Trečia, būtina atsižvelgti į aplinkosauginius tikslus, kurie turi būti integruoti į bendrą transporto sistemos strategiją.

Ateities tyrimų kryptys rodo, kad transporto sistemų analizė vis labiau orientuosis į duomenimis grįstus ir adaptyvius modelius. Dirbtinio intelekto metodai leis analizuoti didelius duomenų kiekius ir identifikuoti sudėtingas priklausomybes, kurios nėra lengvai pastebimos tradiciniais metodais. Tokios sistemos galės prognozuoti vairuotojų elgseną, optimizuoti energijos sąnaudas ir adaptuoti transporto sistemas realiu laiku. Taip pat tikėtina, kad didės individualizuotų sprendimų svarba, leidžianti atsižvelgti į konkrečių vairuotojų ypatumus.

Apibendrinant galima teigti, kad technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių integracija yra esminė sąlyga kuriant efektyvias ir tvarias visuomeninio transporto sistemas. Šių veiksnių sąveika lemia bendrą sistemos veikimą, todėl jų analizė turi būti grindžiama integruotu ir tarpdisciplininiu požiūriu. Tik toks požiūris leidžia užtikrinti, kad transporto sistemos būtų ne tik technologiškai pažangios, bet ir saugios, efektyvios bei aplinkai draugiškos.

Išvados

1. Atlikta analizė leidžia teigti, kad visuomeninio transporto sistemų efektyvumas ir tvarumas yra kompleksinis rezultatas, kurį lemia technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių sąveika. Šie elementai sudaro integruotą sistemą, kurioje kiekvieno komponento poveikis priklauso nuo bendros sistemos struktūros ir veikimo sąlygų. Todėl transporto sistemų analizė turi būti grindžiama ne pavienių veiksnių vertinimu, o jų tarpusavio sąveikos supratimu.
2. Vienas svarbiausių šios analizės rezultatų yra tai, kad technologijos, nors ir suteikia reikšmingų galimybių didinti saugą ir efektyvumą, negali užtikrinti optimalaus sistemos veikimo be tinkamos vairuotojų elgsenos. Nustatyta, kad vairavimo stilius yra kritinis veiksnys, lemiantis tiek eismo saugą, tiek energijos sąnaudas ir emisijų lygį. Agresyvus vairavimas didina tiek avarijų tikimybę, tiek transporto poveikį aplinkai, tuo tarpu racionalus ir prognozuojamas vairavimas leidžia pasiekti sinerginį efektą, mažinant tiek riziką, tiek emisijas.
3. Tyrimas taip pat parodė, kad technologijų poveikis yra dvilypis. Viena vertus, pažangios sistemos gali sumažinti žmogiškųjų klaidų tikimybę ir optimizuoti transporto procesus, tačiau kita vertus, jos keičia vairuotojo vaidmenį ir gali sukelti naujų rizikų, susijusių su sumažėjusiu budrumu ir situaciniu suvokimu. Todėl technologijų diegimas turi būti grindžiamas žmogaus–mašinos sąveikos principais, užtikrinant, kad technologijos papildytų, o ne pakeistų žmogaus gebėjimus.
4. Matematiniai ir statistiniai modeliai išryškėja kaip esminė priemonė, leidžianti integruoti skirtingus veiksnius ir kiekybiškai įvertinti jų poveikį. Tokie modeliai suteikia galimybę prognozuoti eismo įvykių tikimybę, energijos sąnaudas ir emisijas, taip pat optimizuoti transporto sistemų veikimą. Nustatyta, kad integruoti modeliai, apimantys vairuotojų elgseną, technologinius sprendimus ir aplinkosauginius parametrus, yra efektyvesni nei atskirų aspektų analizė.
5. Svarbi išvada yra ta, kad sauga ir aplinkosauga transporto sistemose yra glaudžiai susiję tikslai, kurie turi būti vertinami kartu. Vairavimo strategijos, orientuotos į emisijų mažinimą, dažnai tuo pačiu mažina ir eismo įvykių riziką, nes jos grindžiamos tolygiu ir prognozuojamu vairavimu. Tai rodo, kad integruotas požiūris, apimantis kelis kriterijus vienu metu, leidžia pasiekti geresnių rezultatų nei atskirų tikslų optimizavimas.
6. Praktiniu požiūriu tyrimo rezultatai leidžia suformuluoti kelias pagrindines kryptis, kurios gali prisidėti prie efektyvesnių transporto sistemų kūrimo. Pirma, būtina integruoti technologinius sprendimus su vairuotojų mokymu, siekiant užtikrinti jų tinkamą naudojimą. Antra, svarbu naudoti duomenimis grįstus modelius, kurie leistų optimizuoti maršrutus, energijos naudojimą ir vairavimo strategijas. Trečia, būtina į transporto sistemų valdymą integruoti aplinkosauginius tikslus, siekiant mažinti emisijas ir didinti tvarumą.
7. Analizė taip pat atskleidė metodologinius iššūkius, susijusius su duomenų prieinamumu ir modelių integracija. Skirtingi duomenų šaltiniai ir metodai apsunkina vieningos analizės sistemos kūrimą, todėl būtina plėtoti standartizuotus metodus ir rodiklius. Be to, realaus laiko duomenų integracija į modelius išlieka viena pagrindinių ateities tyrimų krypčių.
8. Ateities tyrimų kontekste svarbu plėtoti adaptyvius ir individualizuotus modelius, kurie galėtų atsižvelgti į vairuotojų skirtumus ir dinamiškai prisitaikyti prie besikeičiančių sąlygų. Dirbtinio intelekto metodai suteikia galimybę analizuoti didelius duomenų kiekius ir kurti prognozavimo sistemas, kurios galėtų būti taikomos realiu laiku. Tokios sistemos leistų ne tik geriau suprasti transporto sistemų veikimą, bet ir aktyviai jį valdyti.

Apibendrinant galima teigti, kad technologijų, vairuotojų elgsenos ir matematinių modelių integracija yra esminė sąlyga kuriant saugias, efektyvias ir tvarias visuomeninio transporto sistemas. Tik kompleksinis,

duomenimis grįstas ir tarpdisciplininis požiūris leidžia pasiekti optimalius rezultatus, atsižvelgiant į šiuolaikinius transporto sektoriaus iššūkius ir ateities tendencijas.

Literatūra

1. Adamidis, F. K., Mantouka, E. G., & Vlahogianni, E. I. (2020). Effects of controlling aggressive driving behavior on network-wide traffic flow and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *9*(3), 263–276. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043020300344
2. Baublys, A. (1997). *Transporto sistemos teorijos įvadas*. https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/124949
3. Cicchino, J. B. (2017). Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates. *Accident Analysis & Prevention*, *99*, 142–152. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457516304006
4. Creutzig, F., Jochem, P., Edelenbosch, O. Y., Mattauch, L., Vuuren, D. P. V., McCollum, D., & Minx, J. (2015). Transport: A roadblock to climate change mitigation? *Science*, *350*(6263), 911–912. https://doi.org/10.1126/science.aac8033
5. Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *6*(5), 325–345. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920901000037
6. Juchnevičius, G. (2022). *Lietuvos valstybinės reikšmės kelių priežiūros lygių nustatymo metodikos vertinimas ir tobulinimas* [PhD Thesis, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.]. https://gs.elaba.lt/object/elaba:133004080/
7. Junevičius, R. (2012). *Transporto srautų modeliavimas sutelktųjų parametrų metodu gatvių tinkle*. https://gs.elaba.lt/object/elaba:2087191/
8. Kažukauskas, M. (2016). *Kelių transporto priemonių sukeliamos taršos mieste skaičiavimo ir vertinimo metodikos tobulinimas* [PhD Thesis, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.]. https://gs.elaba.lt/object/elaba:16214233/
9. Meškauskienė, G. (2022). *Europos žaliasis kursas: Elektromobilių rinkos teisinis reguliavimas* [PhD Thesis, Mykolo Romerio universitetas.]. https://gs.elaba.lt/object/elaba:130360818/
10. Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, *30*(3), 286–297. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/844354/
11. Pareigis, A. (2012). *Eismo automobilių kelių darbo zonose tyrimas*. https://gs.elaba.lt/object/elaba:1881591/
12. Skardžiūtė, J. (2017). *Lietuvos kelių transporto vertinimas darnios plėtros kontekste* [PhD Thesis, Kauno technologijos universitetas.]. https://epubl.ktu.edu/object/elaba:24996122/
13. Šlapikaitė, S. (2014). *Darnaus transporto valdymo problemos Lietuvoje*. https://epublications.vu.lt/object/elaba:2157796/
14. Stankevičius, T. (2019). *Vandens įpurškimo įtaka dujiniais degalais varomo kibirkštinio uždegimo variklio efektyviesiems ir ekologiniams rodikliams* [PhD Thesis, Vilniaus Gedimino technikos universitetas.]. https://gs.elaba.lt/object/elaba:38765583/
15. Vipartas, T. (2013). *Lietuvos lengvųjų automobilių parko atnaujinimo politika: Ekologinis požiūris*. https://gs.elaba.lt/object/elaba:1886174/
16. Zaranka, J. (2013). *Kelių transporto priemonių vairuotojų elgsenos veiksnių įtakos eismo saugai tyrimas*. https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/108520

INTEGRATION OF TECHNOLOGIES, DRIVER BEHAVIOR, AND MATHEMATICAL MODELS IN PUBLIC TRANSPORT SYSTEMS: ASSESSMENT OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY

Summary

The efficiency and sustainability of public transport systems are increasingly dependent on technological solutions, driver behavior, and their interaction. Despite the rapid development of transport technologies, the human role remains critical, particularly in the assessment of energy consumption, emissions, and safety indicators. The aim of this study is to systematically analyze the interaction between technologies, driver behavior, and mathematical models in public transport systems, evaluating their impact on safety and environmental efficiency. The study is based on a systematic literature review and narrative synthesis, integrating research from transport engineering, environmental science, and applied mathematics. The findings indicate that driving style is one of the key factors influencing energy consumption and emissions, while advanced technologies, such as Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and telematics, can significantly optimize these processes. However, the impact of technologies is dual in nature, as they not only reduce physical workload but also increase cognitive load and transform the role of the driver. Mathematical and statistical models enable the integration of different factors into a unified analytical framework, providing the capability to predict risk, energy consumption, and emissions. The study reveals that effective management of transport systems requires an integrated approach that combines technological solutions, driver behavior analysis, and data-driven modeling. The results can be applied in the development of sustainable, safe, and efficient transport systems.

Key words: Public transport; technologies; ADAS; emissions; eco-driving; mathematical models; transport sustainability

INŽINERIJOS MOKSLŲ KRYTIS

ENVIRONMENTAL CHALLENGES OF FUTURE AERODYNAMICS

Audrius Jonušas
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract
The field of aerodynamics faces a range of environmental challenges in the future as the demand for faster and more fuel-efficient aircraft increases. These challenges include reducing carbon emissions, noise pollution, and the impact of aviation on local air quality and ecosystems. Additionally, improvements in aerodynamic design, lightweight structures, and air traffic management systems are being explored to reduce emissions, fuel consumption, and noise levels. Overall, the future of aerodynamics will require a holistic approach that considers the environmental impact of aviation and strives to develop cleaner and greener technologies to ensure a sustainable future for air travel.

Key words: aerodynamics, fuel-efficient, carbon emissions, electric propulsion systems, sustainability of aircraft.

Introduction

Aviation serves as a critical connector for global communities today, yet it significantly contributes to climate change. Currently, it is estimated that the aviation sector accounts for about 3.5% of the total human-induced alterations to the Earth's energy balance. Since the mid-1980s, emissions from aviation have increased, consistently representing 2-2.5% of overall global emissions. Disturbingly, projections indicate that by 2050, aviation may be responsible for a quarter of the allowable CO_2 emissions needed to keep global warming within 1.5°C above preindustrial conditions [1]. Given that aircraft can have a service life of up to 30 years, it's evident that urgent action is necessary.

Industry stakeholders and policymakers face the challenge of formulating and executing strategies aimed at achieving net-zero emissions for a sustainable future. In this regard, sustainable aviation initiatives are gaining traction. At the international level, the International Civil Aviation Organization (ICAO), a UN agency that promotes collaboration among 193 countries, has set a goal of reaching net-zero carbon emissions for global civil aviation by 2050 [2]. The UN has also emphasized the importance of reducing CO_2 emissions per capita to between 2 and 2.5 tons by 2030, highlighting that while this objective isn't solely focused on aviation, cutting down aviation emissions is crucial.

For context, the ICAO Carbon Emissions Calculator estimates that a passenger flying round-trip in economy class from Los Angeles to London will produce approximately 880 kg of CO_2, which constitutes 35-45% of the individual emissions cap.

Material and Methods

While advances in aeronautical technology hold great potential, they are often constrained by existing ideas and our understanding of physics. Additionally, although the expansion of information technology has significantly influenced various fields, its effect on aeronautical design tools and environments has been relatively limited thus far.

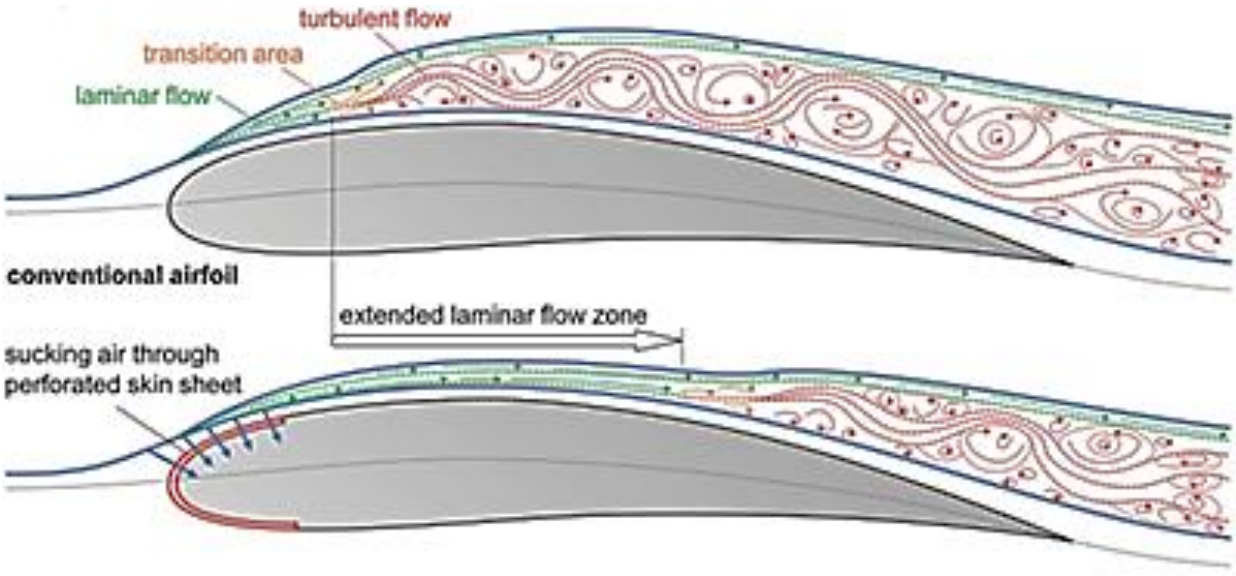


Fig. 1. HLFC – Hybrid Laminar Flow Control [3]

As air travel continues to grow, the demand for enhanced safety, reliability, reduced noise, lower emissions, time efficiency, and more affordable options will become increasingly important. To accommodate this demand, the aviation industry is working on the development of larger aircraft capable of carrying up to 600 passengers, and potentially even more—up to 800 or 1,000. These larger aircraft will need to be highly fuel-efficient, produce minimal noise, and be able to operate on standard runways.

To achieve fuel efficiency, new engines with ultra-high bypass ratios are being designed, along with aerodynamic improvements aimed at reducing drag. One promising technology in this area is hybrid laminar flow control (HLFC), which enhances fuel efficiency by employing a uniquely designed wing surface combined with a suction system to maintain a smooth and low-drag airflow along a greater section of the wing [3, 4]. This method minimizes drag and, through the use of micro-perforated surfaces, helps postpone the shift from laminar to turbulent airflow, resulting in substantial drag reduction. While initial research has shown that HLFC can effectively decrease drag and enhance fuel efficiency, additional investigations are needed to adapt this technology for the higher Reynolds numbers.

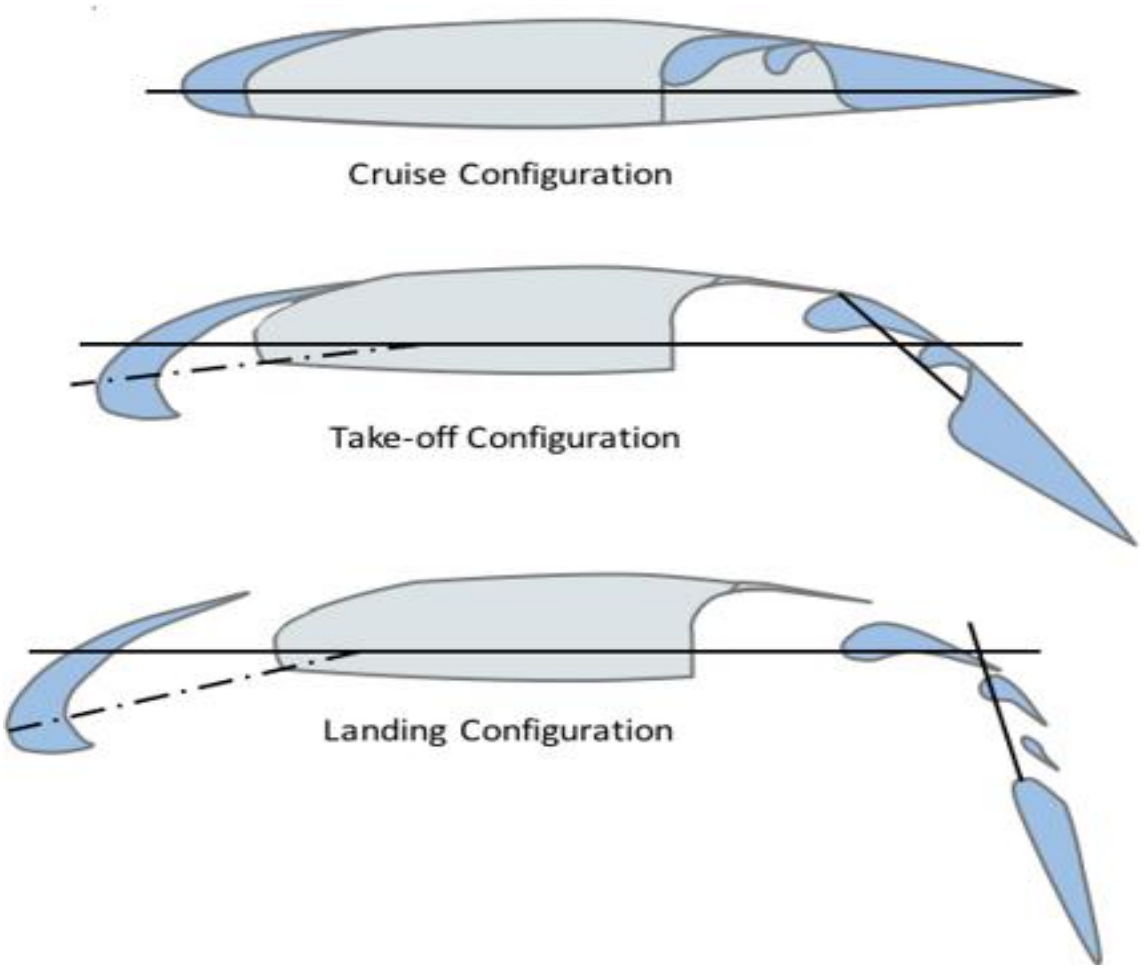


Fig. 2. Aircraft High-Lift System [4]

Another factor that greatly affects the weight of an aircraft is the performance of its high-lift system.

In general, the more complex systems utilizing the high-lift system the more it weighs. with fewer elements (i.e., flaps, slats, etc.) either passive or active boundary layer suction or blowing to delay separation of the flap boundary layers will be needed to meet runway length constraints. Smart structures, together with flow control technology, will play a vital role in the needed improvements in control surface effectiveness These technologies and their size and weight. will also allow for continuous recontouring of the wing surface during cruise, thus further reducing the drag and improving fuel efficiency.

Innovative materials and flow control technologies will be crucial for enhancing the effectiveness of control surfaces. These advancements, along with minimizing size and weight, could facilitate the continuous reshaping of wing surfaces during flight, leading to reduced drag and improved fuel efficiency.

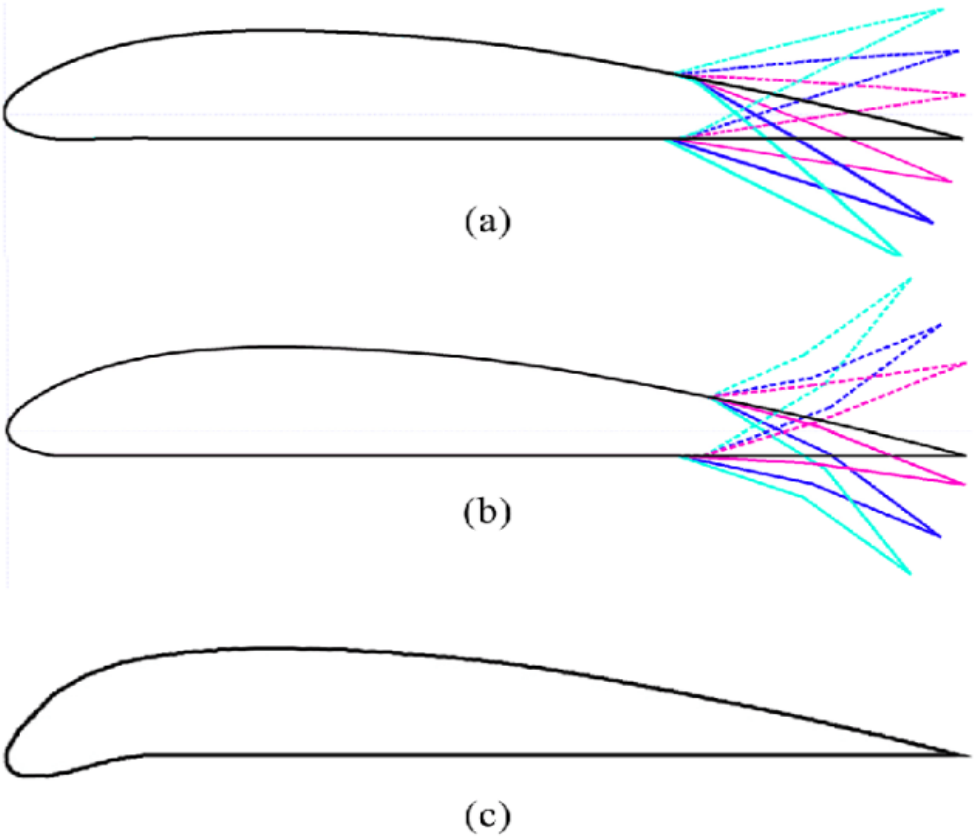


Fig. 3. The airfoil with traditional (a) and adaptive (b) mechanization.
(c) The airfoil with an adaptive slat [5]

Moreover, alongside enhancing existing aircraft designs, it is essential to explore entirely new concepts that can achieve a significant leap in performance. These opportunities configurations for mitigation should offer both drag due to lift and wake vortex hazard and synergistic propulsive and aerodynamic interactions. Examples of these forward-thinking designs include blended wing body aircraft and strut-braced wings, among others.

A blended wing body (BWB), sometimes referred to as a hybrid wing body (HWB) or a lifting airfoil fuselage, is a type of fixed-wing aircraft characterized by the seamless integration of the wings and the main fuselage. In this design, the wings and body emerge as a single continuous structure without a distinct separation.

On the other hand, a truss-braced wing aircraft features a design that employs a truss—a triangular support framework—to reinforce its ultra-thin, high-aspect-ratio wings in relation to the fuselage. This innovative approach facilitates longer, narrower wings that enhance lift while minimizing induced drag, resulting in greatly improved fuel efficiency.

The design of supersonic aircraft is a subject of extensive research at present. Supersonic transport (SST) refers to aircraft, either for passengers or cargo, that can exceed the speed of sound (Mach 1). These planes significantly cut down travel time, often reducing intercontinental flight durations by half when compared to subsonic aircraft. They are designed to cruise at speeds between Mach 1.2 and 2.2 (approximately 1,500 to 2,700 km/h). Their sleek, aerodynamic profiles, frequently featuring delta or arrow-shaped wings, help reduce drag and endure high levels of aerodynamic heating.

To address the rising demand for air travel, particularly for journeys under 500 kilometers, one promising solution lies in personal air vehicles. These vehicles could effectively use the many general aviation airports and optimize low-level airspace by introducing designated skyways. Personal air vehicles, which may include small planes, rotorcraft, tiltrotors, or converticars, are designed to be crash-resistant and capable of flying in various weather conditions, requiring minimal training for operators.

These aircraft will feature engines that are both dependable and environmentally friendly, ultimately aimed at achieving zero emissions through fuel cell technology. Additionally, they will operate quietly, minimizing noise disturbances for nearby communities.

Advancements in flow control technology [4, 5] will help prevent wing stalls, reduce the effects of atmospheric turbulence, and facilitate automatic take-offs and landings. Besides ensuring desirable aerodynamic qualities, these personal air vehicles must also be economically accessible, starting with a niche market and eventually reaching the average consumer. While the idea of pilotless, emission-free, flexible-flight options may seem ambitious today, reflecting on the progress in aviation over the past hundred years, it reveals that such advancements are within reach.

Results and discussion

A method for designing a wing with minimal drag is to ensure that a substantial portion of the wing's wetted surface maintains laminar flow. This concept is referred to as laminar flow control (LFC), and considerable advancements have been made in this area for both small and large aircraft, whether subsonic or supersonic.

There are various strategies to achieve LFC. One of the most straightforward is natural laminar flow control (NLF), which utilizes a favorable pressure gradient to postpone the transition of the boundary layer.

Both NLF and suction-based LFC aim to delay this transition by diminishing the growth of unstable disturbances within the laminar boundary layer, which are known to trigger transition. A more fundamental strategy in LFC involves addressing the root cause of these instabilities, termed boundary-layer receptivity, where external disturbances become internalized within the boundary layer. However, the practical challenge of mitigating naturally occurring instabilities through the artificial generation of out-of-phase but similar disturbances requires exploring alternative methods of implementing receptivity control.

One promising innovative approach has been the artificial stimulation of subdominant instability modes, which can hinder the development of the predominant modes through nonlinear mode competition. Currently, the application of receptivity control for LFC is in its early developmental stages and necessitates a better understanding and modeling of the receptivity process. Once fully realized, this method could significantly streamline the application of laminar flow control by removing the need for suction systems and components like piping and pumps.

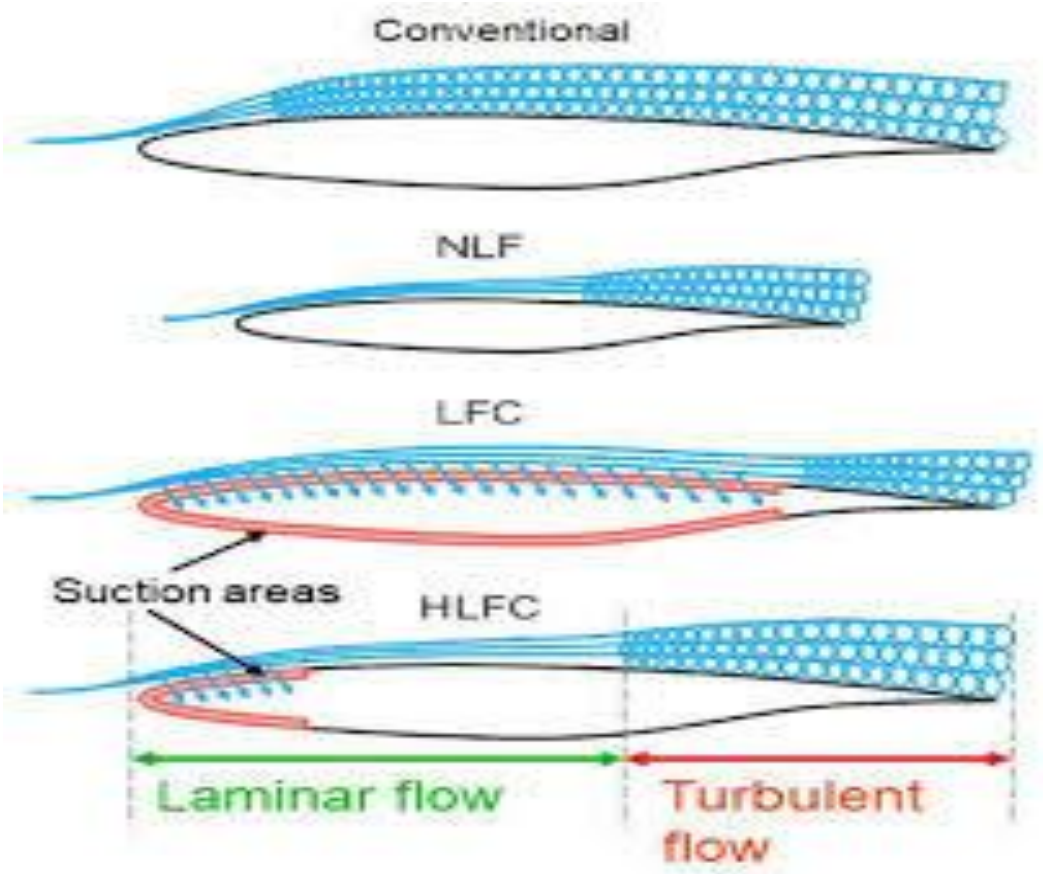


Fig. 4. Flow control for boundary layer separation [4]

Boundary layer separation happens on various aircraft components under different flow conditions, leading to significant reductions in aerodynamic efficiency. Vortex generators have proven effective in managing separated flow by introducing longitudinal vorticity into the airflow.

This can be achieved using fluidic actuators. One type of fluidic actuator features a cavity with a flat plate positioned asymmetrically at the top, creating both wide and narrow gaps. Tests conducted in a wind tunnel have demonstrated that a jet-like flow can be generated from either the small or large gap, depending on the actuator's scaling parameters. Additionally, it has been observed that by keeping the narrow gap width constant while altering the width of the wide gap, along with adjusting the frequency and movement of the plate, various flow patterns can be achieved, including vertical jet-like flows, wall-jets, angled jet-like flows, or vortex flows.

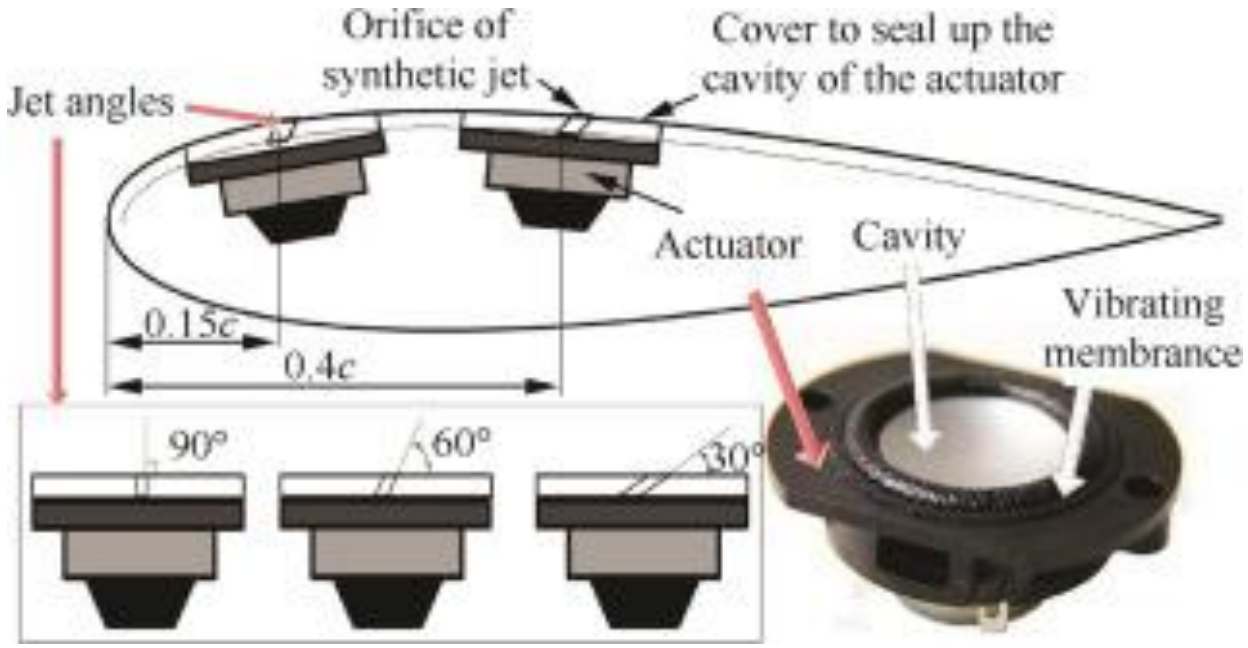


Fig. 5. Actuator concepts [5]

It’s clear that further investigation and development of this and other actuator concepts are necessary. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), as well as larger-scale technologies that incorporate MEMS devices as active components, play a crucial role in advancing these actuators. Moreover, to thoroughly explore the design possibilities for these devices, it's essential to create an efficient computational model tailored for this type of actuator.

Discussion

Recent research has shown that micro-sized piezoelectric actuators can effectively manipulate flow. The specific type of piezoelectric actuator described exhibits a net mass flow of zero; however, it creates a distinctive jet-like flow pattern when activated. This unique characteristic has led to its classification as a synthetic jet actuator.

These actuators have been demonstrated to produce velocities ranging from a fraction of a meter per second to several tens of meters per second across frequency ranges from Hertz to kilohertz. With additional advancements, these zero-net-mass jets could offer significant aerodynamic advantages, such as increased lift on wings, reduced drag during cruising through advanced active lift control (LFC), and the ability to generate controlled moments on demand. This could potentially minimize or eliminate the reliance on conventional flap and slat mechanisms.

Future research on zero-net-mass actuators will focus on several key areas. This includes exploring the relationship between actuator characteristics and the resulting flow field. Investigations will also look at how jet-like flows interact with turbulent boundary layers. Additionally, there will be an analysis of the correlation between actuator features and near-field surface pressure, which can aid in developing control laws. Finally, the research will assess the resulting lift and control moments for both unswept and swept wings, while quantifying any potentially negative impacts on overall acoustic signatures.

Conclusions

The future of aerodynamics lies at the intersection of technological innovation, environmental responsibility, and sustainable development. As global air travel continues to expand, the aviation industry must prioritize reducing carbon emissions, noise pollution, and ecological impact while enhancing safety, performance, and efficiency.

Breakthroughs in laminar flow control, lightweight materials, and smart structures are paving the way toward revolutionary improvements in drag reduction and fuel efficiency. The integration of active flow control systems and advanced computational modeling promises a new era of adaptive, intelligent aircraft capable of optimizing their performance dynamically in flight.

Through global collaboration and continuous research, the aviation industry can transform air transport into a truly sustainable mode of travel - one that meets the needs of a connected world without compromising the health of the planet.

References

1. Graver B., Rutherford D., Zheng S. CO2 Emissions From Commercial Aviation. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf
2. Zheng S., Mukhopadhaya J., Benoit J., Supraja N. Kumar, Rutherford D., Rhode D., Sitompul D. Aviation Vision 2050: The potential for climate-neutral growth. https://theicct.org/publication/aviation-vision-2050-sept25/
3. Hardy, K.S., Langendoen J.M. Advanced vehicle system concepts. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 32, Issue: 1, pp. 51 - 61
4. Beck, N., Landa, T., Seitz, A., Boermans, L., Yaolong Liu, Radespiel, R. Drag Reduction by Laminar Flow Control. In: Energie, 2018, pp. 4-28
5. Meier, G. E. A. Active Control of Boundary Layer and Separation. In: International Centre for Mechanical Sciences ((CISM, volume 369))

APLINKOSAUGINIAI IŠŠŪKIAI ATEITIES AERODINAMIKOJE

Santrauka

Ateityje aerodinamikos sritis susidurs su įvairiais aplinkosaugos iššūkiais, nes didės greitesnių ir ekonomiškesnių orlaivių poreikis. Šie iššūkiai apima anglies dioksido išmetimo, triukšmo taršos ir aviacijos poveikio vietos oro kokybei bei ekosistemoms mažinimą. Be to, siekiant sumažinti išmetamųjų teršalų kiekį, degalų sąnaudas ir triukšmo lygį, ieškoma būdų, kaip patobulinti aerodinaminį dizainą, lengvas konstrukcijas ir oro eismo valdymo sistemas. Ateityje aerodinamika orientuosis į holistinį požiūrį, kuriame būtų atsižvelgiama į aviacijos poveikį aplinkai siekianr kurti švaresnes ir ekologiškesnes technologijas, taip užtikrinant tvarią skrydžių ateitį.

Reikšminiai žodžiai: aerodinamika, degalų taupymas, anglies dioksido išmetimas, elektrinės varymo sistemos, orlaivių tvarumas.

ADAPTIVE TECHNOLOGIES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Viktors Gutakovskis, Vladimirs Gudakovskis, Daniils Marcenko, Aleksandrs Kuzevanovs
Riga Technical University, Institute of Aeronautics, Space Engineering and Transport

Abstract

The paper presents the basic concepts and definitions of an unmanned aerial vehicle (UAV), its main application areas, and the tasks it solves. It examines the essence of adaptive technologies for improving UAV performance and analyzes the UAV operating environment. Structural (constructive) adaptation is highlighted as the factor that contributes most substantially to performance improvement and to expanding the range of effective operations. As examples, various adaptive designs of the airframe, propulsion system, and energy replenishment for UAVs are discussed. From the analysis of structural adaptation and examples of its implementation, it follows that this approach is effective for developing next-generation UAVs. An unmanned mobile vehicle is an artificial mobile object for reusable or conditionally reusable use that has no onboard crew (human pilot) and is capable of autonomous, goal-directed movement in space to perform various functions either autonomously (using its own control program) or via remote control (by a human operator or a dispatch center). Unmanned mobile vehicles operate in space, in the Earth's atmosphere, in water, on land, and underground. Here we will consider an unmanned mobile vehicle operating in the Earth's atmosphere. Such unmanned mobile vehicles are referred to as unmanned aerial vehicles (UAVs). An unmanned aerial vehicle (UAV) is an aircraft for reusable or conditionally reusable use that has no onboard crew (human pilot) and is capable of autonomous, goal-directed movement in air (the Earth's atmosphere) to perform various functions either autonomously (using its own control program) or via remote control carried out by a human operator from a stationary or mobile control station.

Keywords: UAV, Adaptive Technologies, UAV performance improvement, Aerodynamic optimization.

UAV Applications and Task Evolution

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are defined as reusable or conditionally reusable aircraft capable of autonomous or remote-controlled movement in the atmosphere without an onboard crew. These vehicles range from micro-drones to heavy, multi-ton platforms designed for ultra-long-range missions. By movement principle, they are categorized as fixed-wing, flexible-wing, rotary-wing, flapping-wing, aerostatic, or hybrid types .

UAVs are increasingly preferred over crewed aircraft due to several distinct advantages:

- Higher Payload Fraction: The absence of life-support systems allows for more mission-specific equipment.
- Aggressive Maneuverability: They can sustain higher load factors than a human pilot could survive.
- Cost-Effectiveness: Small vehicles are significantly cheaper to produce and operate.
- Risk Mitigation: Missions can be conducted in environments with radiation hazards or extreme risk levels.

In the military sphere, tasks include reconnaissance, strike missions, electronic warfare, and cargo transport . Civilian applications are expanding rapidly, with the number of sectors utilizing UAV services expected to grow from 20 to approximately 50 in the near term.

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are no longer just remote-controlled toys but sophisticated autonomous systems. According to their movement principles, they are classified into:

- Fixed-wing: Efficient for long-range high-speed flight.
- Rotary-wing (Multicopters): Capable of hovering and vertical takeoff.
- Flexible-wing (Paragliders): Used for low-speed, heavy-lift transport.
- Flapping-wing (Ornithopters): Biomimetic designs for micro-reconnaissance.
- Hybrid systems: Combining vertical takeoff with horizontal flight efficiency (VTOL).

In terms of weight, they range from Micro UAVs (< 0.1 kg) to Heavy UAVs (> 1000 kg). Their strategic value lies in the "4D" missions: Dull, Dirty, Dangerous, and Deep. By removing the pilot, we eliminate the need for heavy cockpits, oxygen systems, and ejection seats, allowing the airframe to be designed purely for mission performance.

The Essence of Adaptive Technologies

Adaptivity is the primary instrument for increasing UAV effectiveness in complex environments. There are four primary types of adaptation:

1. Parametric: Correcting system parameters to account for characteristic drift.

2. Structural (Constructive): The ability of an object to change its physical structure to match a changing situation.

3. Object: Utilizing a set of cooperating objects (swarms) rather than a single unit.

4. Goal Adaptation: Modifying unattainable goals through artificial intelligence.

Structural adaptation is highlighted as the factor contributing most substantially to expanding a UAV's effective operating range.

UAV Operating Environments

UAVs must operate across a spectrum of "heterogeneous environments" classified by their level of reaction to the vehicle's presence:

- Environments with Uncertainties: Influenced by unmeasurable factors like a turbulent atmosphere.
- Reacting Environments: Weakly influenced by the UAV's actions (e.g., wake turbulence).
- Adaptive Environments: Characterized by purposeful responses, such as automated air-defense systems.
- Intelligent Environments: Possess goal-setting mechanisms and human-command variability, such as integrated air-defense networks.

To survive in intelligent environments, next-generation UAVs must be able to assess situations, forecast evolution, and adapt structurally to solve tasks not envisioned in their original design .

Structural Adaptation of UAV Elements

While traditional UAVs are optimized for a single flight regime, constructive adaptation modifies the airframe configuration as the flight regime changes to maintain near-optimal performance throughout the entire envelope .

Adaptive Wing Technologies

An adaptive wing provides continuity of aerodynamic derivatives, keeping surfaces smooth while internal mechanisms deform the mid-surface . This can lead to drag reductions of up to 40%.

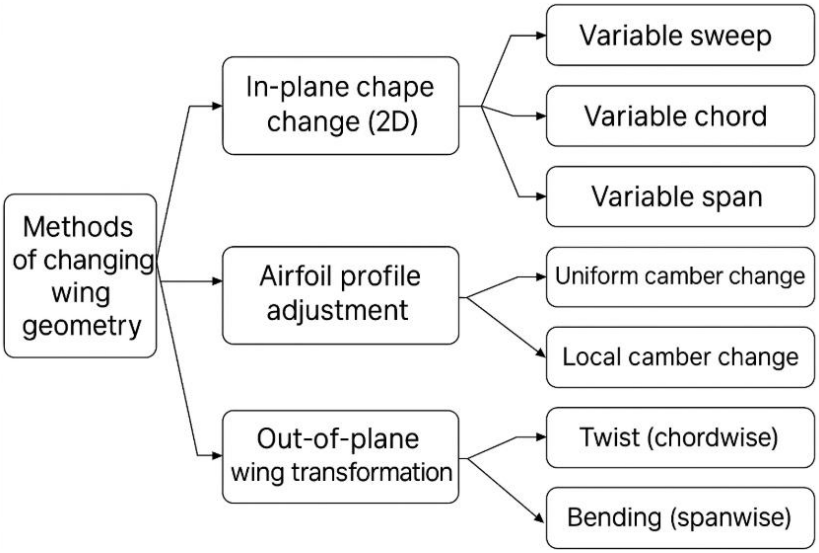


Fig. 1. Classification of methods for changing wing geometry
Source: created by authors

Primary Methods of Transformation:

- Variable Sweep (Sweep): Allows efficient flight across subsonic, transonic, and supersonic regimes.
- Variable Chord (Chord): Uses flexible skins or expanding mechanisms to increase wing area, improving takeoff and landing performance.
- Variable Span (Span): Telescopic sections increase aspect ratio for loitering and decrease it for high-speed flight.
- Profile Regulation: Continuous adjustment of the airfoil geometry (leading edge, trailing edge, or camber) to prevent flow separation and reduce fuel consumption.

- Out-of-Plane Transformation: Includes chord-wise twisting and span-wise bending. Span - wise bending, as seen in the B-70 Valkyrie, improves directional stability and reduces trim drag at supersonic speeds.

Adaptive Propulsion Systems

For small UAVs, adaptive carbureted internal combustion engines (ICE) use microprocessors and electromagnetic valves to open and close 30 times per second, ensuring an optimal fuel-air mixture regardless of altitude or temperature.

For heavy UAVs, Adaptive Gas-Turbine Engines (GTE) incorporate variable geometry in the flow path. Programs like ADVENT and AETD aim to produce engines that use 25% less fuel and deliver 10–20% more thrust by adjusting bypass/core air redistribution and utilizing variable inlet guide vanes

.

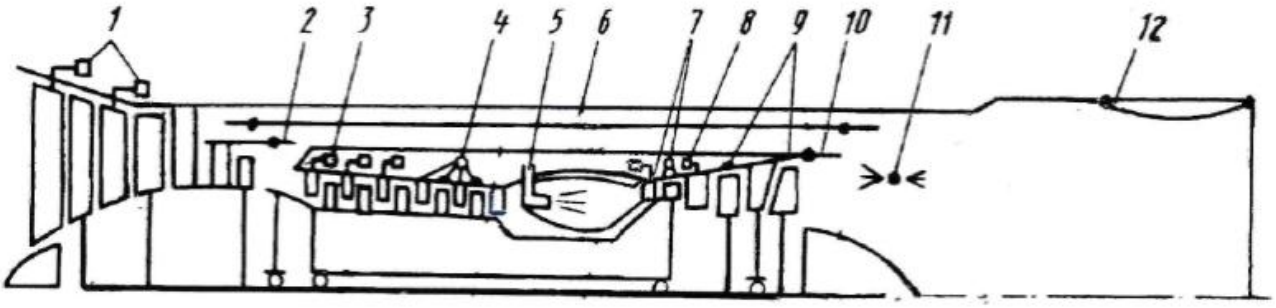


Fig. 15. Schematic of a hypothetical **adaptive gas-turbine engine (GTE)** with flow-path regulation elements

1 — variable inlet guide vanes (IGVs) of the fan; 2 — adjustable redistribution of air between bypass/core streams; 3 — variable stator vanes of the compressor; 4 — adjustable radial clearances in the rear stages of the high-pressure compressor; 5 — fuel supply to the adaptive combustor; 6 — adjustable third stream; 7 — regulation of the compressor turbine (variable nozzle guide vanes and adjustable rotor radial clearances); 8 — variable nozzle guide vanes of the fan turbine; 9 — adjustable radial clearances of the fan turbine; 10 — variable-geometry mixer; 11 — fuel supply to the adaptive afterburner; 12 — fully modulating (all-regime) variable-geometry nozzle.

Adaptive Energy Supply

To overcome battery limits, adaptive energy replenishment methods are being developed:

- Wireless Laser Recharging: Continuous energy replenishment from ground or airborne laser stations.
- Tethered Systems: Provide virtually unlimited endurance for tasks in confined areas by removing the need for onboard energy storage .

Conclusion

Structural adaptation, particularly when combined with artificial intelligence, is the key to developing next-generation UAVs. By allowing the vehicle to change its physical shape and propulsion characteristics in real-time, these technologies enable mission effectiveness in highly dynamic and hostile environments .

References

1. NASA. “Patch: F-111 Mission Adaptive Wing (MAW).” 2017. URL: https://www.nasa.gov/image-article/patch-f-111-mission-adaptive-wing-maw/ NASA
2. Air & Space Forces Magazine. “Pilot Report: AFTI F-111.” *Air Force Magazine*, July 1988. HTML: https://www.airandspaceforces.com/article/0788afti/ • PDF: https://www.airandspaceforces.com/PDF/MagazineArchive/Documents/1988/July%201988/0788afti.pdf Air & Space Forces Magazine+1
3. NTIS. “AFTI (Advanced Fighter Technology Integration)/F-111 Mission Adaptive Wing — Briefing to Industry.” 1988. Record: https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA202467.xhtml ntrl.ntis.gov
4. Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I., Inman, D. J. “A Review of Morphing Aircraft.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011. DOI: https://doi.org/10.1177/1045389X11414084 ScienceDirect
5. Li, D., Zhang, W., Xiang, J., Gao, C. “A review of modelling and analysis of morphing wings.” *Progress in Aerospace Sciences* 100 (2018): 46–62. DOI: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.002 • Article page

(Elsevier): https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042117301835 • OA copies: Cranfield/CORE PDFs. ScienceDirect+2dspace.lib.cranfield.ac.uk+2

6. Parancheerivilakkathil, M. S., Ajaj, R. M., et al. "A compliant polymorphing wing for small UAVs." *Chinese Journal of Aeronautics* 33(10), 2575–2588 (2020). Article page: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120302132 •ADS/RG: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ChJAn..33.2575P/abstract; https://www.researchgate.net/publication/341909811_A_Compliant_Polymorphing_Wing_for_Small_UAVs ScienceDirect+2ui.adsabs.harvard.edu+2
7. Parancheerivilakkathil, M. S., Ajaj, R. M., et al. "A Polymorphing Wing Capable of Span Extension and Passive Pitching (ASAPP)." *Aerospace* 9(4):205 (2022). OA: https://www.mdpi.com/2226-4310/9/4/205 • Related AIAA paper/erratum: https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-0621 ; https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2021-0621.c1 • RG: https://www.researchgate.net/publication/359616154_A_Polymorphing_Wing_Capable_of_Span_Extension_and_Variable_Pitch ResearchGate+3MDPI+3arc.aiaa.org+3
8. Dussart, G. X., Lone, M., O'Rourke, C., Wilson, T. "In-flight Wingtip Folding: Inspiration from the XB-70 Valkyrie." *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* 6(3), 2019. OA: https://commons.erau.edu/ijaaa/vol6/iss3/7/ • PDF: https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1343&context=ijaaa commons.erau.edu+1
9. GE Aerospace. "XA100 Adaptive Cycle Engine." (AETP; ADVENT → AETD → AETP lineage). URL: https://www.geaerospace.com/military-defense/engines/xa100 geaerospace.com
10. GE Newsroom. "Testing on GE's First XA100 Adaptive Cycle Engine Concludes, Proves Out Transformational Capability." 2021. URL: https://www.geaerospace.com/news/articles/product-technology/testing-ges-first-xa100-adaptive-cycle-engine-concludes-proves-out geaerospace.com
11. Xu, J., Zeng, Y., Zhang, R. "UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17(8), 5092–5106 (2018). DOI: https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2838134 • arXiv (OA): https://arxiv.org/abs/1709.07590 ACM Digital Library+1
12. Vicor. "Design Guide to Powering Tethered UAVs." Application note / white paper, Aug 19, 2020. PDF: https://www.mouser.com/pdfDocs/DesignGuidetoPoweringTetheredUAVs.pdf • Related: "DCM for Tethered UAV Applications" overview page. Mouser+1

BEPILOČIO ORLAIVIO PENGUIN MK 2.5 VTOL PILOTO KAMEROS IR NAUDINGOSIOS APKROVOS MODULIO DANGTELIO TEORINIO MODELIO TYRIMAS

Morta Janutėnaitė, Esmeralda Štyps, Kęstutis Grigaliūnas
Lietuvos inžinerijos kolegija

Anotacija

Šiuo metu vienas pagrindinių iššūkių, su kuriuo susiduria mažojo tipo bepiločius orlaivius naudojantys pilotai operatoriai yra gebėjimas skristi nenaudojant navigacinių sistemų. Inercinės sistemos dažnai yra brangios ir negali užtikrinti tikslumo viso skrydžio metu dėl išorės faktorių, tokių kaip bepiločio orlaivio atliekami manevrai ar vėjo įtaka skrydžio trajektorijai. Esamos kameros tokiuose bepiločiuose orlaiviuose yra pagrindinis instrumentas, kuriuo yra vykdomos įvairios užduotys. Dėl šios priežasties, papildoma piloto kamera, kuri būtų naudojama tik vizualiai navigacijai, gali užtikrinti tiek nenutrūkstamą įvairių užduočių vykdymą, tiek leidžia pilotui operatoriui sekti skrydžio maršrutą ir tokiu būdu vizualiai naviguoti orlaivį šveisiu paros metu.

Reikšminiai žodžiai: Bepilotis orlaivis, naudingoji apkrova, navigacija.

Įvadas

Didžiojoje daugumoje mažo tipo bepiločiuose orlaiviuose naudojama viena kamera, kurios pilnai pakanka vykdant užduotis idealiomis sąlygomis. Bepiločio orlaivio pilotui, skrendant be navigacinės sistemos, tenka naudoti esamą kamerą esamos vietos nustatymui. Įprastai tai reikalauja nukreipti kamerą nuo stebimo objekto. Tačiau nukenčia užduoties vykdymas, nes kameros vaizdas pradedamas naudoti orientavimuisi, o ne užduočiai įvykdyti. Dėl šios priežasties iškyla poreikis veikti be navigacijos - skristi orientuojantis vizualiai pagal ant žemės matomus orientyrus. Šiame straipsnyje nagrinėja problema ar atskira kamera, kuri būtų skirta tik pilotui, leistų turėti nuolatinį vaizdą skrydžio kryptimi ir taip padėtų orientuotis skrydžio metu?

Tyrimo objektas. Bepiločio orlaivio Penguin Mk 2.5 VTOL piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio dangtelio modelis.

Tyrimo tikslas. Suprojektuoti bepiločio orlaivio piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio dangtelio modelį.

Tyrimo uždaviniai:

1. Apžvelgti bepiločio orlaivio piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio paskirtį, konstrukciją, veikimo principą bei funkcinius elementus;
2. Atlikti suprojektuoto bepiločio orlaivio Penguin Mk 2.5 VTOL piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio teorinius stipruminius skaičiavimus.

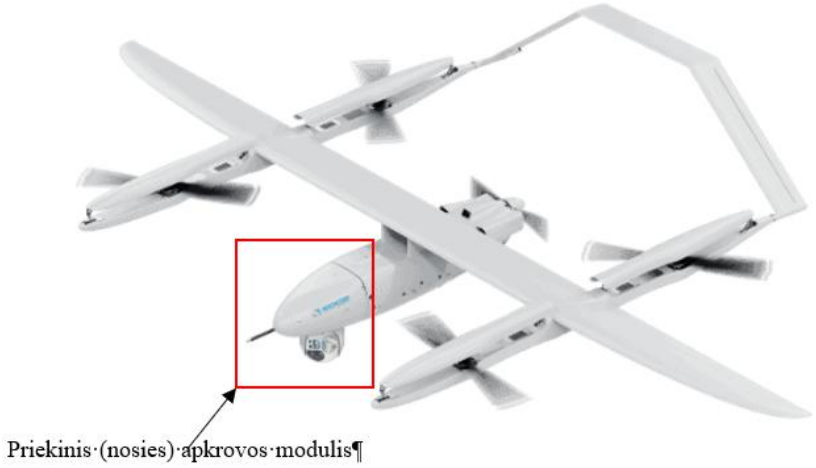
Tyrimo metodai:

1. Techninės literatūros šaltinių analizė – naudota analizuojant bepiločio orlaivio piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio dangtelio modelio konstrukcinius ir techninius ypatumus.
2. Tikslinės literatūros šaltinių analizė – naudota analizuojant bepiločio orlaivio piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio dangtelio modeliui keliamus techninius reikalavimus.

Surinktos informacijos bei tikslinės ir techninės dokumentacijos pagrindais suprojektuotas bepiločio orlaivio Penguin Mk 2.5 VTOL piloto kameros ir naudingosios apkrovos modulio dangtelio teorinis modelis, leisiantis orientuotis skrydžio metu.

Bepiločio orlaivio Penguin Mk 2.5 VTOL konstrukciniai ypatumai

Penguin Mk 2.5 VTOL bepilotis orlaivis (1 pav.) yra vertikalaus kilimo ir tūpimo, vidutinio aukščio ilgos skrydžio trukmės modulinis orlaivis. Orlaivio priekinis (nosies) modulis yra tuščiaviduris, pagamintas iš anglies pluošto. Nosyje yra talpinama naudingoji apkrova, tai gali būti gamintojo rekomenduojama kamera su jos tvirtinimo mechanizmu, ar vartotojo pasirinktas kitas sensorius, kuriam laikiklį gamintų pats vartotojas. Taip pat priekinis modulis talpina PITO vamzdelį su jungtimi bei GPS anteną.



1 pav. Bepilotis orlaivis Penguin Mk 2.5 VTOL [1]

Modulis prie fiuzeliažo yra prijungtas rotacine jungtimi, kuri gali suktis 180 laipsnių kampu. Ši funkcija yra naudojama orlaivio kilimo, tūpimo bei avarinių situacijų metu siekiant apsaugoti kamerą, ar kitą sensorių nuo galimo kontakto su žeme.

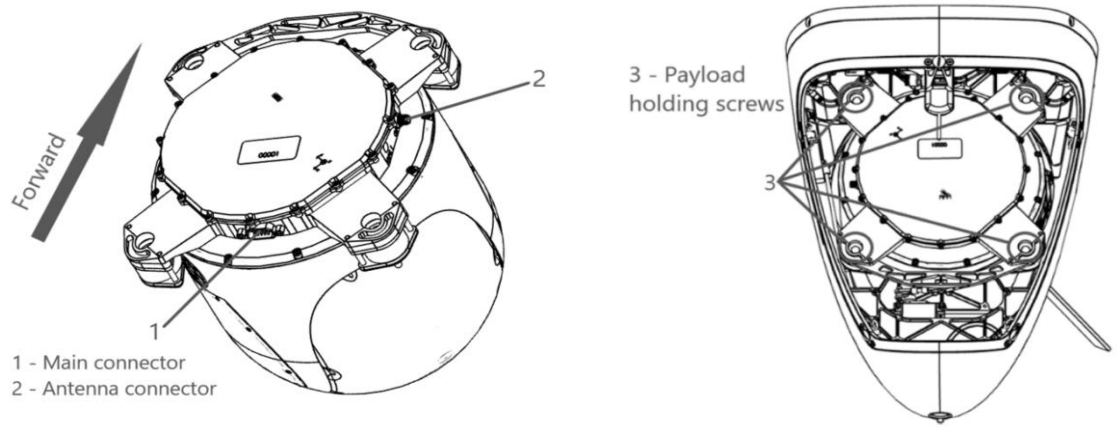
Pilotui vykdant kilimo ir nusileidimo procedūras, ar orlaiviui identifikavus, jog jis yra žemiau nei nustatytas minimalus aukštis, nosis apsisuka 180 laipsnių kampu į viršų, kur nukreipiama ir kamera. Tokiu būdu orlaiviui pasiekus žemę, kamera lieka nepažeista.

Visi komponentai esantys nosies modulyje turi laidines jungtis, kurios prijungiamos prie avionikos modulio iš kurio radijo ryšio signalu informacija iš orlaivio yra perduodama į antžeminę stotį ir atvirkščiai.

Tvirtinant kamerą prie dangtelio svarbu įvertinti kelis aspektus: fiksaciją, vibracijų slopinimą bei apsaugą. Fiksacijos elementas yra svarbus, kad skrydžio metu kamera nepakeistų savo padėties dėl oro pasipriešinimo ar manevrų. Didžiausios vibracijos susidaro bepiločiam orlaiviui kylant ir leidžiantis, tačiau šių fazių metu kameros yra nenaudojamos. Tvirtinant kamerą prie viršutinio dangtelio reikia įvertinti aspektą, jog nusileidimo metu nosies modulis apsiverčia 180 laipsnių kampu ir piloto kamera gali susiliesti su žeme. Taip pat pats tvirtinimo mechanizmas turi būti nesudėtingas, kad apgadinus kamerą ją lengvai ir greitai būtų galima pakeisti nauja.

Esamos ir papildomos kameros tvirtinimas prie orlaivio korpuso

Penguin Mk 2.5 VTOL bepilotis orlaivis išsiskiria tuo, jog jis nėra priklausomas nuo gamintojo teikiamų sensorių ir galima pasirinkti sensorių savo nuožiūra bei prijungti jį prie esamų jungčių. Nagrinėjamu atveju naudota gamintojo teikiama kamera su tvirtinimo elementais. Kamera jau yra su integruotu laikikliu, kuris įsistato į nosies modulio ertmę ir yra tvirtinamas keturiais taškais naudojant varžtus (2 pav.). Taip pat nosies modulyje prie kameros jungiasi ir maitinimo bei antenos laidai.

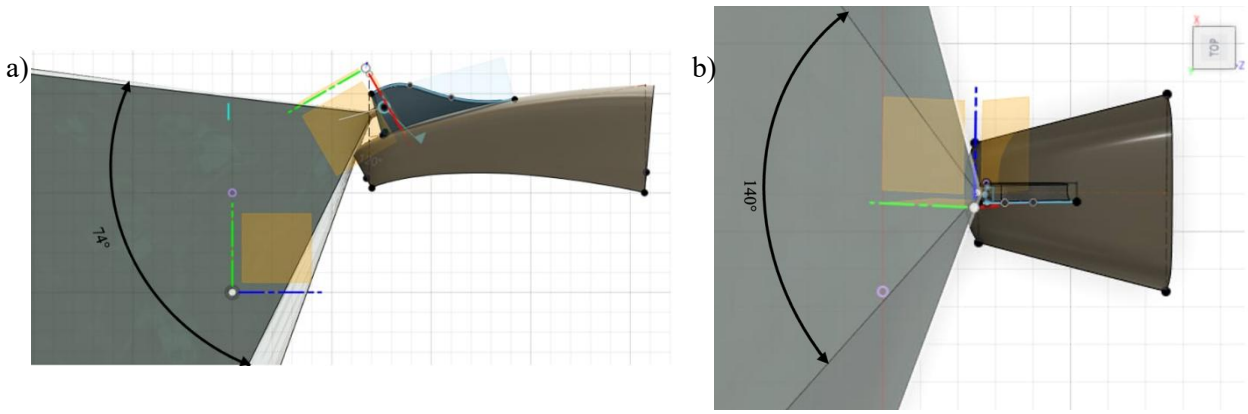


2 pav. Kameros tvirtinimo konstrukcija [1]

Kadangi nosies modulis prieš kylant ir leidžiantis pakyla į viršų 180 laipsnių kampu, svarbu tinkamai, vadovaujantis instrukcija, sujungti laidus tam, kad sukimosi metu jie nesikabintų prie esamų konstrukcijų

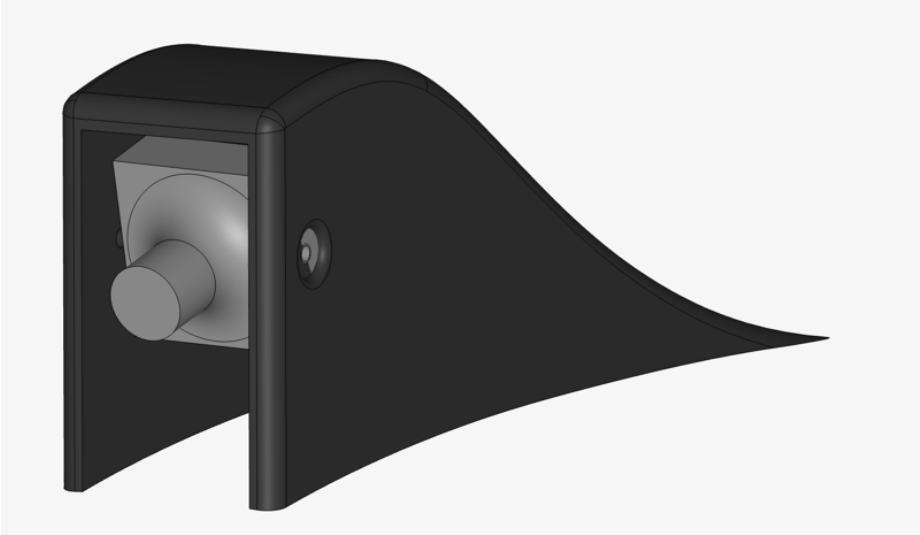
viduje ir nenutrūktų. Po kameros įdėjimo yra būtina atlikti svorio centro nustatymo procedūrą ir esant poreikiui į nosies dalį gali reikėti įstatyti papildomų svarelių.

Papildomos kameros montavimas prie bepiločio orlaivio turi kelis iššūkius, kurie ir lėmė kameros vietos bei konstrukcinio modelio pasirinkimą. Šiam tyrime pasirinkta RunCam Phoenix 2 SPV 5 kamera. Tai yra įprasta FPV (ang. First Person View) analoginė kamera, kuri pasižymi dėl universalaus veikimo tiek ryškioje saulės šviesoje, tiek prieblandoje (3 pav.).



3 pav. Piloto kameros matymo kampai: a) vertikalus matymo kampas; b) horizontalus matymo kampas
Šaltinis: sudaryta autorių

Nustatant kameros vietą ant priekinio nosies modulio skydelio buvo įvertinta, jog vaizdo neblokuotų į matymo lauką patenkančios bepiločio orlaivio dalys. Pasirenkant kameros poziciją ant bepiločio orlaivio Penguin Mk 2.5 VTOL buvo vadovaujamasi šiais kriterijais: 1) kameros padėtis turi būti kiek įmanoma nustumta į nosies modulio priekinę dalį, kurioje yra didžiausias nuolydis tam, kad nusileidimo metu, kuomet nosies modulis yra apsukamas 180° kampu į viršų, būtų išnaudotas tarpas tarp žemės ir kameros taip sumažinant kameros smūgio į žemę tikimybę; 2) siekti išlaikyti kamerą kiek įmanoma žemiau tam, kad minimizuoti naujai atsiradusį oro srauto poveikį aplink kamerą ir išlaikyti kameros vaizdo nuožulnųjį atstumą (angl. slant range) apie 45°, kuris yra optimalus stebėjimui prieš save esančių objektų, skrydžio trajektorijos sekimui.

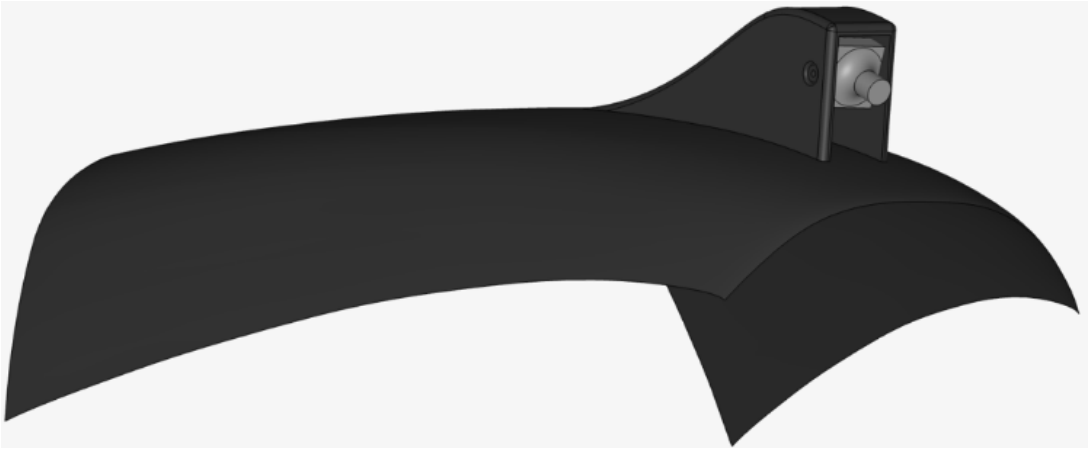


4 pav. Piloto kameros laikiklis su aptaku
Šaltinis: sudaryta autorių

Kadangi kamera yra skirta tik žiūrėjimui į priekį, buvo pasirinktas fiksuotas apverstos U formos kameros tvirtinimo laikiklis, kuris tvirtinamas prie kameros viršutinio skydelio. Kamera šonuose turi tvirtinimo taškus, kurie ir bus naudojami jos tvirtinimui prie laikiklio rėmo. Aplink rėmelį uždėtas nuožulnus aptakas, siekiant nukreipti oro srautą skrydžio metu (4 pav.).

Tyrimo metodika

Esamas nosies modulio viršutinis dangtelis yra naudojamas kaip gaubtas apsaugoti viduje esantiems komponentams, taip pat jo aerodinaminis dizainas prisideda prie mažesnio oro srauto pasipriešinimo skrydžio metu. Jis yra pagamintas iš anglies pluošto, yra plonas (~1 mm) ir labai lengvas. Dangtelis turi keturis tvirtinimo taškus, kurie tvirtinasi prie nosies korpuso *DZUS* tipo tvirtinimo detalėmis.



5 pav. Dangtelis su piloto kamera
Šaltinis: sudaryta autorių

Esant didesnei drėgmei, jungiamosios linijos prieš skrydį gali būti apklijuotos specialia izoliacija, kuri apribotų drėgmės kaupimąsi. Vykdant tyrimą dangtelis buvo naudojamas ir kaip pagrindas piloto kamerai tvirtinti (5 pav.). ir buvo įvertinta tai, kad: 1) papildomos kameros laikiklis turi išlaikyti kamerą nustatytoje fiksuotoje pozicijoje; 2) bepilotis orlaivis neturi blokuoti vaizdo 45° kampu nuo kameros linzės centro; 3) kameros laikiklis turi atlaikyti posūkių metu atsirandančias jėgas kai vėjo greitis siekia iki 20 m/s, orlaiviui skrendant iki 32 m/s greičiu.

Tyrimo objektas - piloto kameros laikiklis su gaubtu - buvo pagamintas naudojant 3D spausdintuvą Bambu Lab P1S iš medžiagos ASA-CF. Tai yra standartinis ASA tipo plastikas su įmaišytomis anglies pluošto dalelėmis. Ši medžiaga pasižymi geru atsparumu oro sąlygoms ir UV spinduliams, anglies pluoštas prideda standumo ir matmenų stabilumo. Pagrindinės šios medžiagos fizikinės ir cheminės savybės parodytos atitinkamai 1 ir 2 lentelėse.

1 lentelė. Medžiagos ASA-CF Fizikinės savybės [4]

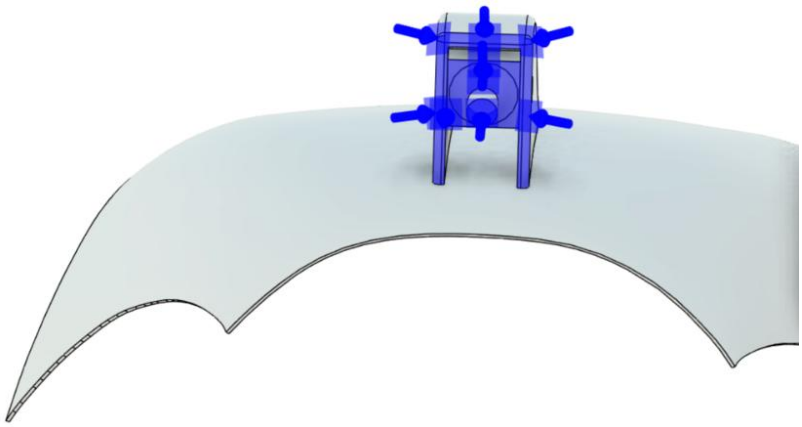
Veiksnys	Informacija	Testavimo metodai / sąlygos
Medžiagos tankis	1,02 g/cm^3	ISO 1183
Lydymosi indeksas	1,74 ± 0,3 g / 10 min	210°C
Lydymosi temperatūra	210°C	DSC, 10°C/min
Vikaro minkštėjimo temperatūra	108°C	ISO 306, GB/T 1633

2 lentelė. Medžiagos ASA-CF Mechaninės savybės [4]

Veiksnys	Informacija	Testavimo metodai / sąlygos
Tempimo stipris (X-Y)	34 ± 3 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Tempimo stipris (Z)	30 ± 4 MPa	ISO 527, GB/T 1040
Lenkimo stipris (X-Y)	72 ± 5 MPa	ISO 178, GB/T 9341
Lenkimo stipris (Z)	33 ± 3 MPa	ISO 178, GB/T 9341
Smūgio stipris (X-Y)	14,0 ± 2,2 kJ/m^2	ISO 179, GB/T 1043
Smūgio stipris (Z)	9,4 ± 0,6 kJ/m^2	ISO 179, GB/T 1043

Stipruminiams skaičiavimams atlikti buvo naudojamos Autodesk CFD 2027 ir Autodesk Fusion programos:

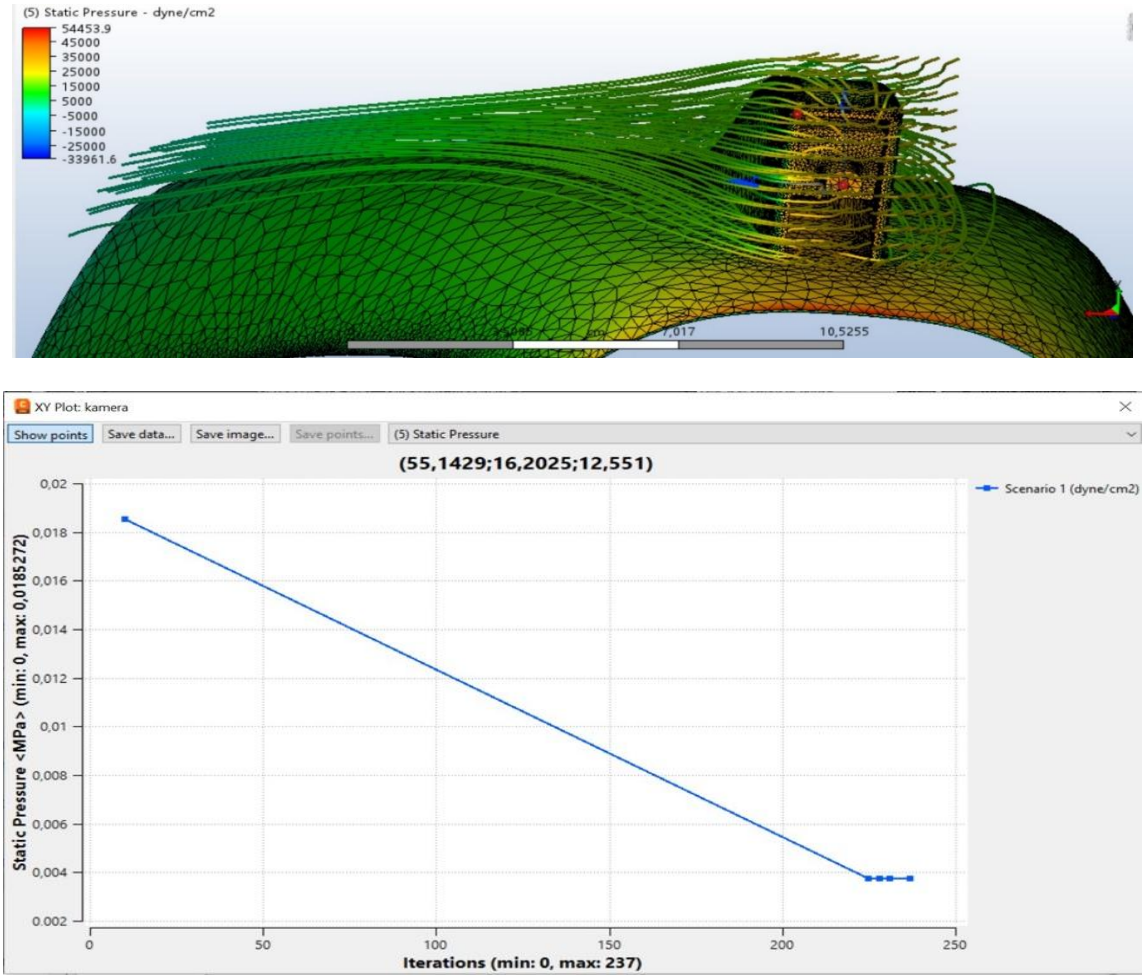
- Į Autodesk CFD buvo įkeltas paruoštas piloto kameros laikiklio su dangteliu modulis, tuomet aplink jį buvo sukurtas vėjo tunelis su oro srautu.
- Autocad Fusion programos pagalba buvo atlikta statinio įtempio simuliacija (6 pav.), kuri leidžia patikrintini ar konstrukcija atlaikys numatytas apkrovas. Apkrovos rodiklis buvo gautas iš anksčiau minėtos vėjo tunelio.



6 pav. Jėgos, veikiančios piloto kameros priekines briaunas
Šaltinis: sudaryta autorių

Tyrimo rezultatai

Autodesk CFD 2027 programoje oro savybės modeliavimui buvo pasirinkta pastovi standartinė atmosfera: 1013,25 hPa ir +15°C. Ties įėjimo ir išėjimo ribomis buvo nustatytas 35 m/s greitis. Iteracijų skaičius nustatytas 500, ties 237 konvegeracija tapo plokščia (6 pav.). Matydami gaunamas statines apkrovas aplink piloto kameros tvirtinimo elementą ir jos aptaką matome, jog didžiausia statinio slėgio vertė susidaro ties kameros priekinėmis briaunomis, maksimali statinio slėgio reikšmė siekia 0,0185272 MPa. Šią vertę toliau naudosime apkrovų priekinėms briaunoms skaičiavimams.



6 pav. Statinio slėgio simuliacija vėjo tunelyje
Šaltinis: sudaryta autorių

Autocad Fusion programoje, atliekant statinio įtempio simuliaciją, visoms priekinėms briaunoms buvo duota 0,0185272 MPa apkrova. Simuliacijos rezultatai parodė (7 pav.), kad saugos koeficientas yra 69,079, o viršutinė saugumo riba yra 4.

Result Summary			
Result type	Sub-result	Minimum	Maximum
Safety Factor			
	Safety Factor	69.079	9.181E+06
Stress			
	Von Mises	2.178E-06 MPa	0.289 MPa
	1st Principal	-0.12 MPa	0.322 MPa
	3rd Principal	-0.402 MPa	0.096 MPa
	Normal XX	-0.257 MPa	0.117 MPa
	Normal YY	-0.182 MPa	0.30 MPa
	Normal ZZ	-0.249 MPa	0.108 MPa
	Shear XY	-0.082 MPa	0.059 MPa
	Shear YZ	-0.08 MPa	0.061 MPa
	Shear XZ	-0.139 MPa	0.071 MPa
Displacement			
	Total	0 mm	0.002 mm
	X	-0.002 mm	0.002 mm
	Y	-4.863E-04 mm	0.001 mm
	Z	-1.303E-04 mm	0.002 mm
Reaction Force			
	Total	0 N	0.786 N
	X	-0.145 N	0.242 N
	Y	-0.751 N	0.132 N
	Z	-0.223 N	0.116 N
Strain			
	Equivalent	1.384E-09	2.362E-04
	1st Principal	9.977E-10	1.58E-04
	3rd Principal	-2.43E-04	1.935E-08
	Normal XX	-7.792E-05	4.396E-05
	Normal YY	-5.675E-05	1.184E-04
	Normal ZZ	-5.291E-05	3.115E-05
	Shear XY	-1.007E-04	7.221E-05
	Shear YZ	-9.888E-05	7.513E-05
	Shear XZ	-1.715E-04	8.777E-05

7 pav. Pagrindiniai simuliacijos rezultatai
Šaltinis: sudaryta autorių

Vertinant šį rodiklį galima teigti, kad konstrukcija yra tvirta ir atlaikys numatytas apkrovas.

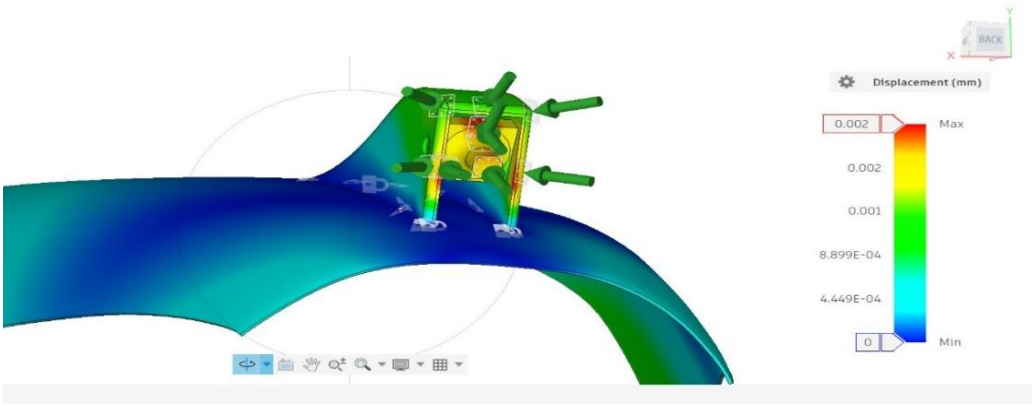
Diskusija

Skrydžio metu nosies modulis yra stacionarioje pozicijoje ir nejuda, piloto kamera ant viršutinio dangtelio leidžia turėti nuolatinį vaizdą skrydžio kryptimi. Naudojant šį vaizdą ir lyginant jį su sistemoje esančiu žemėlapiu, galima vizualiai identifikuoti išskirtinius objektus esančius ant žemės ir taip nustatyti bepiločio orlaivio būvimo vietą. Tuo pat metu asmuo, dirbantis su kamera gali vykdyti jam paskirtas žvalgymo užduotis be poreikio nukreipti kameros nuo pagrindinio vaizdo tam, kad galėtų orientuotis vietovėje.

Bepiločiui orlaiviui Penguin Mk 2.5 VTOL piloto kamerai keliamus techninius reikalavimus apriboja gamintojo keliami reikalavimai naudingajai apkrovai bei galutiniam tikslui. Pilotui operatoriui, naudojant papildomą kamerą, be navigacijos, gebėti naviguoti orlaivį skrydžio metu, reikalingas vaizdas. Skrendant be GPS orlaivis pradeda naudoti inercines navigacijos sistemą, tačiau ji išlaiko savo tikslumą tik trumpą laiko tarpą (įprastai iki 5 min), vėliau tikslumas sumažėja dėl vėjo nuonašos bei orlaivio atliekamų manevrų.

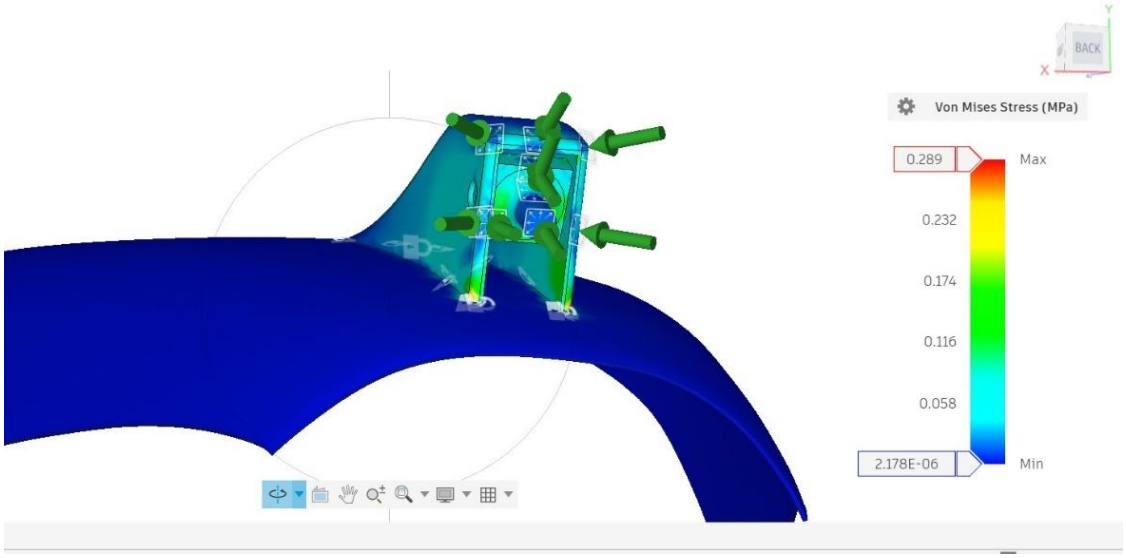
Turint pakankamai didelį perviršį, esamą konstrukcija patobulinta pagal matomus apkrovų diapazonus. Tokiu būdu buvo įvertinta, kuriose: 1) vietose sieneles galima ploninti arba storinti; 2) sienelės vietos yra labiausiai linkusios išlinkti.

Iš 8 paveikslo matyti, kad jautriausios yra piloto kameros laikiklio vidinės sienelės. Dėl šios priežasties ateityje, norint optimizuoti šį modelį, galima būtų galvoti apie šių sienelių stiprinimą jas storinant.



8 pav. Poslinkio vizualizacija
Šaltinis: sudaryta autorių

Von Mises įtempiai taip pat parodo silpniausias konstrukcijos vietas. 9 paveiksle galima matyti, jog priekinių kameros laikiklio sienelių apačia, ties susijungimu su dangteliu, yra potencialiai jautriausia pažeidimams ir dėl apkrovas jaučia labiausiai. Todėl šių vietų pastorinimas leistų užtikrinti, kad gavus apkrovas, šios vietos nesideformuotų.



14 pav. Von Mises įtempia
Šaltinis: sudaryta autorių

Taigi, pilotas, turėdamas kamerą su nuolatiniu vaizdu skrydžio kryptimi, žemėlapį ir suplanuotą skrydžio maršrutą gali vykdyti skrydį nenaudojant GPS navigacinės sistemos ir tokiu būdu išvengti galimų trikdžių bei padidinti pačio skrydžio saugumą.

Išvados

Mažojo tipo bepiločius orlaivius naudojantys pilotai operatoriai turi gebėti skristi nenaudojant navigacinių sistemų. Inercinės sistemos dažnai yra brangios ir negali užtikrinti tikslumo viso skrydžio metu dėl išorės veiksnių, tokių kaip bepiločio orlaivio atliekami manevrai ar vėjo įtaka skrydžio trajektorijai.

Esamos kameros tokiuose bepiločiuose orlaiviuose yra pagrindinis instrumentas, dėl šios priežasties jos naudojamas vizualiai navigacijai išlieka apribotas. Papildoma piloto kamera leidžia pilotui operatoriui sekti skrydžio maršrutą ir tokiu būdu vizualiai naviguoti orlaivį šveisiu paros metu.

Suprojektuotas bepiločio orlaivio piloto kameros tvirtinimo elemento teorinis modelis yra apverstos U raidės formos, prie kurio šonų kamera tvirtinama varžtais. Virš kameros uždėtas aptakas, siekiant minimizuoti dėl kameros atsiradusius papildomus oro srautus.

Atlikti stipruminiai skaičiavimai parodė, kad piloto kameros laikiklio konstrukcija yra pakankamai stipri, saugumo faktorius 69,079, reikiama koeficiento riba 4, atlaikyti simuliacijoje gautas statinio slėgio apkrovas prie 35 m/s vėjo stiprumo, kurios yra 0,0185272.

Turint pakankamai didelį perviršį, esamą konstrukcija galima tobulinti pagal matomus apkrovų diapazonus įvertinant vietas, kur galima sieneles ploninti arba storinti, ir sienelės vietas labiausiai linkusias išlinkti.

Literatūra

1. RedWire. Penguin C2.5 VTOL Maintenance Manual 5 leidimas, 2026 m.
2. 20260112023239 Phoenix 2 SPV5 Manual EN, [žiūrėta 2026-06-06]. Prieiga per internetą: https://myosuploads3.banggood.com/products/20260112/20260112023239Phoenix2SPV5ManualEN.pdf
3. RedWire. Operations Manual Part B - C2.5 VTOL 3 leidimas, 2025 m.
4. Bambu Filament. Bambus ASA-CF Technical Data Sheet 1 leidimas, 2026.

THEORETICAL MODEL STUDY OF THE PILOT CAMERA AND PAYLOAD MODULE COVER OF THE PENGUIN MK 2.5 VTOL UNMANNED AIRCRAFT

Summary

Currently, one of the main challenges faced by pilots and operators of small unmanned aircraft is the ability to fly without the use of navigation systems. Inertial systems are often expensive and cannot ensure accuracy throughout the flight due to external factors, such as maneuvers performed by the unmanned aircraft or the influence of wind on the flight path. Existing cameras in such unmanned aircraft are the main instrument with which various tasks are performed. For this reason, an additional pilot camera, which would be used only for visual navigation, can ensure both the uninterrupted execution of various tasks and allow the pilot-operator to follow the flight path and thus visually navigate the aircraft at any time of the day.

Key words: Unmanned aerial vehicle, payload, navigation.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF METHODS FOR DECRYPTION AMBIGUITY REDUCTION IN PUBLIC-KEY CRYPTOSYSTEMS

Petras Nefas, Rūta Jankūnienė
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

In recent years, public-key cryptography has faced an increasing demand for efficient and alternative cryptographic constructions capable of reducing computational resource requirements in cryptographic systems. One potential approach involves exploiting higher-degree functions instead of conventional RSA or other traditional encryption methods. However, such approaches significantly complicate the decryption process because multi-valued mappings introduce ambiguity, requiring additional mechanisms for identifying the correct plaintext message. This paper investigates practical methods for efficient plaintext identification without transmitting redundant auxiliary information by employing cubic mappings. When the modulus is constructed from prime numbers satisfying specific conditions, the decryption process produces nine possible cube roots. Such ambiguity limits direct applicability of cubic mappings in practical cryptographic schemes. Three methods for identifying the original plaintext among nine possible candidates are proposed. The first method employs adaptive Jacobi symbol sequences with shifts. The second method exploits structural relationships between consecutive plaintext messages. The third method optimizes the second approach by transmitting only a small number of least significant bits from a secondary ciphertext. Experimental evaluation was conducted in Java using 1024-bit, 1536-bit, and 2048-bit moduli. Results demonstrate that all three methods reliably identify the original plaintext. The partial ciphertext method exhibited the best trade-off between computational cost and communication overhead, reducing decryption time by approximately 50%.

Keywords: Public-key cryptography, cubic residues, Jacobi symbol, trapdoor one-way functions, modular arithmetic, cryptographic identification.

Introduction

The rapid development of information technologies, electronic commerce, cloud computing, and distributed communication systems continuously increases the demand for secure and computationally efficient cryptographic solutions. Public-key cryptography remains one of the fundamental mechanisms for ensuring confidentiality, authentication, integrity, and secure data exchange in modern information systems. The most widely used public-key cryptosystems, including RSA and Rabin schemes, are based on modular arithmetic and the computational hardness of integer factorization. These cryptographic mechanisms have proven their effectiveness in a wide range of practical applications, including secure communications, digital signatures, authentication systems, and electronic transactions. Alongside traditional cryptographic schemes, increasing attention is being devoted to alternative mathematical constructions that could reduce computational complexity while maintaining an adequate level of security. Such interest is motivated by the growing scale of digital communications, the proliferation of resource-constrained devices, and the need for efficient cryptographic operations in distributed environments. One promising direction is the application of higher-degree modular functions in public-key cryptography. In particular, cubic mappings possess several attractive properties, including computationally efficient encryption due to the use of a small public exponent. In comparison with conventional public-key schemes, such mappings may offer reduced encryption complexity and simpler public-key structures. However, unlike traditional public-key cryptosystems, cubic modular mappings may generate multiple valid plaintext candidates during decryption. Under specific conditions, when the modulus is constructed from prime numbers satisfying $p \equiv q \equiv 1 (\mathrm{mod}\ 3)$, the decryption process may produce nine possible cube roots corresponding to the same ciphertext. This ambiguity significantly complicates practical deployment of such cryptographic constructions and limits their applicability in real-world communication systems.

Although previous studies have extensively investigated algorithms for cube root computation, finite field arithmetic, and theoretical aspects of higher-order residues, comparatively less attention has been devoted to practical methods enabling deterministic identification of the correct plaintext message among multiple candidate solutions without introducing substantial communication overhead or redundant encoding schemes. Consequently, the ambiguity problem remains one of the primary obstacles limiting wider practical application of cubic mappings in public-key cryptography.

Furthermore**,** although efficient cube root computation algorithms have been developed, the practical applicability of cubic mappings remains constrained by the lack of efficient ambiguity elimination mechanisms. Existing studies primarily focus on mathematical properties of cubic residues and root computation procedures, whereas comparatively little attention has been devoted to deterministic identification of the correct plaintext message among multiple valid candidates. As a result, a gap exists between the theoretical feasibility of cubic modular cryptosystems and their practical deployment in real-

world cryptographic applications. Therefore, the development of efficient ambiguity reduction methods that do not require substantial additional communication or computational resources constitutes a relevant scientific problem.

The research object of this study is ambiguity elimination in public-key cryptosystems based on cubic modular mappings.

The aim of this study is to develop and experimentally evaluate methods for deterministic identification of the original plaintext message among multiple candidate solutions generated during cubic function inversion.

To achieve this aim, the following tasks are formulated: to analyze the theoretical foundations of ambiguity arising in cryptosystems based on cubic modular mappings; to develop ambiguity reduction methods based on Jacobi symbol sequences, structural relationships between consecutive plaintext messages, and partial ciphertext information; to investigate the effectiveness of the proposed methods through theoretical and experimental analysis; to evaluate their computational efficiency and security implications; and to compare the developed methods in order to determine their practical applicability in public-key cryptographic systems.

The research employs methods of number theory, modular arithmetic, public-key cryptography, algorithm analysis, statistical evaluation, and experimental performance testing implemented in the Java programming environment.

The article consists of the following parts: Section 2 presents the problem analysis and literature review; Section 3 introduces research methodology, while Section 4 presents the adaptive Jacobi shift filtering method. Section 5 presents the consecutive-message pair identification method, and Section 6 describes the partial ciphertext method. Section 7 provides a comparative performance evaluation of the proposed algorithms, and Section 8 discusses the obtained results. Finally, Section 9 summarizes the main conclusions and outlines directions for future research.

Problem Analysis

Public-key cryptosystems based on modular exponentiation constitute one of the fundamental pillars of modern cryptography. The most widely known representatives are RSA and Rabin cryptosystems, whose security relies on computational hardness of integer factorization [1, 2]. RSA encryption is performed as: $c \equiv m^e (\mathrm{mod}\, n)$, where the public exponent e is selected to ensure unique invertibility during decryption [1]. In contrast, Rabin cryptography: $c \equiv m^2 (\mathrm{mod}\, n)$ is inherently multi-valued. Decryption produces four candidate plaintexts because four square roots exist modulo n [2, 3].

Ambiguity elimination methods for quadratic residue systems have been extensively investigated. Existing solutions include redundant bits, structured message encoding, and probabilistic filtering methods [2, 3]. These approaches improve deterministic identification but generally increase communication overhead or computational complexity. However, such methods primarily target quadratic mappings and are not directly applicable to higher-degree functions.

Number-theoretic research has extensively investigated higher-order residues, particularly cubic residues modulo n. Under specific conditions:.$n = p \cdot q$, where: $p \equiv q \equiv 1 (\mathrm{mod}\, 3)$, each cubic residue may possess up to nine distinct cube roots. This phenomenon follows directly from the Chinese Remainder Theorem and multiplicative group properties [6].

Research in this area has primarily focused on efficient root computation in finite fields and rings. Earlier studies investigated cube root computation algorithms, their mathematical properties, and computational complexity (Müller, 2004: 293–304; Barreto et al., 2006: 275–280). Later research examined optimization possibilities for these methods and their practical implementation (Cho et al., 2020: Article 101708, 10 pp.). These studies mainly emphasize multiplicative group structures, discrete logarithm-type transformations, applications of the Chinese Remainder Theorem, and efficient root computation in finite field arithmetic [4]–[6].

The mathematical foundations of applied cryptography, including modular arithmetic, finite fields, and the theoretical principles of algebra-based cryptographic systems, have been extensively investigated in foundational cryptographic literature (Menezes et al., 2018: 816 pp.). The theoretical foundations of public-key cryptography, the RSA algorithm, elliptic curve cryptography, discrete logarithm problems, and mathematical cryptographic algorithms are systematically examined in the work of Hoffstein et al. (2014: 540 pp.). Within the broader context of modern cryptography, increasing attention has been devoted to threats posed by quantum computing and to the development of post-quantum cryptographic methods (Bernstein et al., 2009; Bernstein and Lange, 2017: 188–194).

The literature analysis revealed that existing studies primarily focus on cube root computation algorithms, mathematical foundations, security assumptions, and theoretical properties; however, they provide little practical investigation into how to efficiently identify the correct plaintext message among multiple possible candidates without transmitting additional redundant information. The use of auxiliary identification information in cryptographic schemes requires evaluation of whether the transmission of additional data weakens the security properties of the underlying one-way function. Unlike RSA, where decryption produces a unique result, or the Rabin scheme, where four candidates are obtained, cubic functions may generate up to nine possible candidates [5], [6]. As the degree of the function increases, the number of possible solutions grows rapidly, making traditional ambiguity elimination methods less effective or requiring additional transmitted information.

However, the growing demand for efficient and alternative cryptographic constructions motivates renewed investigation into the potential of higher-degree functions. The cubic mapping $c \equiv m^3 (\mathrm{mod}\, n)$ possesses several attractive properties. Due to the small public exponent (e=3), encryption can be performed faster and may require fewer computational resources than traditional schemes [1, 2]. The public-key structure becomes simpler, while key generation procedures may require fewer auxiliary parameters. If the ambiguity problem could be eliminated efficiently and reliably, such functions could become a competitive alternative to existing public-key cryptosystems.

In previous studies conducted by the authors of this publication, aspects of number theory and public-key cryptography forming the theoretical foundation of the problem investigated in this work were examined. Efficient computational methods and their application possibilities were analyzed in the development of algorithms for determining Euler's totient function values (Nefas et al., 2021: 135–141), while the factorization problem was investigated as one of the fundamental security assumptions underlying public-key cryptography (Nefas et al., 2022: 165–170). More recent studies have also examined theoretical and practical aspects of ensuring security in public-key cryptographic systems (Nefas et al., 2024: 55–60).

Considering the above, a clear research gap becomes evident. Although efficient cube root computation methods exist [4-6], comparatively less attention has been devoted in the literature to practical and efficient solutions for eliminating ambiguity in cryptosystems based on cubic residues without employing redundant encoding schemes or significantly increasing communication overhead. Therefore, this work investigates practical methods enabling deterministic identification of the correct plaintext message among multiple possible candidates. Three algorithms are proposed, exploiting statistical properties of Jacobi symbols, structural relationships between consecutive plaintext messages, and partial ciphertext information. These methods enable evaluation of the practical applicability of cubic mappings in public-key cryptography and establish a foundation for further experimental investigation.

Research Methodology

The research methodology consists of theoretical analysis and experimental validation of ambiguity reduction methods for public-key cryptosystems based on cubic modular mappings. The study combines methods of number theory, modular arithmetic, public-key cryptography, algorithm analysis, statistical evaluation, and experimental performance testing.

The first stage of the research focuses on the theoretical analysis of ambiguity arising during inversion of the cubic mapping ($x^3 mod\ n$) when the modulus ($n = p \cdot q$) is constructed from prime numbers satisfying the condition ($p \equiv q \equiv 1 (\mathrm{mod}\, 3)$). The mathematical properties of cubic residues, cube root computation procedures, and ambiguity formation mechanisms are analyzed using concepts from number theory and modular arithmetic.

Based on the identified ambiguity problem and the research gap revealed by the literature analysis, three ambiguity reduction methods are developed. The first method exploits statistical properties of Jacobi symbol sequences. The second method utilizes structural relationships between consecutive plaintext messages. The third method is based on partial ciphertext information and represents an optimization of the second approach.

The effectiveness of the proposed methods is evaluated through theoretical and experimental analysis. Three research hypotheses are formulated and subsequently verified using statistical experiments. The evaluation focuses on the ability of the proposed methods to uniquely identify the original plaintext message among multiple valid decryption candidates.

Experimental investigations are implemented in the Java programming environment (JDK 17). Randomly generated prime numbers and plaintext messages are used to construct test datasets. Statistical validation involves up to 10,000 experimental trials, depending on the investigated method. Cryptographic

moduli of 1024, 1536, and 2048 bits are selected to evaluate the behavior of the proposed methods under different security levels and computational conditions.

The proposed methods are assessed according to four criteria: identification accuracy, amount of transmitted auxiliary information, computational performance, and security implications. Computational performance is evaluated by measuring execution times on both the sender side (encryption) and the receiver side (decryption and identification). Statistical analysis is used to determine the probability of successful message identification and to evaluate the practical applicability of the proposed ambiguity reduction methods.

Theoretical Analysis: Adaptive Jacobi Shift Filtering Method

The Jacobi symbol is a generalization of the Legendre symbol to all odd composite moduli. The Legendre symbol (a/p), where p is a prime number, determines whether the number a is a quadratic residue modulo p, i.e., whether there exists an integer x such that (1):

$$x^2 \equiv a \ (mod\ p) \tag{1}$$

If such a value exists, the symbol is equal to 1; if no such value exists, it is equal to −1; and if $a \equiv 0 \ (mod\ p)$, the symbol is equal to 0.

The Jacobi symbol (a/n), where $n = p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_k^{e_k}$, is defined as the product of Legendre symbols (2):

$$(a/n) = (a/p_1)^{e_1}(a/p_2)^{e_2} \cdots (a/p_k)^{e_k} \tag{2}$$

It is important to note that, unlike the Legendre symbol, the Jacobi symbol does not always determine whether a is a quadratic residue modulo n. However, it preserves important algebraic properties and can be computed efficiently without knowledge of the factorization of the modulus.

Jacobi symbol computation is performed using a modification of the Euclidean algorithm together with symbol reciprocity rules; therefore, its computational complexity is $O(\log n)$. For this reason, it is practically suitable for use with large moduli (e.g., 2048-bit moduli).

In this research the Jacobi symbol is employed as a computationally efficient filtering mechanism: each symbol value contributes one bit of information, while a sequence of multiple symbols enables efficient discrimination of the original plaintext message among several possible candidates. The proposed algorithm is based on the assumption that Jacobi symbol values corresponding to different shifts behave similarly to independent random variables taking values from the set $\{-1, 1\}$ with approximately equal probabilities. Since the Jacobi symbol is a deterministic function, its values can be computed precisely during encryption and identically reconstructed during decryption.

Although Jacobi symbols are deterministic values, their distributions in modular arithmetic often exhibit statistical characteristics resembling pseudo-random behavior. In particular, for sufficiently large moduli and varying input values, positive and negative Jacobi symbol values tend to occur with comparable frequencies. Consequently, sequences of Jacobi symbols generated from different shifts may provide discriminative information that can be exploited for candidate filtering. Based on this observation, Jacobi symbol sequences are investigated as a potential mechanism for distinguishing the correct plaintext message from multiple valid decryption candidates.

It is expected that a sequence of such symbols (referred to as a *"fingerprint"*) will enable efficient identification of the original plaintext message among nine possible candidates obtained through inversion of the cubic function.

Let $n = p \cdot q$, where $p \equiv q \equiv 1 \ mod\ 3$, and let m be a plaintext message satisfying $c \equiv \mathrm{m}^3 \ mod\ n$. Assume that the decryption process produces a set of nine possible candidate plaintexts: $M = \{\mathrm{m}_1, \mathrm{m}_2, \dots, \mathrm{m}_9\}$.

It is assumed that the Jacobi symbol sequence (3):

$$J(\mathrm{m}, \mathrm{s_i}) = \left(\frac{\mathrm{m}+\mathrm{s_i}}{\mathrm{n}}\right), \quad i = 1,2, \dots, k \tag{3}$$

For different shift values exhibits properties similar to those of independent random variables. where $P(\mathrm{J} = 1) \approx P(\mathrm{J} = -1) \approx 0{,}5$.. The hypothesis 1 follows from this assumption.

Hypothesis 1. *If Jacobi symbol values corresponding to different shifts exhibit properties similar to those of independent random variables, then a Jacobi symbol sequence can be used as an effective filtering*

mechanism for statistically eliminating incorrect candidates and identifying the original plaintext message with high probability.

To test the proposed hypothesis, a statistical study was conducted. During the experiment, 10,000 random pairs of prime numbers (*p, q*) and plaintext messages *m* were generated. In each case, the minimum number of shifts $s \in \{1, 2, \dots, 20\}$ required for the system to independently identify the original plaintext message was calculated (Table 1):

Table 1

Experimental Results

Number of Shifts (k)	Number of Cases (from 10 000)	Number of Shifts (k)	Number of Cases (from 10 000)
1	0	7	579
2	723	8	318
3	2465	9	142
4	2697	10	71
5	1864	11–18	81
6	1060	>18	0

Source: prepared by the authors

The data indicate that, in most cases (mode), only four shifts are sufficient for unambiguous identification. The absence of successful cases for *k*=1 is expected, since a single Jacobi symbol provides only one bit of information, whereas distinguishing one candidate among nine theoretically requires at least $\log_2(9) \approx 3{,}17$ bits of information. More than 99 % of identifications were completed within the first ten steps.

The obtained results support the theoretical assumption that Jacobi symbol sequences generated using multiple shifts can serve as discriminative fingerprints for filtering candidate plaintexts. The analysis indicates that even a relatively short sequence of Jacobi symbols provides sufficient information to distinguish the correct plaintext message from multiple cube-root candidates with high probability.

The amount of auxiliary information transmitted in this method remains very small compared to the total amount of transmitted information. Since a single Jacobi symbol conveys no more than one additional bit of information, in practice a sequence of approximately ten symbols is typically sufficient, corresponding to roughly ten additional bits. When using a 2048-bit modulus, this represents less than 0.5 % of the total transmitted information.

It is important to emphasize that the Jacobi symbol by itself does not directly enable reconstruction of either the original plaintext message or the cube root value. In this work, Jacobi symbols are used exclusively as a filtering mechanism for progressively eliminating incorrect candidates among multiple possible solutions. Since the symbol value is computed from already existing candidates and does not provide direct information regarding inversion of the cubic function, the use of such auxiliary information does not alter the security assumptions of the underlying one-way function.

Assume that an efficient algorithm existed capable of practically reconstructing the original plaintext message using the transmitted Jacobi symbol sequence. In such a case, the algorithm could potentially be transformed into an efficient method for inverting the cubic function without knowledge of the modulus factorization. Since such a possibility would contradict the security assumptions of the employed trapdoor one-way function, it is reasonable to conclude that transmitting additional Jacobi symbols does not provide a practical cryptanalytic advantage.

It should be noted that the presented argument does not constitute a formal cryptographic security proof. Rather, it provides a heuristic justification indicating that the transmitted Jacobi symbol sequence does not appear to reveal sufficient information to reduce the computational complexity of the underlying cubic inversion problem. Formal security analysis of this ambiguity reduction mechanism remains a subject for future research.

Consecutive Message Pair Identification Method

The main idea of the second method is to exploit a known structural relationship between two consecutive plaintext messages. If the sender encrypts two consecutive numbers m and $m+1$, two ciphertexts are generated (4):

$$c = m^3 \ mod \ n \text{ and } \ c_1 = (m+1)^3 \ mod \ n. \quad (4)$$

During decryption, each ciphertext produces nine possible candidate solutions, forming two candidate sets (5):

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_9\} \text{ and } M_1 = \{m_1', m_2', \dots, m_9'\}. \quad (5)$$

It is assumed that among these $9 \times 9 = 81$ possible candidate pairs, there exists a unique pair satisfying the original arithmetic relationship. Since the original plaintext messages differ by exactly one, the corresponding candidate sets are expected to preserve this relationship only for the correct pair of solutions. Although multiple cube roots are generated during modular inversion, the probability that an incorrect candidate pair satisfies the same arithmetic condition is expected to be low. Therefore, the relationship ($m_j' - m_i = 1$) is investigated as a potential deterministic identification mechanism.

Hypothesis 2. *Among candidate sets M* ir M_1 *there exists a unique pair* (m_i, m_j'), *satisfying the condition*: $m_j' - m_i = 1$. *If this hypothesis holds, the original plaintext message m can be deterministically identified without requiring additional statistical information, simply by locating the unique candidate pair satisfying this arithmetic relationship*.

It should be noted that both *c* and *c_1* are ciphertexts generated using the same one-way function. Transmitting these two values does not reveal the content of the original plaintext message *m*, since recovering the message from either c or c_1 directly reduces to the problem of inverting the cubic function, i.e., extracting a cube root modulo *n*, which is computationally difficult without knowledge of the factorization of *n*. The use of these additional transmitted values does not alter the underlying hardness assumptions of the cubic inversion problem. Suppose that an efficient algorithm existed that could reconstruct the plaintext message using the two transmitted ciphertexts. Such an algorithm could then be used to solve the cubic function inversion problem without knowledge of the modulus factorization. This would contradict the security assumption of the underlying one-way function.

The experiments were conducted in a Java environment using 1024-bit, 1536-bit, and 2048-bit moduli *n*. For each key length, 1000 trials were performed, evaluating identification accuracy and execution time.

The experimental results support Hypothesis 2: within the performed experimental dataset, a unique candidate pair satisfying the condition $m_j' - m_i = 1$ was identified in all trials (Table 2).

Table 2

Median Execution Time of Operations

Key Length	Trials	Errors	Accuracy
1024-bit	1000	0	100 %
1536-bit	1000	0	100 %
2048-bit	1000	0	100 %

Source: prepared by the authors

Table 3

Execution Time Distribution (Median Values Across 1000 Trials)

Operation	1024-bit	1536-bit	2048-bit
Encryption	0,010 ms	0,019 ms	0,032 ms
Cube roots from *c*	1,60 ms	3,77 ms	7,33 ms
Cube roots from *c_1*	1,60 ms	3,75 ms	7,34 ms
Pair search (*M*×*M1*)	0,002 ms	0,001 ms	0,0016 ms
Total	3,22 ms	7,55 ms	14,85 ms

Source: prepared by the authors

As shown in Table 3, the majority of execution time (~99.8 %) is consumed by cube root computation, which is performed twice in this method.

Analysis of the 2048-bit key case revealed that:

- Encryption accounts for only approximately 0.2% of total execution time.
- Cube root extraction dominates the algorithm structure (~99.8%).
- Candidate pair search is computationally negligible (< 0.01 %).

The overall execution time grows approximately quadratically with increasing key length, which is characteristic of large-integer arithmetic operations, such as modular exponentiation and application of the Chinese Remainder Theorem (CRT).

Partial Ciphertext Method

The third algorithm represents an optimization of the second method aimed at eliminating two major limitations of that approach:

- **communication overhead**, since two complete ciphertexts are transmitted, effectively doubling the communication volume; and
- **computational cost**, because the receiver is required to perform the computationally expensive cube root extraction operation modulo *n* twice.

The main idea of the third method is to transmit only a small portion of the least significant bits (LSB – *Least Significant Bits*) of the ciphertext $c_2 = (m+1)^3 \ mod \ n$ instead of transmitting the entire ciphertext.

The algorithm operates as follows: the sender computes $c = m^3 \ mod \ n$ and $c_2 = (m+1)^3 mod \ n$. The sender transmits *c* together with the *k* least significant bits of c_2. The receiver computes nine possible roots from *c*, obtaining the candidate set $M = \{m_1, m_2, \dots, m_9\}$. For each candidate m_i the receiver additionally computes a test ciphertext: $c_i' = (m_i + 1)^3 mod \ n$ and compares the *k* least significant bits of c_i' with those received from the sender. The candidate whose bits match is identified as the original plaintext message *m*.

Hypothesis 3. *A small subset of ciphertext bits is sufficient for unambiguous identification.*

Since the probability of a random match for an incorrect candidate is 2^{-k}, the expected number of incorrect candidates remaining after filtering is given by (6):

$$E(\text{errors}) = 8 \cdot 2^{-k}. \quad (6)$$

As *k* increases, this probability decreases exponentially, causing the probability of unambiguous identification to rapidly approach 1.

To validate Hypothesis 3, a statistical study was conducted using a 2048-bit modulus across 10,000 experimental trials. The results demonstrate the relationship between the number of transmitted bits *k* and identification success rate (Table 4):

Table 4

Results of Hypothesis 3 Validation

Number of Bits (*k*)	Unambiguous Cases	Ambiguous Cases	Possibility
4	5868	4132	0,5868
8	9693	307	0,9693
12	9986	14	0,9986
16	9999	1	0,9999
18	10000	0	1,0000

Source: prepared by the authors

The following advantages of the proposed method were identified:

1. **Performance:** Decryption speed increases by approximately a factor of two compared to Algorithm 2, since the most computationally expensive operation (cube root extraction) is performed only once. Encryption $(m_i + 1)^3 mod \ n$ is several thousand times faster than decryption.
2. **Complexity comparison:** Although nine modular exponentiation operations must be performed during decryption, their total computational cost is negligible compared to a single modular exponentiation involved in root computation using the Chinese Remainder Theorem.
3. **Compactness:** Additional communication overhead is reduced by more than two orders of magnitude (from 2048 bits to approximately 16–18 bits).
4. **Security:** The transmitted *k* bits constitute only a small portion of the function value $c_2 = (m+1)^3 mod \ n$. Since *k* is very small compared to the overall modulus length, disclosure of these bits does not directly reveal the original plaintext message *m*. For a 2048-bit modulus transmitting 18 auxiliary bits, the additional information constitutes less than 1 % of the total ciphertext length. The transmitted partial ciphertext information is used exclusively for candidate filtering and does not directly provide a method for inverting the cubic function.

Assume that an efficient algorithm exists that is capable of reconstructing the plaintext message using the transmitted partial ciphertext information. In such a case, the algorithm could potentially be transformed into a method for solving the cubic inversion problem modulo (n) without knowledge of the modulus factorization. Since such a possibility would contradict the security assumptions of the underlying one-way

function, the disclosed auxiliary information does not appear to provide a practical cryptanalytic advantage or reduce the computational complexity of the cubic inversion problem.

It should be noted that this argument does not constitute a formal cryptographic security proof. Rather, it provides a heuristic justification indicating that the transmitted auxiliary bits do not appear to reveal sufficient information for efficient recovery of the original plaintext message. In the proposed method, auxiliary bits are used solely for candidate selection among already computed candidate solutions and do not directly facilitate modulus factorization or inversion of the cubic function. Formal security analysis of the proposed mechanism remains a subject for future research.

Comparative Analysis of Algorithms and Performance Evaluation

All algorithms and statistical evaluation tests used in this study were implemented in Java (using JDK 17). The complete source code enabling reproduction of the experimental results is publicly available in a GitHub repository [15].

A comprehensive performance evaluation of all three algorithms (A1, A2, and A3) was conducted using key lengths of 1024, 1536, and 2048 bits. For each key length, 1000 trials were performed while measuring the average execution time at both the sender side (Party A – encryption) and receiver side (Party B – decryption and identification). The algorithm comparison results are presented in Table 5:

Table 5

Average Execution Time (ms)

Key Length	Side	Algorithm 1	Algorithm 2	Algorithm 3
1024-bit	A (Sender)	1,6187 ms	0,0109 ms	0,0114 ms
	B (Receiver)	3,7666 ms	3,2765 ms	1,6611 ms
1536-bit	A (Sender)	2,8654 ms	0,0197 ms	0,0200 ms
	B (Receiver)	7,5758 ms	7,6867 ms	3,9062 ms
2048-bit	A (Sender)	4,3705 ms	0,0333 ms	0,0334 ms
	B (Receiver)	13,0190 ms	14,7795 ms	7,4674 ms

Source: prepared by the authors

Analysis of the obtained results (Table 5) reveals the following key observations:

1. **Sender-side (Party A) computational overhead:** Algorithm 1 exhibits the highest computational cost on the sender side (up to 4.37 ms using a 2048-bit key), since computation of the Jacobi symbol sequence is required. In contrast, Algorithms 2 and 3 demonstrate significantly lower execution times on the sender side (approximately 0.033 ms), because encryption relies on modular cubing with a small exponent value (e=3). As a result, these algorithms operate approximately 130 times faster than the method based on Jacobi symbol sequence computation.
2. **Receiver-side (Party B) efficiency:** Algorithm 3 demonstrated the best decryption performance. It operates approximately twice as fast as Algorithm 2. This confirms the theoretical assumption that eliminating the second cube root extraction operation reduces receiver-side execution time by approximately 50 %. Algorithm 1 remains competitive on the receiver side only for shorter key lengths but loses its advantage relative to Algorithm 3 due to the additional Jacobi symbol computations required for each candidate.

Overall, the obtained results demonstrate that all three algorithms successfully address the ambiguity problem, although they differ substantially in terms of computational requirements and communication overhead. Algorithm 1 minimizes transmitted auxiliary information, Algorithm 2 provides deterministic identification, whereas Algorithm 3 achieves the most favorable balance between identification accuracy, execution speed, and communication efficiency.

Discussion

The experimental results demonstrated that ambiguity arising from cubic mappings can be effectively eliminated using a relatively small amount of auxiliary information.

The Jacobi symbol filtering method revealed that a sequence of several symbols can function as a type of message *"fingerprint."* Although a single Jacobi symbol contributes only one bit of information, combining multiple such symbols enables rapid elimination of incorrect candidate plaintexts.

The consecutive-message method provides a deterministic identification mechanism. Experiments conducted using different key lengths demonstrated that the correct candidate pair can always be identified based on a simple arithmetic relationship. However, this approach requires transmission of two complete ciphertexts and execution of the cube root extraction operation twice.

The partial ciphertext method represents an optimization of this approach. By transmitting only a small number of bits from the second ciphertext, the receiver can identify the correct candidate without performing a second root computation. Experimental results demonstrated that this approach reduces overall decryption time by approximately half.

From a security perspective, the amount of transmitted auxiliary information remains very small relative to the modulus length. Consequently, it does not appear to provide a significant advantage to a potential cryptanalyst attempting to reconstruct the plaintext message or factorize the modulus. Similarly, the transmitted auxiliary information does not appear to alter the computational hardness assumptions associated with the cubic inversion problem or create practical conditions for more efficient recovery of the original plaintext message.

Although the proposed methods demonstrated high identification accuracy and favorable computational properties, several limitations should be acknowledged. The Jacobi-based method relies on statistical assumptions regarding the behavior of Jacobi symbol sequences and therefore would benefit from additional theoretical analysis. The consecutive-message method requires transmission of an additional ciphertext, while the partial ciphertext method introduces a small amount of auxiliary information. Furthermore, experimental evaluation was performed using cryptographic moduli up to 2048 bits, and additional investigations are required to determine whether similar behavior is preserved for larger key sizes and alternative modulus constructions.

It should be emphasized that the presented security considerations are heuristic in nature and do not constitute formal cryptographic security proofs. The arguments provided in this study indicate that the proposed ambiguity reduction mechanisms do not appear to reduce the computational hardness of the underlying cubic inversion problem or provide a practical cryptanalytic advantage. Nevertheless, rigorous reduction-based security proofs and information-theoretic analysis of the disclosed auxiliary information remain important directions for future research.

Conclusions

1. The efficiency analysis of the three proposed algorithms demonstrated that their applicability depends on achieving an appropriate balance between computational cost and the amount of transmitted auxiliary information. Algorithm 1 enables message identification while transmitting minimal auxiliary information; however, it requires the highest computational cost on the sender side. Algorithm 2 ensures deterministic identification but requires transmission of two complete ciphertexts and execution of two cube root extraction operations. Algorithm 3 demonstrated the best experimental trade-off between efficiency and communication overhead. By transmitting only partial information from the second ciphertext, receiver-side execution time was reduced from 14.78 ms to 7.47 ms (approximately 49.5%) when using a 2048-bit modulus.

2. The conducted theoretical and experimental investigation demonstrated that the ambiguity problem arising in public-key cryptosystems based on the cubic mapping $x^3 mod\ n$ can be effectively addressed. The results showed that, although cubic function inversion generates nine possible plaintext candidates when $p \equiv q \equiv 1\ (mod\ 3)$, the proposed ambiguity reduction methods provide a practical mechanism for identifying the original plaintext message with high reliability.

3. Statistical experiments demonstrated that when using Jacobi symbol shift sequences, the original plaintext message is identified within 10 filtering steps in more than 99% of cases. Since each Jacobi symbol contributes one additional information bit, this method practically requires approximately 10 auxiliary bits, representing less than 0.5% of transmitted information when using a 2048-bit modulus. However, this method requires the highest computational cost on the sender side, with average execution time reaching 4.37 ms when using a 2048-bit key.

4. Experimental results demonstrated that Algorithm 3 represents the most efficient refinement of Algorithm 2. Transmitting only the 18 least significant bits of the second ciphertext resulted in successful identification in all performed experimental trials while reducing receiver-side execution time from 14.78 ms to 7.47 ms when using a 2048-bit modulus. The elimination of the second cube root extraction operation enabled approximately a twofold improvement in decryption performance.

5. The scientific novelty of this research lies in the proposal and experimental evaluation of three ambiguity reduction methods for public-key cryptosystems based on cubic modular mappings. Unlike previously published studies, which primarily focus on cube root computation algorithms and theoretical properties of cubic residues, the proposed methods address the practical problem of deterministic plaintext identification among nine possible decryption candidates. The obtained results demonstrate that ambiguity

can be eliminated without employing redundant encoding schemes and with only minimal additional communication overhead.

6. The obtained results indicate that the proposed methods preserve a high level of security, since the transmitted auxiliary information (Jacobi symbols or partial ciphertext bits) does not appear to provide a practical cryptanalytic advantage for factorizing the modulus n or inverting the cubic function. The presented analysis suggests that the proposed ambiguity reduction mechanisms do not reduce the computational hardness of the underlying cubic inversion problem, although formal security proofs remain a subject for future research. Among the investigated approaches, Algorithm 3 provides the best balance between execution speed, communication overhead, and identification accuracy, making it particularly suitable for practical deployment in real-time systems.

7. Future research may be extended in several directions:

- conducting deeper theoretical analysis of the statistical properties of Jacobi symbol sequences to provide stronger justification for the effectiveness of Algorithm 1;
- investigating optimized shift sequences to reduce the required number of Jacobi symbols and further accelerate the identification process;
- adapting similar methods to other modular functions, such as fourth-degree or fifth-degree residue systems;
- integrating cubic mappings into experimental cryptographic schemes or hybrid protocols to evaluate their practical applicability in real-world communication systems and identify opportunities to reduce computational costs while maintaining the required security level.

References

1. Rivest R. L., Shamir A., Adleman L. A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120–126, 1978.
2. Paar C., Pelzl J. *Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners.* Springer, 2010.
3. Rabin M. O. Digitalized Signatures and Public-Key Functions as Intractable as Factorization. Technical Report MIT/LCS/TR-212, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1979.
4. Menezes A., van Oorschot P., Vanstone S. Handbook of Applied Cryptography**.** CRC Press (reprint edition widely used in modern cryptography), 2018, 816 p.
5. Barreto P. S. L. M., Voloch J. F. *Efficient computation of roots in finite fields. Designs, Codes and Cryptography*, 39(2), 275–280, 2006.
6. Müller S. *On the computation of cube roots modulo p*. In: *High Primes and Misdemeanours: Lectures in Honour of the 60th Birthday of Hugh Cowie Williams*. Fields Institute Communications. Vol. 41. American Mathematical Society; 2004. p. 293–304.
7. Cho, G. H., Kwon, S., & Lee, H.-S. *A refinement of Müller's cube root algorithm*. *Finite Fields and Their Applications*, 67**,** Article 101708, 2020.
8. Nishihara N., Harasawa R., Sueyoshi Y., Kudo A. A remark on the computation of cube roots in finite fields. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E96-A, no. 1, pp. 348–351, 2013.
9. Hoffstein J., Pipher J., Silverman J**.** An Introduction to Mathematical Cryptography (2nd ed.). Springer, 2014, 540 p.
10. Bernstein D. J., Lange T. *Post-quantum cryptography***.** Nature, 549, 188–194, 2017.
11. Bernstein D. J., Buchmann J., Dahmen E. Post-Quantum Cryptography**.** Springer, 2009.
12. Nefas P., Jankūnienė R. *Eulerio funkcijos reikšmės paieškos algoritmai*. Inžinerinės ir edukacinės technologijos, 2021, Nr. 1, p. 135–141.
13. Nefas P., Jankūnienė R. *Sudėtinių skaičių faktorizavimo algoritmas*. Inžinerinės ir edukacinės technologijos, 2022, Nr. 1, p. 165–170.
14. Nefas P., Jankūnienė R. *Viešo rakto saugumo užtikrinimas kriptografijoje: teoriniai ir praktiniai aspektai*. Inžinerinės ir edukacinės technologijos, 2024, Nr. 1, p. 55–60.
15. Nefas P. *Experimental implementation of cubic modular cryptography algorithms.* GitHub repository. (Accessed: 2026-01-25). https://github.com/PetrasN/cubic-crypto

NEVIENAREIKŠMIŠKUMO MAŽINIMO METODŲ VIEŠOJO RAKTO KRIPTOSISTEMOSE KŪRIMAS IR ANALIZĖ

Santrauka

Viešojo rakto kriptografijoje pastaruoju metu iškilo ir vis didėja poreikis efektyvioms ir alternatyvioms kriptografinėms konstrukcijoms, kurios leistų sumažinti skaičiavimo resursų poreikį kriptografinei sistemai. Vienas iš sprendimų - pranešimo užšifravimui vietoj įprastų RSA ar kito šifravimo metodo taikyti aukštesnio laipsnio funkcijų potencialą. Tačiau toks sprendimas ženkliai apsunkina patį pranešimo dešifravimo procesą, nes dėl daugiareikšmiškumo problemos iškyla papildomų mechanizmų poreikis teisingam pranešimui identifikuoti. Šiame straipsnyje autoriai

praktiškai tiria galimybę efektyviai identifikuoti priimtą pranešimą, nenaudojant tam papildomų perteklinių duomenų, tam pritaikant būtent kubinę funkciją $x^3 mod\ n$. Kai modulis $n = pq$ sudarytas iš pirminių skaičių, tenkinančių sąlygą $p \equiv q \equiv 1(mod 3)$, dešifravimo metu gaunamos devynios galimos kubinės šaknys. Toks dviprasmiškumas riboja tiesioginį šios funkcijos taikymą praktinėse kriptografinėse schemose. Straipsnyje pasiūlyti trys metodai, leidžiantys identifikuoti tikrąjį pranešimą tarp devynių galimų kandidatų. Pirmasis metodas naudoja adaptacinę Jacobi simbolių seką su poslinkiais. Antrasis metodas išnaudoja struktūrinį ryšį tarp dviejų gretimų pranešimų. Trečiasis metodas yra optimizuota antrojo metodo versija, kurioje perduodama tik nedidelė dalis antrosios šifrogramos žemiausių bitų. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Java aplinkoje, naudojant 1024, 1536 ir 2048 bitų modulius. Gauti rezultatai rodo, kad visi trys metodai leidžia patikimai identifikuoti originalų pranešimą. Nustatyta, kad dalinės šifrogramos metodas pasižymi geriausiu balansu tarp skaičiavimo sąnaudų ir perduodamos informacijos kiekio, leidžiant sumažinti dešifravimo laiką maždaug du kartus.

Reikšminiai žodžiai: viešojo rakto kriptografija, kubinės liekanos, Jacobi simbolis, vienkryptės funkcijos, modulinė aritmetika, kriptografinė identifikacija.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF REAR SUSPENSION COIL SPRING STIFFNESS

Tomas Mickevičius
Lietuvos Inžinerijos Kolegija|Higher Education Institution

Abstract

The vehicle suspension system is one of the most important systems of an automobile, comprising elastic elements, shock absorbers, protective components, and the connections between the vehicle body and its wheels. The dimensional design of suspension components, the application of advanced technologies, and the proper geometric arrangement and integration of suspension elements within the chassis have a significant influence on vehicle safety and ride comfort. The primary function of the suspension system is to absorb road-induced impacts and reduce them to minor vibrations transmitted to the vehicle body.

This study presents an experimental investigation of the compression characteristics of coil springs with the aim of evaluating their stiffness under loading conditions. The experiments were conducted to identify manufacturing variations and mechanical differences between springs belonging to the same manufacturer and product model. The tests were performed using the LABA7 Spring Rate Tester Daily, a dedicated testing system designed to determine the mechanical properties of automotive suspension springs under compressive loading. The testing procedure enables continuous measurement of load and deformation, allowing the construction of force–displacement characteristics.

The experimental results demonstrate that coil springs from the same manufacturer and product model do not exhibit identical displacement responses under equivalent loading conditions. Differences in the stiffness coefficient were observed throughout the compression process, becoming more pronounced as the compression stroke increased. The findings indicate that even relatively small variations in spring stiffness may result in uneven load distribution on the rear axle, which can adversely affect vehicle stability and ride comfort. The experimental results revealed stiffness deviations ranging from approximately 4% to 6% between coil springs belonging to the same product set.

Key words: coil spring, stiffness, force, displacement

Introduction

Recent advances in automotive suspension systems have been primarily driven by increasing demands for ride comfort, driving safety, and the integration of electric and autonomous vehicle technologies. Although active suspension systems have received considerable research attention due to their ability to improve vehicle dynamics, passive suspension systems remain the most widely used solution in commercial passenger vehicles because of their simplicity, reliability, and cost-effectiveness. Consequently, the mechanical characteristics of passive suspension components, particularly coil springs, continue to play a crucial role in determining vehicle ride comfort, handling stability, and load distribution. For this reason, precisely measuring spring stiffness and tracking manufacturing inconsistencies continues to be a critical focus in ongoing research (Yu et al., 2024).

A vehicle relies on its suspension system to bridge the gap between the chassis and the wheels. By integrating both rigid and elastic components, this setup allows for relative movement while ensuring a smooth, stable ride (Pridie & Antonya, 2021). Key parts include dampers, elastic elements, linkages, and control arms. Whenever a vehicle hits uneven ground, the resulting physical shocks move directly from the tires into the chassis (Han & Liang, 2022). The suspension's primary job is to intercept this energy—keeping passengers comfortable, preventing long-term wear on the vehicle's frame, and maintaining overall drivability (Aboazoum, 2022).

In a conventional suspension system, each wheel is independently connected to the vehicle body through a combination of elastic and damping elements. This configuration influences the vibration behaviour of the entire vehicle body, while the elastic and damping components must effectively respond to all possible wheel motions. Consequently, the natural frequencies of the suspension system are governed by the spring stiffness, the location of the vehicle's centre of mass, and the wheel assemblies. Suspension designs improved dramatically once engineers started integrating anti-roll bars. These components actively fight body lean, keeping the car completely stable through sharp turns and quick steering inputs (Pridie & Antonya, 2021).

Although numerous studies have investigated suspension design and ride comfort, limited attention has been devoted to manufacturing variability between nominally identical aftermarket coil springs. Variations in spring stiffness may influence axle load distribution, vehicle stability and ride comfort; however, quantitative experimental data comparing different manufacturers remain scarce.

The research problem addressed in this study is whether coil springs manufactured by the same manufacturer and belonging to the same product model exhibit identical mechanical properties that may influence suspension performance.

The aim of this study is to evaluate the differences in the displacement and stiffness characteristics of coil springs belonging to identical product sets.

The objectives of the study are as follows:

- measure the force–displacement characteristics of the tested coil springs;
- determine the relationship between instantaneous spring stiffness and deformation throughout the entire compression range;
- compare the mechanical characteristics of coil springs belonging to the same product set.

The research methodology combines a review of the relevant scientific literature with experimental investigations. Compression tests of automotive coil springs were performed using a dedicated spring testing system to determine the force–displacement relationship and the corresponding stiffness coefficient. The experimental data were subsequently analysed and compared to evaluate differences in the mechanical characteristics of the tested springs.

Theoretical Aspects of Elastic Components in Automotive Suspension

At the theoretical level, automotive suspension springs function primarily as energy storage mechanisms. When a vehicle encounters a road disturbance, the elastic components deform, immediately converting the kinetic energy of the impact into potential strain energy. The fundamental physics governing this process dictate how quickly and efficiently the suspension can absorb a shock before the damper dissipates that energy as heat. Consequently, analysing these components requires a deep understanding of structural deformation and load distribution under dynamic driving conditions. Coil springs are among the most important components of a vehicle suspension system, as they absorb road-induced vibrations and contribute significantly to vehicle stability and ride comfort. A suspension's overall effectiveness relies heavily on these underlying mechanical properties. For this reason, rigorously testing spring stiffness is a mandatory step when developing new systems and verifying production quality (Imoro et al., 2023).

Elastic elements do much more than just smooth out rough roads to keep the tyres grounded (Aboazoum, 2022). They also dictate how the wheels react under hard acceleration, heavy braking, and sharp turns. By managing these forces, the springs physically prevent the vehicle's body from swaying excessively over uneven pavement (Mahanthi & Murali, 2017).

During vehicle operation, suspension components are continuously subjected to dynamic loads, vibrations, and impact forces. Consequently, their technical condition has a significant influence on vehicle safety and overall driving performance. Achieving a safe, reliable, and durable suspension system requires careful consideration of numerous geometric, structural, and technological factors. The physical shape and load capacity of a coil spring dictate its exact functional behaviour in real-world applications (Kobelev, 2024). This mechanical profile determines the success of the entire suspension system. It sets the baseline for how the vehicle handles and how comfortable the ride feels (Partheeban & Ibrahim, 2025).

To optimise suspension performance for specific operating requirements, two fundamental aspects must be considered: the mechanical properties of the spring material and the structural design of the spring itself. Both factors should be carefully selected and optimised according to the intended application to achieve the desired balance between durability, ride comfort, and handling performance.

Materials and Methods

The experimental investigation was conducted using the LABA7 Spring Rate Tester Daily, a spring stiffness testing system designed to evaluate the mechanical properties of automotive suspension springs under compressive loading. The testing system enables continuous measurement of applied load and spring deformation, allowing the construction of force–displacement characteristics for the tested components. A BMW 330d (E90) was selected as the reference vehicle for this study. The experimental investigation involved four sets of rear suspension coil springs manufactured by different manufacturers and designed for the rear axle of the BMW 3 Series (E90). The chassis design of the selected vehicle is representative of other variants within the BMW E90 series. Therefore, the BMW 330d (E90) was considered an appropriate reference platform for the comparative analysis of suspension components. The technical specifications of the rear axle coil spring sets used in the experimental investigation are presented in Table 1.

The maximum permissible testing load is 10,000 N, enabling the evaluation of both conventional and high-stiffness coil springs. The testing system is equipped with a reinforced adjustable crosshead that provides secure and reliable positioning of the test specimen throughout the experiment. In addition, the adjustable compression stroke, ranging from 0 to 300 mm, allows the testing of coil springs with a wide variety of geometric dimensions and mechanical characteristics.

Table 1

Characteristics of the Coil Springs

Length	336 mm	331 mm
Outer diameter	104 mm	99 mm
Wire diameter	14 mm	14 mm
Spring type	Coil spring **(S1)**	Coil spring **(S2)**

Source: prepared by the authors

At the beginning of each test, the testing system was automatically positioned at its initial reference state, where the applied load was approximately zero and the spring displacement was 0 mm. This position served as the reference point for the entire measurement procedure. Spring compression was performed at a constant speed using an electromechanical drive system. During the test, load and displacement sensors continuously recorded changes in the applied force and spring deformation in real time. The primary measured parameters included displacement (mm), applied force (*N*), and the instantaneous spring stiffness (*N/mm*), which was calculated from the force-to-deformation ratio over a specified measurement interval.

All measurements were carried out under identical testing conditions to minimise the influence of experimental errors. The compression test for each spring was repeated three times, and the final results were obtained by averaging the measured values. This approach reduced the effect of random measurement errors and improved the reliability and repeatability of the experimental results.

To ensure the reliability and repeatability of the experimental results, the compression test for each coil spring was repeated three times under identical testing conditions. Between consecutive tests, each spring was completely unloaded, and the testing system was returned to its initial reference position. The final force, displacement, and spring stiffness values were calculated as the arithmetic mean of the three repeated measurements. This procedure reduced the influence of random measurement errors and improved the reliability and repeatability of the experimental data. Experimental data are presented as the mean ± standard deviation (SD) of three independent measurements. Statistical analysis was performed to assess the repeatability of the measurements and to minimise the influence of random experimental errors. All measurement data were automatically recorded by the Spring Tester Daily software and exported to Microsoft Excel for further analysis. The experimental results were subsequently processed graphically and used for the comparative analysis of the mechanical characteristics of the tested coil springs.

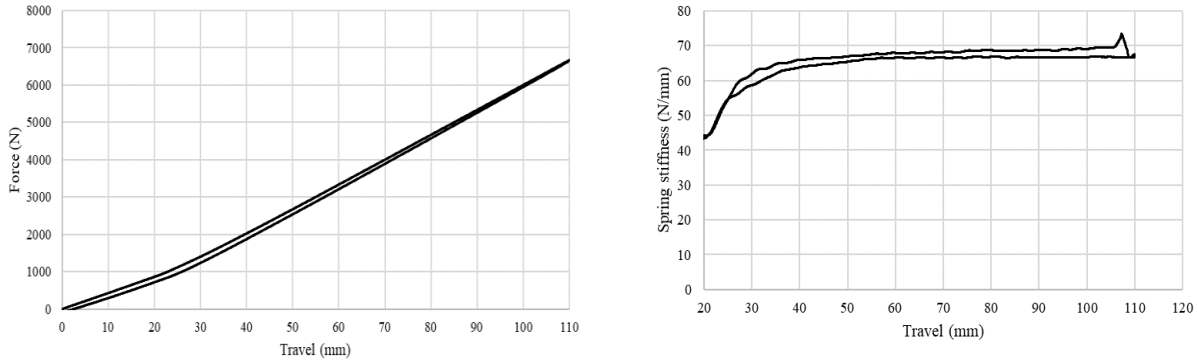
Results and Discussion

The obtained force–displacement curves enable the evaluation of differences in the mechanical properties of coil springs belonging to the same product set. In the first stage of the experimental investigation, the force–displacement characteristics of the rear axle coil springs manufactured by (S1) were analysed. Figure 1a presents the force–displacement characteristics of the rear axle coil spring set (S1). The experimental results indicate that the force–displacement relationships of both springs are approximately linear, confirming that the springs operate predominantly within the elastic deformation region. Nevertheless, noticeable differences between the two curves can be observed. Throughout the entire deformation range, one spring required a higher compressive force to achieve the same displacement, indicating a greater stiffness. These differences became more pronounced with increasing deformation. At a displacement of 100 mm, the compressive force of one spring reached approximately 6,000 N, whereas the corresponding value for the other spring was approximately 6,300 N, representing a difference of about 5%. This finding indicates that the two springs do not possess identical stiffness characteristics. The repeatability of the measurements confirmed the reliability of the obtained characteristics.

The observed differences may be attributed to manufacturing tolerances, variations in material properties, or inconsistencies in the heat-treatment process during production. Furthermore, the different slopes of the force–displacement curves indicate variations in the spring stiffness coefficient, which directly influences the overall stiffness of the suspension system and consequently affects vehicle ride comfort. Although the observed differences are relatively small, they may influence suspension performance. Under operating conditions, such variations may result in an uneven distribution of loads across the rear axle, thereby affecting vehicle stability.

The variation in spring stiffness as a function of deformation was subsequently analysed for the (S1) rear axle coil springs. Based on the measured force–displacement data, the instantaneous stiffness characteristics were determined to evaluate changes in the mechanical behaviour throughout the entire compression stroke. Figure 1b illustrates the stiffness–deformation relationships for the two springs belonging to the same product set. The results demonstrate that the stiffness of both springs increases with

increasing deformation, indicating non-linear elastic behaviour and a gradual deviation from the ideal linear response predicted by Hooke's law over the full compression range.

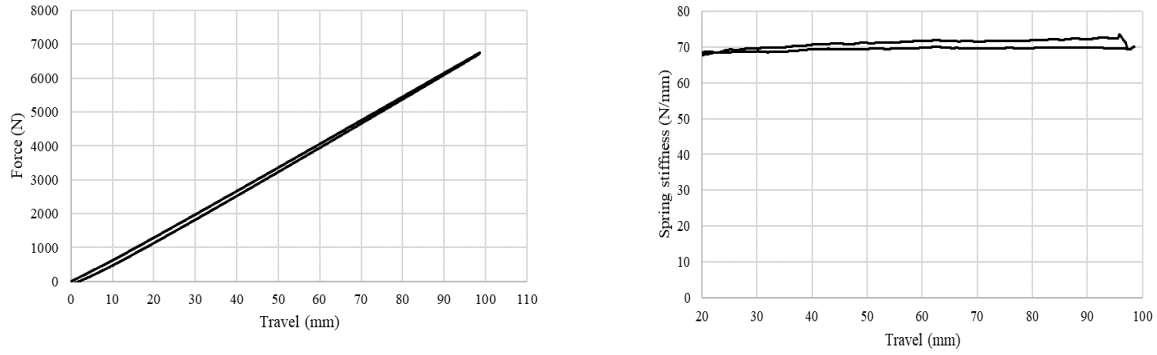


a b

Fig. 1. Mechanical response of the (S1) rear axle coil springs: (a) force–displacement characteristics; (b) spring stiffness versus compression stroke
Source: prepared by the authors

Within the initial and intermediate stages of compression (approximately 20–80 mm), the stiffness curves remain nearly linear, allowing this region to be considered representative of the nominal spring stiffness. However, systematic differences between the two springs are evident, with one spring consistently exhibiting higher stiffness throughout the entire deformation range. At a compression stroke of 80 mm, the stiffness of one spring reached approximately 72 N/mm, whereas the corresponding value for the other spring was approximately 69 N/mm, representing a difference of approximately 4–5%. These findings confirm that measurable variations in the mechanical properties exist even between coil springs belonging to the same product set.

Figure 2a presents the force–displacement characteristics of two rear axle coil springs (S2). Both curves exhibit an approximately linear relationship, indicating that the springs operate within the elastic deformation region and maintain stable mechanical behaviour throughout the investigated compression range. Despite the overall similarity of the force–displacement characteristics, measurable differences between the two springs were observed. One of the curves remains consistently above the other throughout the entire deformation range, indicating a higher spring stiffness. Consequently, a greater compressive force is required for this spring to achieve the same displacement. These differences become increasingly pronounced as deformation increases. At a displacement of 100 mm, one spring generated a compressive force of approximately 7,600 N, whereas the corresponding value for the second spring was approximately 7,200 N, representing a difference of approximately 5–6%. These results indicate that the mechanical characteristics of coil springs belonging to the same product set are not identical.



a b

Fig. 2. Mechanical response of the (S2) rear axle coil springs: (a) force–displacement characteristics; (b) spring stiffness versus compression stroke
Source: prepared by the authors

Compared with the (S1) spring set, the larger differences observed in the (S2) Technology springs suggest a lower degree of manufacturing uniformity. Such variations may influence suspension performance,

particularly under dynamic loading conditions, resulting in uneven load distribution between the wheels and consequently affecting vehicle stability and ride comfort.

Figure 2b presents the instantaneous stiffness characteristics of the two (S2) coil springs, allowing the stability of their mechanical properties to be evaluated throughout the entire deformation range. As shown in the figure, the spring stiffness coefficient remained relatively constant over most of the compression stroke, varying between approximately 68 and 74 N/mm. It can be concluded that the springs operate predominantly within the near-linear elastic region, exhibiting a relatively stable mechanical response throughout most of the compression range. Nevertheless, measurable differences between the two springs were observed during the experimental investigation. The stiffness of one spring varied between approximately 69 and 74 N/mm, whereas that of the other ranged from 68 to 72 N/mm, indicating a non-uniform distribution of stiffness within the spring set.

A distinct increase in stiffness was observed during the tests. At a compression stroke of approximately 100–105 mm, the stiffness coefficient of one spring increased to approximately 84 N/mm. This behaviour may be attributed to non-linear deformation effects occurring at higher compression levels. Such localised increases in stiffness warrant further investigation to identify their underlying causes. In contrast, the second spring exhibited a more uniform stiffness profile throughout the entire compression range, without any pronounced stiffness peaks. This behaviour indicates a more stable mechanical response and suggests greater consistency in the spring's operational performance.

A comparative analysis of the mechanical characteristics of the (S1) and (S2) coil spring sets revealed significant differences both between the two manufacturers and between individual springs within the same product set. The analysis of the force–displacement characteristics demonstrated that the springs produced by both manufacturers operated within the elastic deformation region, exhibiting nearly linear force–displacement relationships throughout the investigated compression range. However, the (S2) spring set exhibited greater variability between individual springs than the (S1) set. At a displacement of 100 mm, the difference in compressive force between the springs in the (S2) set was approximately 5–6%, whereas the corresponding difference for the (S1) set was approximately 4–5%.

The analysis of the instantaneous stiffness characteristics further highlighted these differences. The (S1) springs exhibited a more uniform variation in stiffness, with values ranging from approximately 68 to 72 N/mm, indicating a more stable mechanical response. In contrast, the stiffness of the (S2) springs varied over a wider range, from approximately 69 to 74 N/mm, and one spring exhibited a localised increase in stiffness to approximately 84 N/mm. Such behaviour may influence suspension performance, particularly under dynamic loading conditions where the springs operate at higher levels of deformation.

Overall, the results indicate that the (S1) spring set demonstrates greater manufacturing uniformity and more consistent mechanical properties than the (S2) spring set, which exhibited larger variations in stiffness and localised non-linear effects. These findings suggest that coil springs produced by different manufacturers may differ significantly in terms of the consistency and stability of their mechanical performance, potentially affecting the operational characteristics of the vehicle suspension system. The observed differences may be attributed to manufacturing tolerances and material variability. Although relatively small, these deviations may contribute to uneven load distribution under dynamic operating conditions.

Conclusions

1. The experimental results demonstrated that the force–displacement characteristics of all tested coil springs were approximately linear, indicating that the springs operated predominantly within the elastic deformation region.
2. The analysis of the instantaneous stiffness characteristics showed that the spring stiffness coefficient remained relatively constant throughout most of the compression stroke. However, slight deviations were observed at higher levels of deformation, indicating the presence of non-linear deformation effects.
3. The comparison of coil springs belonging to the same product set revealed measurable differences in stiffness, ranging from approximately 4% to 6%. These variations indicate the influence of manufacturing tolerances and demonstrate that the mechanical properties of nominally identical components are not entirely uniform.
4. The obtained results suggest that even relatively small differences in spring stiffness may lead to uneven load distribution on the rear axle, potentially affecting vehicle stability and ride comfort under operating conditions.

References

1. Aboazoum, Ahmed. "An overview of the most common vehicle suspension problems." Brilliance: Research of Artificial Intelligence 2.3 (2022): 120-124.
2. Han, S. Y., & Liang, T. (2022). Reinforcement-learning-based vibration control for a vehicle semi-active suspension system via the PPO approach. Applied Sciences, 12(6), 3078.
3. Imoro, I., Nkrumah, J. K., Ziblim, B., & Mohammed, A. H. (2023). Analysis of the material properties of vehicle suspension coil spring. World Journal of Engineering and Technology, 11(04), 827-858.
4. Kobelev, V. (2024). Fundamentals of Springs Mechanics. Springer.
5. Mahanthi, D. L., & Murali, C. V. S. (2017). Design and analysis of composite Leaf Spring for light Weight Vehicle. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 4(3), 237088.
6. Partheeban, N., & Ibrahim, M. N. (2025). Investigation on the Effects of Different Coil Spring Materials on Vehicle Ride Comfort and Handling. Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering, 6(1), 306-311.
7. Pridie, A. C., & Antonya, C. (2021). The theoretical study of an interconnected suspension system for a formula student car. Applied Sciences, 11(12), 5507.
8. Yu, M., Evangelou, S. A., & Dini, D. (2024). Advances in active suspension systems for road vehicles. Engineering, 33, 160-177.

GALINĖS PAKABOS SPYRUOKLĖS STANDUMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Santrauka

Automobilio pakabos sistema yra viena svarbiausių automobilio sistemų, kurią sudaro elastingi elementai, amortizatoriai, apsauginiai komponentai ir jungtys tarp automobilio kėbulo ir ratų. Pakabos komponentų matmenų projektavimas, pažangių technologijų taikymas ir tinkamas pakabos elementų geometrinis išdėstymas bei integravimas važiuoklėje daro didelę įtaką automobilio saugumui ir važiavimo komfortui. Pagrindinė pakabos sistemos funkcija – sugerti kelio sukeltus smūgius ir sumažinti juos iki nedidelių vibracijų, perduodamų automobilio kėbului.

Šiame tyrime pateikiamas eksperimentinis spyruoklių suspaudimo charakteristikų tyrimas, siekiant įvertinti jų standumą apkrovos sąlygomis. Eksperimentai buvo atlikti siekiant nustatyti gamybos skirtumus ir mechaninius skirtumus tarp to paties gamintojo ir gaminio modelio spyruoklių. Bandymai buvo atlikti naudojant „LABA7 Spring Rate Tester Daily“ – specialią bandymų sistemą, skirtą automobilių pakabos spyruoklių mechaninėms savybėms gniuždymo apkrovos metu nustatyti. Bandymo procedūra leidžia nuolat matuoti apkrovą ir deformaciją, o tai leidžia konstruoti jėgos ir poslinkio charakteristikas.

Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad to paties gamintojo ir gaminio modelio spyruoklės neparodo identiškų poslinkio reakcijų esant lygiavertėms apkrovos sąlygoms. Viso suspaudimo proceso metu buvo pastebėti standumo koeficiento skirtumai, kurie tapo ryškesni didėjant suspaudimo eigai. Rezultatai rodo, kad net ir santykinai nedideli spyruoklių standumo skirtumai gali lemti netolygų apkrovos pasiskirstymą galinėje ašyje, o tai gali neigiamai paveikti transporto priemonės stabilumą ir važiavimo komfortą. Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad to paties gaminių rinkinio spyruoklių standumo nuokrypiai svyruoja nuo maždaug 4 % iki 6 %.

Raktiniai žodžiai: spyruoklė, standumas, jėga, poslinkis

FORMATION AND TRANSFORMATION OF AUSTENITE AND THE ELIMINATION OF RETAINED AUSTENITE

Artis Iesmins, Viktors Gutakovskis, Aleksandrs Okunevs
Riga Technical College, Latvia

Abstract

Steel plays a fundamental and irreplaceable role in modern industrial manufacturing, construction, transportation, and materials engineering due to its favorable combination of mechanical strength, formability, durability, and cost efficiency. The performance and reliability of steel products are largely determined by their microstructural evolution during processing, among which the formation, transformation, and stabilization of austenite are of particular importance. Austenite, a face-centered cubic phase of iron, serves as a key intermediate phase during thermal and thermomechanical treatments and strongly influences subsequent phase transformations, such as the formation of ferrite, pearlite, bainite, or martensite. During steel processing operations—including casting, hot and cold working, heat treatment, and surface modification—the controlled formation and decomposition of austenite directly affect manufacturing efficiency, dimensional stability, and energy consumption. Precise regulation of austenite grain size, chemical homogeneity, and transformation kinetics enables optimization of production routes and contributes to improved consistency and quality of final products. In advanced high-strength steels and tool steels, the stability of austenite is intentionally manipulated to enhance strength, toughness, wear resistance, and fatigue performance. Austenite is not only present in structural and engineering steel products but also plays a critical role in the manufacturing and performance of metalworking tools, where its behavior influences hardness, edge stability, and service life. Represented review is the part of the educational content.

Key words: steel, austenite, martensitic, formation

Introduction

In most cases, the first process during the heat treatment of steel is the formation of austenite. When steel components with a sufficiently large cross-section are heated slowly, raising the temperature by 30–50 °C above the critical point ensures the formation of a homogeneous austenitic structure. In this case, the heating rate is an important factor, as it provides sufficient time for diffusion processes and prevents distortion.

In modern technologies, high-speed heating methods are widely used, particularly induction heating. Under such conditions, the rate and duration of phase transformations become decisive. Therefore, understanding the mechanism and kinetics of austenite formation is essential for controlling the properties of steel. The template uses the correct page formatting and contains all the necessary styles. The styles are summarized in Table 1. At the same time - Table 1 - alongside with Table 2 in Materials and methods section show examples of tabular data formatting.

Formation of Austenite

It should be emphasized that the transformations shown in equilibrium (phase) diagrams occur only under ideal conditions of extremely slow heating. Under practical conditions, the nature of these transformations differs significantly.

At high heating rates, it is possible for an austenite–carbide structure to persist even in cases where a homogeneous austenite should theoretically form. Moreover, different heating temperatures above the critical range produce austenite with different properties, which affects the subsequent cooling process.

The formation of austenite is a diffusion-controlled process that develops over time. Therefore, changes in the temperature–time regime directly influence the structure and composition of austenite.

Mechanism of Austenite Formation

Microscopic studies show that austenite forms by nucleation and growth of grains within the volume of the initial structure. This process begins at the interfaces between the ferrite and carbide phases.

Carbide particles gradually dissolve into the austenite, supplying carbon to the newly formed phase. Ferrite itself cannot transform into austenite without a sufficient carbon concentration.

The formation of austenite nuclei occurs only at locations where the carbon concentration reaches a critical level. This concentration arises as a result of the diffusion of carbon atoms within microvolumes.

Thus, the formation of austenite is closely linked to carbon distribution and diffusion processes in steel.

Kinetics of Austenite Formation

The transformation rate depends strongly on temperature. At lower temperatures the process proceeds slowly, whereas at higher temperatures it occurs very rapidly.

For example, at approximately 730 °C the transformation may begin after several tens of seconds, while at 800 °C it occurs almost instantaneously. At even higher temperatures, austenite forms virtually immediately.

Increasing the carbon content of steel accelerates austenite formation. This is associated with an increase in the amount of carbides and a larger interfacial area between phases.

Alloying elements influence this process in different ways. Carbide-forming elements, such as chromium, can slow down austenite formation because their carbides dissolve more slowly [1,2].

Carbide Dissolution and Austenite Homogenization

The process of austenite formation includes three successive stages:
formation of austenite,
dissolution of carbides,
homogenization of austenite.

Carbide dissolution is a diffusion process during which carbon spreads throughout the austenite. As a result, a non-uniform carbon distribution is initially formed.

Subsequent homogenization ensures a uniform distribution of carbon throughout the entire volume of austenite. This stage is particularly important for achieving uniform material properties after quenching.

Effect of Heating Rate

The heating rate significantly affects the temperature range of austenite formation. As the heating rate increases, the transformation temperatures shift to higher values.

During rapid heating, diffusion processes do not have sufficient time to proceed fully, and therefore the austenite may be inhomogeneous. This means that the carbon concentration may vary from one region to another.

Consequently, to obtain homogeneous austenite under rapid heating conditions, higher temperatures are required than in the case of slow heating.

Austenite Grain Size

The grain size of austenite has a significant effect on the properties of steel. Initial, actual, and inherited grain sizes are distinguished.

The initial grain size forms immediately after the appearance of austenite. It depends on the ratio between the rates of nucleation and grain growth.

As temperature increases, the nucleation rate rises more rapidly than the grain growth rate, resulting in finer grains.

However, prolonged holding at high temperature causes grain coarsening. Coarse-grained austenite deteriorates mechanical properties.

Transformation of Austenite During Cooling

During cooling, austenite can transform into various structures:
pearlite,
bainite,
martensite.

The type of transformation depends on the cooling rate. Slow cooling promotes the formation of pearlite, whereas rapid cooling leads to martensite formation.

Martensite forms without diffusion and is associated with a rearrangement of the crystal lattice. Bainite formation involves both diffusion-controlled and diffusionless mechanisms.

Microstructure of 20CrMn4 steel after different step-quenching variants using scanning electron microscopy is represented on the pictures below.

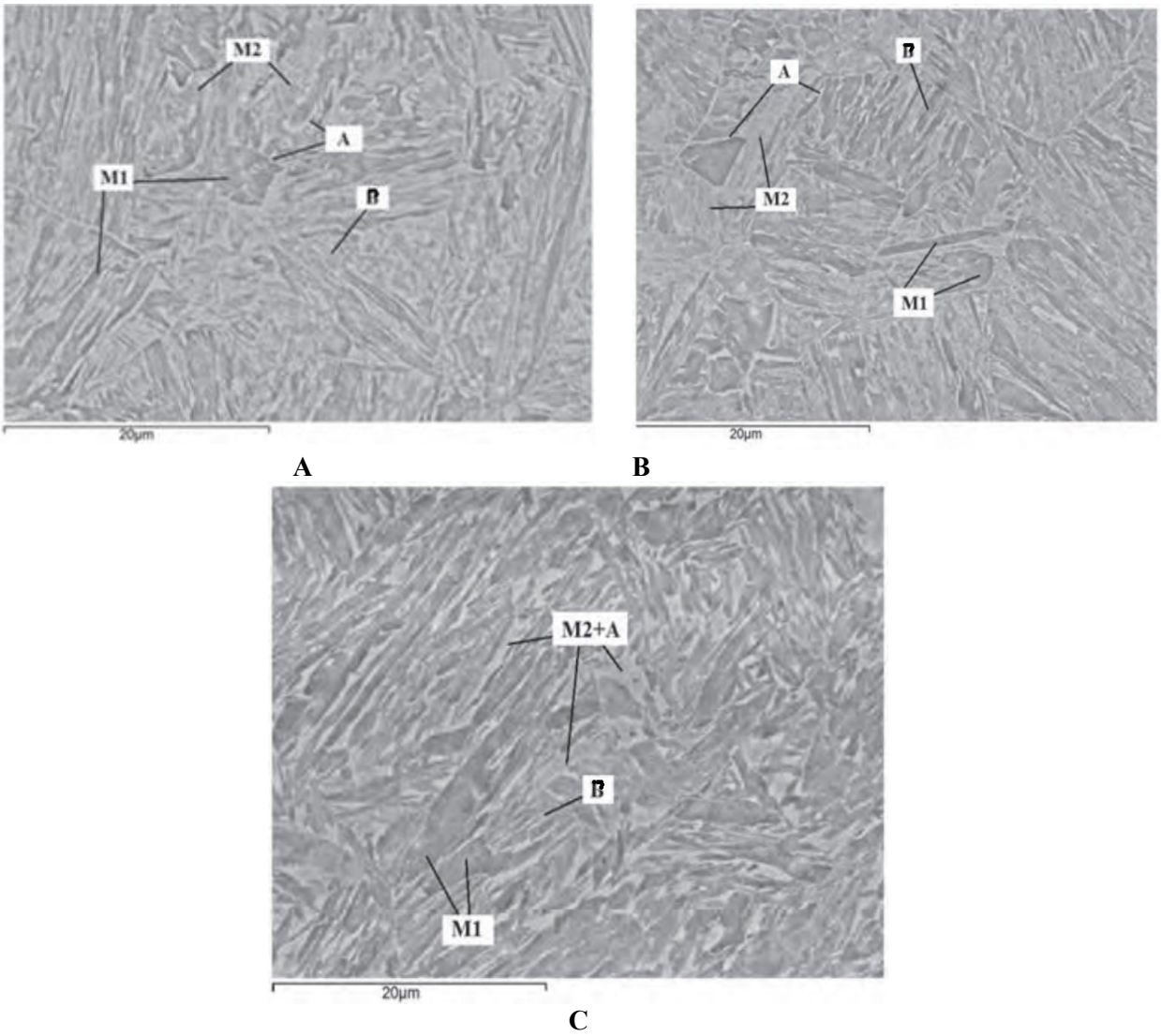


Fig.1. A.B and C. Microstructure of 20CrMn4 steel after different step-quenching variants (scanning electron microscopy): (M1 – primary martensite; B – bainite; M2 – secondary martensite; A – retained austenite)

Retained Austenite and Its Formation

Not all of the austenite phase transforms into martensite. Part of the austenite may remain as retained austenite.

This occurs when austenite is enriched with carbon and the martensitic transformation temperature is reduced below room temperature. Retained austenite can be both beneficial and detrimental.

On the one hand, it improves plasticity and impact toughness. On the other hand, it reduces hardness and dimensional stability.

Experimental Studies

The investigations used 20Kh2G2SNMA steel with a complex chemical composition. The specimens were obtained after melting and hot rolling, followed by normalizing and tempering.

Dilatometric studies were carried out to analyze the transformation of undercooled austenite. The specimens were heated to the austenitizing temperature and then cooled under controlled conditions.

The results showed that primary martensite, bainite, and secondary martensite form during cooling. The nature of the transformations depends strongly on the heat-treatment regime.

Effect of Step Quenching

In the case of single-step quenching, incomplete stabilization of austenite is observed. This leads to the formation of secondary martensite during cooling.

Two-step quenching provides more intensive carbon diffusion and a more uniform distribution within the austenite. As a result, the formation of secondary martensite is reduced.

In addition, two-step treatment increases the amount of stabilized austenite, indicating more effective austenite stabilization.

Importance of Carbon Diffusion

Carbon diffusion is the main factor determining austenite stability. Higher temperatures promote more intensive carbon redistribution.

During two-step treatment, austenite becomes more enriched with carbon, which lowers the martensitic transformation temperature. As a result, more austenite remains untransformed.

The diffusion of alloying elements is much slower than that of carbon, which contributes to structural inhomogeneity.

Elimination of Retained Austenite

The amount of retained austenite can be reduced using various methods. One of the most effective methods is step quenching.

Cryogenic (subzero) treatment is another method that promotes the transformation of retained austenite into martensite. In this process, the material is cooled to low temperatures.

Tempering helps stabilize the structure and reduce internal stresses. The correct selection of the heat-treatment regime is crucial [3,4].

Conclusions

Austenite formation is a complex diffusion-controlled process consisting of several stages. Its progress is influenced by temperature, time, carbon content, and alloying elements.

The transformation of austenite during cooling determines the final structure and properties of steel. Incomplete transformation leads to the formation of retained austenite.

The amount of retained austenite can be controlled by using optimal heat-treatment regimes. Two-step quenching and cryogenic treatment are effective methods for its reduction.

Thus, controlling austenite formation and transformation is essential for producing high-quality steel.

References

1. Ogawa, T., “Ferrite recrystallization and austenite formation at the early stage of annealing in cold-rolled low-carbon steels”, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (2015)
2. Holzweissig, M. J. et al. “A Comparative Analysis of Austenite-to-Martensite and Austenite-to-Bainite Phase Transformation Kinetics in Steels”, Materials Research Letters (2013)
3. Voothaluru, R. et al. “In-situ Neutron Diffraction… Stability of Retained Austenite in Bearing Steels”, Scientific research (2018)
4. “Deconstructing the Retained Austenite Stability: A Comparative Study…”, Metallurgical and Materials Transactions A (2024)

Author contributions:

Conceptualization, V.G.; methodology, A.I.; formal analysis, A.O.; investigation, A.I., writing—original draft preparation, A.I.; writing—review and editing, A.O. and V.G.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

PLGA NANOPLUOŠTŲ, PAGAMINTŲ ELEKTROVERPIMO METODU, PORĖTUMO VERTINIMAS TAIKANT SEM VAIZDŲ ANALIZĘ IR SKYSČIO IŠSTŪMIMO METODĄ

Andžela Šešok
Vilniustech

Anotacija

Audinių inžinerijoje elektroverpimo būdu suformuoti poli(laktido-ko-glikolido) (PLGA) nanopluoštiniai karkasai yra plačiai naudojami kaip trimatės struktūros, imituojančios ekstraląstelinę matricą. Šiuose taikymuose porėtumas yra vienas svarbiausių parametrų, lemiantis ląstelių infiltraciją ir maistinių medžiagų difuziją. Šio darbo tikslas – įvertinti ir palyginti PLGA nanopluoštinių karkasų porėtumą, taikant skaitmeninę SEM vaizdų analizę ir gravimetrinį skysčio išstūmimo metodą. Eksperimentams 13 % (m/t) PLGA tirpalas buvo paruoštas dichlormetano (DCM) ir dimetilformamido (DMF) mišinyje (25:10,5 v/v). Elektroverpimas buvo vykdomas taikant 18 kV įtampą bei 17 cm atstumą iki kolektoriaus. Gauti rezultatai parodė, kad SEM vaizdų analizė, naudojant ImageJ programinę įrangą (išanalizavus po 5 vaizdus kiekvienam mėginiui), nustatė 45,3 ± 1,4 % paviršiaus porėtumą, o skysčio išstūmimo metodas su etanoliu parodė didesnį tūrinį porėtumą – 53,2 ± 12,2 %. Stebimas rezultatų skirtumas paaiškinamas metodų ypatumais: SEM analizė apsiriboja dvimačiu paviršiaus vertinimu, o etanolis efektyviai prasiskverbia per visą trimatį karkaso tūrį. Darbe daroma išvada, kad nustatytas apie 53 % tūrinis porėtumas yra palankus audinių inžinerijos taikymams, o nanopluošto karkasams tiksliau apibūdinti rekomenduojama taikyti abu metodus kaip vienas kitą papildančius.

Reikšminiai žodžiai. Elektroverpimas, PLGA nanopluoštai, porėtumas, SEM vaizdų analizė, skysčio išstūmimo metodas, audinių inžinerija

Įvadas

Nanopluoštai yra itin ploni pluoštai, kurių skersmuo paprastai siekia nuo kelių nanometrų iki kelių mikrometrų (Bayat ir kt., 2022). Dėl didelio paviršiaus ir tūrio santykio, didelio porėtumo bei galimybės kontroliuoti jų struktūrą nanopluoštai plačiai taikomi filtravimo technologijose, vaistų pristatymo sistemose, jutikliuose ir audinių inžinerijoje (Cai ir kt., 2012). Vienas perspektyviausių nanopluoštų gamybos metodų yra elektroverpimas (angl. *electrospinning*), kurio metu polimerinis tirpalas veikiamas stipriu elektriniu lauku ir formuojami ištisiniai mikro- bei nanometrinio skersmens pluoštai (Rahmati, 2021). Šis metodas leidžia gauti porėtas neaustines struktūras, kurių morfologija gali būti tiksliai reguliuojama keičiant proceso parametrus.

Nanopluoštai gali būti gaminami iš natūralių arba sintetinių polimerų. Natūralūs polimerai, tokie kaip chitozanas, alginatas, kolagenas, fibrinogenas, želatina ir hialurono rūgštis, pasižymi geru biosuderinamumu ir biodegradacija, todėl plačiai taikomi audinių inžinerijoje. Tuo tarpu sintetiniai polimerai, tokie kaip polikaprolaktonas (PCL), poliglikolio rūgštis (PGA), polietileno tereftalatas (PET) ir polilaktido rūgštis (PLA), yra sukurti siekiant užtikrinti kontroliuojamas mechanines ir degradacijos savybes, todėl plačiai naudojami medicininiuose įrenginiuose, vaistų pristatymo sistemose ir audinių inžinerijoje (Flores-Rojas ir kt. 2023; Rim,, 2013; Reneker, 2008). Poli(laktido-ko-glikolido) (PLGA) yra biologiškai suderinamas ir biologiškai skaidus kopolimeras, plačiai naudojamas biomedicinos srityje (McLaughlin ir kt., 2022). Dėl reguliuojamo degradacijos greičio, tinkamų mechaninių savybių ir saugių skilimo produktų PLGA nanopluoštai dažnai naudojami audinių inžinerijoje kaip trimačiai karkasai, imituojantys natūralią ekstraląstelinę matricą. Tokiose sistemose viena svarbiausių charakteristikų yra porėtumas, kuris lemia ląstelių infiltraciją, maistinių medžiagų ir deguonies difuziją bei metabolitų pašalinimą. Todėl tikslus porėtumo įvertinimas yra būtinas siekiant prognozuoti karkasų tinkamumą audinių regeneracijai.

Porėtumo nustatymui taikomi įvairūs eksperimentiniai metodai (Lopez Marquez ir kt., 2022). Vienas dažniausiai naudojamų metodų yra skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) vaizdų analizė, leidžianti įvertinti paviršiaus porėtumą remiantis pluoštų ir porų santykiu mikrografijose. Šio metodo privalumai yra paprastumas, santykinai nedidelės sąnaudos ir galimybė vienu metu analizuoti medžiagos morfologiją bei pluoštų skersmenį. Tačiau SEM analizė pateikia tik dvimatę informaciją apie paviršių ir neleidžia tiesiogiai įvertinti viso medžiagos tūrio porėtumo (Lopez Marquez ir kt., 2022; Rnjak-Kovacina ir kt., 2011).

Tūrinio porėtumo nustatymui dažnai naudojami skysčio išstūmimo, gyvsidabrio porosimetrijos, dujų adsorbcijos bei mikrokompiuterinės tomografijos metodai. Gyvsidabrio porosimetrija leidžia nustatyti porų dydžio pasiskirstymą ir bendrą porėtumą plačiame matavimo diapazone, tačiau reikalauja brangios įrangos ir gali pažeisti jautrias nanopluoštines struktūras dėl aukšto slėgio poveikio. Dujų adsorbcijos metodai, pagrįsti Brunauerio-Emmetto-Tellerio (BET) teorija, yra tinkami specifiniam paviršiaus plotui ir smulkioms poroms vertinti, tačiau jų taikymas makroporėtoms nanopluoštinėms medžiagoms yra ribotas. Mikrokompiuterinė tomografija (μCT) suteikia galimybę rekonstruoti trimatę struktūrą ir įvertinti porėtumą

neardant mėginio, tačiau dėl didelių kaštų ir ribotos skiriamosios gebos ji ne visada tinkama nanometrinio mastelio struktūroms (Lopez Marquez ir kt., 2022).

Dėl šių priežasčių elektroverptų nanopluoštinių karkasų tyrimuose dažniausiai derinama SEM vaizdų analizė ir skysčio išstūmimo metodas. Pirmasis leidžia įvertinti paviršiaus porėtumą ir morfologines savybes, o antrasis suteikia informaciją apie viso karkaso tūrinį porėtumą. Kadangi šie metodai remiasi skirtingais matavimo principais, jų rezultatų palyginimas yra svarbus siekiant tiksliai charakterizuoti nanopluoštines struktūras ir įvertinti jų tinkamumą audinių inžinerijos taikymams.

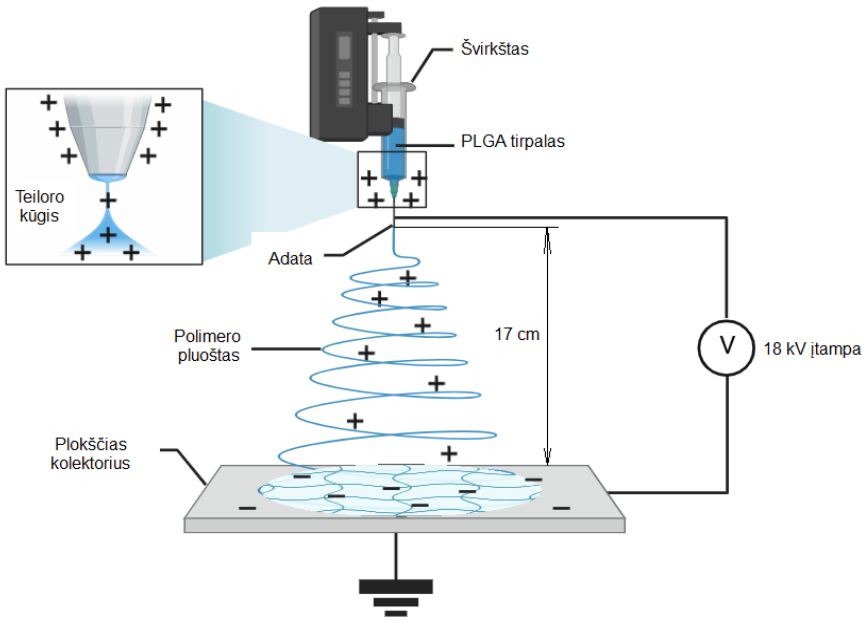
Šio darbo tikslas – įvertinti elektroverpimo būdu pagamintų PLGA nanopluoštinių karkasų porėtumą, taikant SEM vaizdų analizę ir gravimetrinį skysčio išstūmimo metodą, bei palyginti šių metodų gautus rezultatus.

Medžiagos ir metodai

Šiame straipsnyje tiriamas elektroverpimo būdu gautų PLGA nanopluoštų porėtumas, taikant SEM vaizdų analizę ir skysčio išstūmimo metodą. Tyrimui atlikti pagaminti PLGA nanopluošto bandiniai, o jų struktūra vėliau įvertinta skirtingais porėtumo nustatymo metodais.

Tyrime naudotas PLGA kopolimeras RESOMER® (Sigma Aldrich, JAV), kurio PLA:PGA santykis buvo 82:18. Dėl didesnės PLA dalies šis kopolimeras pasižymi sumažintu hidrolizės greičiu ir geresniu struktūriniu stabilumu, lyginant su didesnį PGA kiekį turinčiais PLGA tipais. PLGA tirpinimui pasirinktas dichlormetano (DCM) ir dimetilformamido (DMF) mišinys (Sigma-Aldrich, JAV), nes DCM užtikrina gerą polimero tirpumą ir greitą tirpiklio išgaravimą elektroverpimo metu, o DMF pagerina tirpalo elektrinį laidumą bei proceso stabilumą. Toks tirpiklių derinys leidžia formuoti tolygius nanopluoštus su mažesniu morfologinių defektų kiekiu, palyginti su vieno tirpiklio sistemomis. Ruošiant tirpalą elektroverpimui, 4,6 g PLGA polimero buvo ištirpinta 35,5 ml tirpiklių mišinyje, sudarytame iš DCM ir DMF (tūrių santykis 25:10,5 v/v). Galutinė gauto tirpalo koncentracija sudarė 13 % (m/t). Siekiant užtikrinti saugumą ir visišką tirpalo homogeniškumą, maišymas buvo atliekamas traukos spintoje naudojant magnetinę maišyklę kambario temperatūroje.

Elektroverpimo procedūra buvo atlikta naudojant Bionica S.L. (Ispanija) pagamintą Spinbox elektroverpimo įrenginį. Gautas tirpalas buvo tiekiamas naudojant švirkšto pompą pastoviu srauto greičiu 1 ml/val. Atliekant elektroverpimą, buvo taikoma 18 kV įtampa ir išlaikytas pastovus 17 cm atstumas tarp adatos galiuko ir stacionaraus kolektoriaus, padengto foliją. Eksperimentinio įrenginio schema ir gamybos proceso parametrai yra pavaizduoti 1 pav.



1 pav. PLGA nanopluoštų gamybos elektroverpimo būdu schema

Šaltinis: sudaryta autorės naudojant BioRender.com

Mėginiams tirti buvo naudojama skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) kartu su energijos dispersijos rentgeno spektroskopija (EDS) (Axia™ ChemiSEM, „Thermo Fisher Scientific“, Waltham, MA, JAV). Paviršiaus porėtumas buvo nustatytas iš SEM vaizdų naudojant ImageJ programinę įrangą (ImageJ v. 1.54v, National Institutes of Health, USA) (https://imagej.net/ij/).

Tyrimui naudoti trys nepriklausomi karkaso mėginiai (n = 3). Siekiant užtikrinti statistinį patikimumą ir objektyvumą, kiekvienam mėginiui buvo analizuojami penki atsitiktinai parinkti SEM vaizdai (iš viso 15 vaizdų. Vaizdai buvo konvertuoti į dvejetainius (binary) taikant slenkstinę segmentaciją (thresholding), kur poros buvo identifikuotos kaip baltos sritys, o pluoštai – kaip juodos sritys. Paviršiaus porėtumas buvo apskaičiuotas kaip baltų pikselių ploto dalis bendrame vaizdo plote. Rezultatai pateikiami kaip vidurkis ± standartinis nuokrypis.

Tūrinis nanopluoštų porėtumas buvo nustatytas gravimetriniu skysčio išstūmimo metodu, naudojant etanolį kaip įsiskverbiantį skystį. Etanolis buvo pasirinktas dėl jo gebėjimo efektyviai drėkinti hidrofobišką PLGA nanopluoštų paviršių ir prasiskverbti į poras neištirpinant polimero. Eksperimentui naudoti 1 cm × 1 cm dydžio sausi nanopluošto mėginiai (n = 3). Visi masės matavimai buvo atlikti naudojant laboratorines analitines svarstykles ABS 220-4N (KERN & SOHN GmbH, Vokietija), kurių tikslumas ± 0,1 mg. Pirmiausia buvo nustatyta pradinė etanolio masė. Sausi mėginiai buvo pasverti prieš panardinimą, o vėliau įmirkyti etanolyje. Po impregnavimo mėginiai buvo pašalinti, o likusio etanolio masė buvo išmatuota dar kartą. Masės pokyčiai buvo perskaičiuoti į tūrius (V_1, V_2 ir V_3), naudojant etanolio tankį (0,789 g/cm³).

Mėginio porėtumas (ε) buvo apskaičiuotas pagal šią formulę (Guan ir kt., 2005):

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \cdot 100\% \quad (1)$$

čia V_1 – pradinis etanolio tūris, V_2 – tūris po mėginio panardinimo, V_3 – tūris pašalinus mėginį.

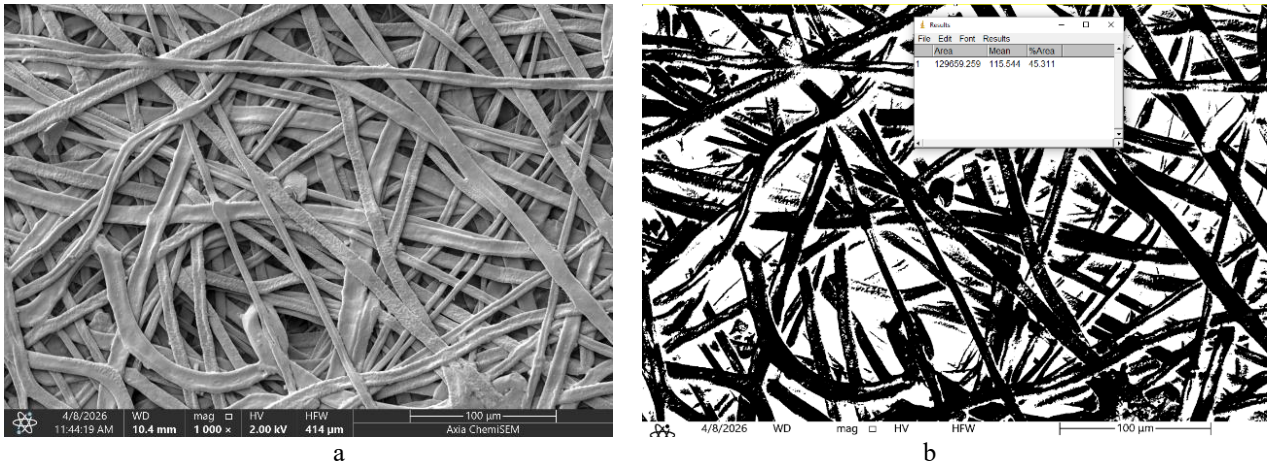
Gauti rezultatai buvo apdoroti skaičiuojant vidurkį ir standartinį nuokrypį. SEM ir skysčio išstūmimo metodų rezultatai buvo palyginti siekiant įvertinti nanopluoštų paviršinio ir tūrinio porėtumo skirtumus.

Rezultatai

Elektroverpimo būdu gautų PLGA nanopluoštų karkasų morfologija ir porėtumo parametrai buvo įvertinti lyginant SEM vaizdų analizę (ImageJ) ir skysčio išstūmimo metodą.

Išanalizavus po penkis nepriklausomus SEM vaizdus kiekvienam mėginiui, apskaičiuotas vidutinis nanopluošto sluoksnio paviršiaus porėtumas sudarė 45,3 ± 1,4 %. Nedidelis standartinis nuokrypis patvirtina tolygų pluoštų pasiskirstymą ir homogenišką (vienodą) sluoksnio struktūrą skirtingose karkaso vietose.

2 pav. pateikta PLGA SEM nuotrauka ir ImageJ programa apdorotas juodai baltas vaizdas, skirtas porėtumo analizei.



a b

2 pav. PLGA nanopluošto morfologija: a – pradinė SEM nuotrauka; b – ImageJ programa apdorotas juodai baltas vaizdas, skirtas porėtumo analizei

Šaltinis: sudaryta autorės

PLGA nanopluoštinių karkasų porėtumo vertinimo rezultatai, gauti taikant du skirtingus metodus, pateikti 1 lentelėje. Remiantis skaitmenine SEM vaizdų analize (2 pav.), suformuotų karkasų paviršiaus porėtumas siekė 45,3 ± 1,4 %. Binarizuotas vaizdas, gautas naudojant ImageJ programinę įrangą (2b pav.), leido atskirti paviršines porų zonas nuo nanopluošto matricos fono. Tuo tarpu taikant skysčio išstūmimo metodą, nustatytas tūrinis porėtumas buvo didesnis ir sudarė 53,2 ± 12,2 %. Šis rezultatų skirtumas yra moksliškai pagrįstas, kadangi SEM metodas apribotas dvimačiu (2D) paviršiaus vertinimu, o etanolis efektyviai prasiskverbia per visą trimatį (3D) karkaso tūrį ir užpildo gilumines vidines poras.

1 lentelė

PLGA nanopluoštinių karkasų porėtumo rezultatai, nustatyti skirtingais metodais

Metodas	1 mėginys (%)	2 mėginys (%)	3 mėginys (%)	Vidurkis ± Standartinis nuokrypis (%)
SEM vaizdų analizė (ImageJ)	43.7	45,9	45,7	45,3 ± 1,4
Skysčio išstūmimo metodas	50.0	66.7	42,9	53,2 ± 12,2

Šaltinis: sudaryta autorės

Didesnis skysčio išstūmimo metodo standartinis nuokrypis (12,2 %) yra sietinas su lokaliu nanopluošto karkaso storio nevienodumu, atsirandančiu nusodinimo ant stacionaraus plokščio kolektoriaus metu, bei eksperimentine paklaida rankiniu būdu pašalinant etanolio perteklių prieš svėrimą. Siekiant sumažinti šį nuokrypį ateities tyrimuose, rankinį nusausinimo etapą būtų galima pakeisti trumpu, kontroliuojamu centrifugavimu.

SEM analizė tinkama greitam paviršiaus porėtumo įvertinimui, tačiau neatskleidžia visos trimatės nanopluošto matricos struktūros. Todėl SEM ir skysčio išstūmimo metodai neturėtų būti laikomi alternatyviais, o veikiau vienas kitą papildantys porėtumo vertinimo būdai, leidžiantys visapusiškai įvertinti elektroverpimo būdu gautų nanopluoštų struktūrą. Šis metodų palyginimas yra ypač svarbus biomedicinos taikymuose, kur tiek paviršinė, tiek tūrinė porinė struktūra lemia ląstelių sąveiką su medžiaga.

Audinių inžinerijos požiūriu, gautas apie 53 % tūrinis porėtumas yra palankus ekstraląstelinės matricos imitavimui, nes užtikrina pakankamą erdvę maistinių medžiagų difuzijai ir ląstelių infiltracijai. Šie duomenys gerai koreliuoja su literatūroje aprašomais analogiškų elektroverptų karkasų porėtumo intervalais, kurie dažniausiai siekia apie 40–90 % ir yra laikomi tinkamais ekstraląstelinės matricos imitavimui audinių inžinerijoje (Flores-Rojas ir kt. 2023; Rnjak-Kovacina ir kt., 2011). Vis dėlto ateities tyrimuose, siekiant dar geresnio ląstelių vaskuliarizacijos potencialo, elektroverpimo parametrus (pavyzdžiui, polimero koncentraciją ar tirpiklių santykį) būtų galima modifikuoti siekiant didesnio porų dydžio.

Išvados

1. Atlikus elektroverpimo būdu suformuotų PLGA nanopluoštinių karkasų struktūrinę analizę, nustatyta, kad skaitmeninė SEM vaizdų analizė rodo 45,3 ± 1,4 % paviršiaus porėtumą, o gravimetrinis skysčio išstūmimo metodas – 53,2 ± 12,2 % tūrinį porėtumą. Nustatytas rezultatų skirtumas siejamas su metodų skirtingu matavimo principu (2D paviršiaus ir 3D tūrinės struktūros vertinimu).
2. Siekiant tiksliai įvertinti audinių inžinerijai skirtų PLGA karkasų porėtą struktūrą, rekomenduojama derinti SEM vaizdų analizę ir skysčio išstūmimo metodą, nes jų kombinacija leidžia kompleksiškai įvertinti tiek paviršiaus morfologiją, tiek realų trimatį porėtumą.

Literatūra

1. Bayat, F.; Mehryab, F.; Akhlaghi, S.; & Haeri, A. Nanostructured drug delivery approaches for fungal infections. Emerging Nanomaterials and Nano-based Drug Delivery Approaches to Combat Antimicrobial Resistance, 2022. 179–232. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90792-7.00006-3
2. Cai, Y.; Wei, Q.; & Huang, F. Processing of composite functional nanofibers. Functional Nanofibers and their Applications, 2012. 38–54. https://doi.org/10.1533/9780857095640.1.38
3. Guan J.; Fujimoto K.; Sacks M.S.; Wagne W. R.Preparation and characterization of highly porous, biodegradable polyurethane scaffolds for soft tissue applications. Biomaterials. 2005 June; 26(18): 3961–3971. doi:10.1016/j.biomaterials.2004.10.018.
4. Flores-Rojas G. G.; Gómez-Lazaro B.; López-Saucedo F.; Vera-Graziano R.; Bucio E.; Mendizábal E. Electrospun Scaffolds for Tissue Engineering: A Review. Macromol 2023. 3, 524–553. https://doi.org/10.3390/macromol3030031
5. Lopez Marquez A.; Gareis I. E.; Dias F. J.; Gerhard C.; Lezcano M. F. Methods to Characterize Electrospun Scaffold Morphology: A Critical Review. Polymers 2022. 14, 467. https://doi.org/10.3390/polym14030467
6. McLaughlin A. W.; McDowell A.; Clarkson A. N.; Walker G. F. Characterization of poly(lactic-co-glycolic acid) nanofibers electrospun using asustainable green chemistry with a low toxicity solvent system. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, Volume 71, 2022. Issue 13, https://doi.org/10.1080/00914037.2021.1933976
7. Rim, N. G.; Shin, C.S.; Shin, H. Current Approaches to Electrospun Nanofibers for Tissue Engineering, Biomedical Materials, 2013. 8(1): 1–14.
8. Reneker D.H.; Yarin A.L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. Polymer. 2008;49:2387–2425. doi: 10.1016/j.polymer.2008.02.002
9. Rahmati M.; Mills D.K.; Urbanska A. M.; Saeb M.; R. Reddy J. Ramakrishna V.; S., Mozafari M. Electrospinning for tissue engineering applications. Progress in Materials Science, Vol 117, 2021. 100721

10. Rnjak-Kovacina, J.; Wise, S.G.; Li, Z.; Maitz, P.K.M.; Young, C.J.; Wang, Y.; Weiss, A.S. Tailoring the porosity and pore size of electrospun synthetic human elastin scaffolds for dermal tissue engineering. Biomaterials 2011. 32, 6729–6736

ASSESSMENT OF POROSITY OF PLGA NANOFIBERS PRODUCED BY ELECTROSPINNING USING SEM IMAGE ANALYSIS AND LIQUID DISPLACEMENT METHOD

Summary

In tissue engineering, electrospun poly(lactide-co-glycolide) (PLGA) nanofibrous scaffolds are widely used as three-dimensional structures that mimic the extracellular matrix. In these applications, porosity is one of the most important parameters that determine cell infiltration and nutrient diffusion. The aim of this work is to evaluate and compare the porosity of PLGA nanofibrous scaffolds using the digital SEM image analysis and the gravimetric liquid displacement method. For the experiments, a 13% (w/v) PLGA solution was prepared in a mixture of dichloromethane (DCM) and dimethylformamide (DMF) (25:10.5 v/v). Electrospinning was performed at a voltage of 18 kV and a distance of 17 cm to the collector. The results obtained showed that the analysis of SEM images using ImageJ software (after analysing 5 images for each sample) determined a surface porosity of 45.3 ± 1.4%, while the liquid displacement method with ethanol showed a higher volumetric porosity – 53.2 ± 12.2%. The observed difference in results is explained by the peculiarities of the methods: SEM analysis is limited to a two-dimensional surface assessment, while ethanol penetrates the entire three-dimensional volume of the scaffold. The work concludes that the determined volumetric porosity of about 53% is favourable for tissue engineering applications, and for more accurate scaffold characterisation, it is recommended to combine both methods as complementary research methods.

Key words: Electrospinning, PLGA nanofibers, porosity, SEM image analysis, liquid displacement method, tissue engineering

BRINELL HARDNESS EVALUATION AND MATERIAL VERIFICATION OF M-14P AIRCRAFT ENGINE VALVE GUIDES AND PISTON PIN

Esmeralda Štyps, Valdas Speičys
Lietuvos Inzinerijos Kolegija Higher Education Institution

Abstract

This study investigates the hardness and material characteristics of three components of the M-14P aircraft engine-the piston pin, intake valve guide bushing, and exhaust valve guide bushing. An optimized parameter evaluation approach was applied to relate indentation diameters to Brinell hardness values and to support material identification when the material type is unknown. The findings validate the use of Brinell hardness testing combined with optimized parameter determination as a practical tool for material verification and diagnostic assessment. The approach may be applied in routine maintenance workflows to confirm material integrity, detect operational degradation, and support decision-making in aviation component inspection.

Key words: optimized parameter evaluation; Brinell hardness; material verification; M-14P aircraft engine; piston pin; intake valve guide bushing; exhaust valve guide bushing

Introduction

The mechanical hardness of metallic materials is a fundamental property describing their resistance to localized plastic deformation caused by the penetration of a harder indenter. Hardness is strongly correlated with additional mechanical characteristics including strength, plasticity, structural phase composition, and wear resistance making it one of the most widely used parameters in material characterization for engineering applications [1,2]. Components operating under cyclic loading, elevated temperature, friction or impact, such as aircraft engine parts, require predictable hardness levels to ensure operational reliability, dimensional stability and service longevity [3].

Hardness testing techniques are based on the measurement of an indentation created by a tip of defined geometry under controlled load. Classical methods such as Brinell, Vickers, and Rockwell differ in the way hardness values are calculated and in the mechanical parameters used-applied load, indenter shape, and measurement principle [4]. In Brinell and Vickers methods, hardness is determined by relating the applied force to the actual geometric surface area of the indentation (Ac), while Rockwell, Shore, IHRD and Buchholz approaches evaluate hardness based on the depth of residual penetration under a high load [5]. However, the equivalence between methods is not straightforward: geometric conversion between Ac and projected area Ap is only accurate when the material undergoes predominantly plastic deformation. For materials where elastic recovery is significant—such as steels, bronzes, or precipitation-hardened alloys—cross-method conversion becomes imprecise, and errors propagate in hardness estimation [1,7].

Another factor influencing hardness measurement accuracy is the interaction between the elastic and plastic zones around the indentation. As demonstrated in various experimental and modeling studies, the deformation zone surrounding the imprint depends not only on the applied load but also on microstructural features, including grain size, phase distribution, and residual stresses [8]. Neglecting these factors may introduce systematic errors, particularly in coated or multilayer systems relevant to aviation components, where surface treatments (e.g., galvanizing, nitriding, anodizing) significantly alter the depth-dependent mechanical response [7,9].

The reliability of hardness testing also depends heavily on the indenter characteristics. Indenters differ in geometry (spherical, conical, or pyramidal), material (diamond, tungsten carbide), and diameter, and these attributes determine the stress field generated during indentation [10]. A mismatch between indenter type, load range, and material hardness leads to measurement artefacts, inaccurate deformation assessment, or even surface cracking. Therefore, selecting suitable measurement parameters—including load, indenter diameter, measurement scale (macro/micro), and indentation duration—is essential for ensuring comparability and reproducibility of hardness values across different materials and applications [4,11].

In aerospace engineering, precise hardness measurements of engine components—such as piston pins, valve guide bushings, or surface-treated parts—are crucial for diagnostics, maintenance and material identification. The M-14P aircraft piston engine includes components made of different alloys (steel, bronze, aluminum-based materials), which must withstand cyclic thermal and mechanical loads. However, maintenance procedures often rely solely on hardness tests without systematic evaluation of the relationship between indentation diameter, hardness values and material type. This creates the need for an optimized parameter selection approach and an algorithm capable of linking measured indentation diameters to material classification.

The present study addresses this gap by analyzing hardness–indentation relationships using Brinell measurements and by applying an optimized parameter determination algorithm. By correlating indentation diameters with hardness values and known hardness ranges for different metallic materials, this work aims to improve the reliability of material identification for M-14P engine components and evaluate the influence of surface treatment processes on the resulting mechanical properties.

Material and Methods

Three representative components from the M-14P aircraft piston engine were selected for hardness characterization: (i) the piston pin, typically manufactured from medium-carbon alloyed steel; (ii) the intake valve guide bushing, commonly produced from bronze alloys with moderate hardness and good thermal conductivity; and (iii) the exhaust valve guide bushing, operating under elevated temperatures and more intense wear conditions. The samples were cleaned, visually inspected, and their surfaces prepared to ensure perpendicular alignment during indentation, following recommended procedures for metallic specimens [12].

Hardness was determined using the Brinell indentation method, which defines hardness as the relationship between applied load and the surface area of the resulting indentation [13]. This method is widely applied to characterize alloys used in engine technologies due to its robustness, repeatability, and suitability for coarse-grained structural metals [14].

Measurements were performed using the EMCO-TEST N3A hardness tester with a tungsten carbide (WC) ball indenter of 2.5 mm diameter, following ISO 6506-1 and ASTM E10 standards [15,16]. The applied load was 187.5 kgf (1838 N), with a dwell time of 10–15 s, as recommended to minimize time-dependent elastic recovery effects [17]. The laboratory environment was controlled at 22 ± 1 °C, as temperature fluctuations are known to influence the indentation response and optical measurements [18].

Indentation diameters were evaluated using a calibrated Peak Brinell optical microscope, with the calibration verified before and after each measurement series using certified reference blocks, ensuring compliance with uncertainty requirements for macro-indentation methods [19].

Each sample was subjected to five indentation tests, with individual indentations separated by at least 5 mm to avoid plastic zone overlap, which can distort hardness values [20]. The procedure consisted of: positioning the specimen to ensure firm, level contact with the anvil; applying the preliminary load to seat the indenter (lever position 1); applying the full test load (position 2) and holding for the defined dwell time; releasing the load gradually to minimize abrupt elastic unloading; measuring the indentation diameter in two orthogonal directions and computing the average value. Brinell hardness (HBW) values were computed using the standard Brinell equation and verified with tabulated ISO 6506 reference values corresponding to the 2.5 mm / 187.5 kgf test configuration [15].

Material identification based on hardness and indentation geometry, an optimized parameter determination workflow is illustrated in Figure 1. The approach builds on prior research demonstrating that hardness measurement accuracy depends on the relationship between indentation diameter, applied load, and the elastic–plastic deformation characteristics of the material [21,22]. The algorithmic sequence consisted of acquisition of indentation diameter d from Brinell measurements; conversion of d to HBW using ISO 6506 calibration tables. Comparison with typical hardness ranges for steels, bronzes, and aluminum alloys, based on metallurgical references and validated hardness datasets [14,23]. Identification of material class by matching HBW values and indentation responses to known material groups. Verification that hardness values fall within consistency tolerances specified for aircraft-grade metallic components [24].

This method allowed classification of the piston pin as steel, and the valve guide bushings as bronze alloys, consistent with their expected functional roles. The algorithm approach follows established tendencies that correlate indentation geometry with microstructural characteristics in metallic systems [25].

All raw hardness values and indentation diameters were tabulated and processed in a structured Excel dataset. This format enables subsequent statistical evaluation, graphical representation and correlation analysis between indentation diameter and hardness.

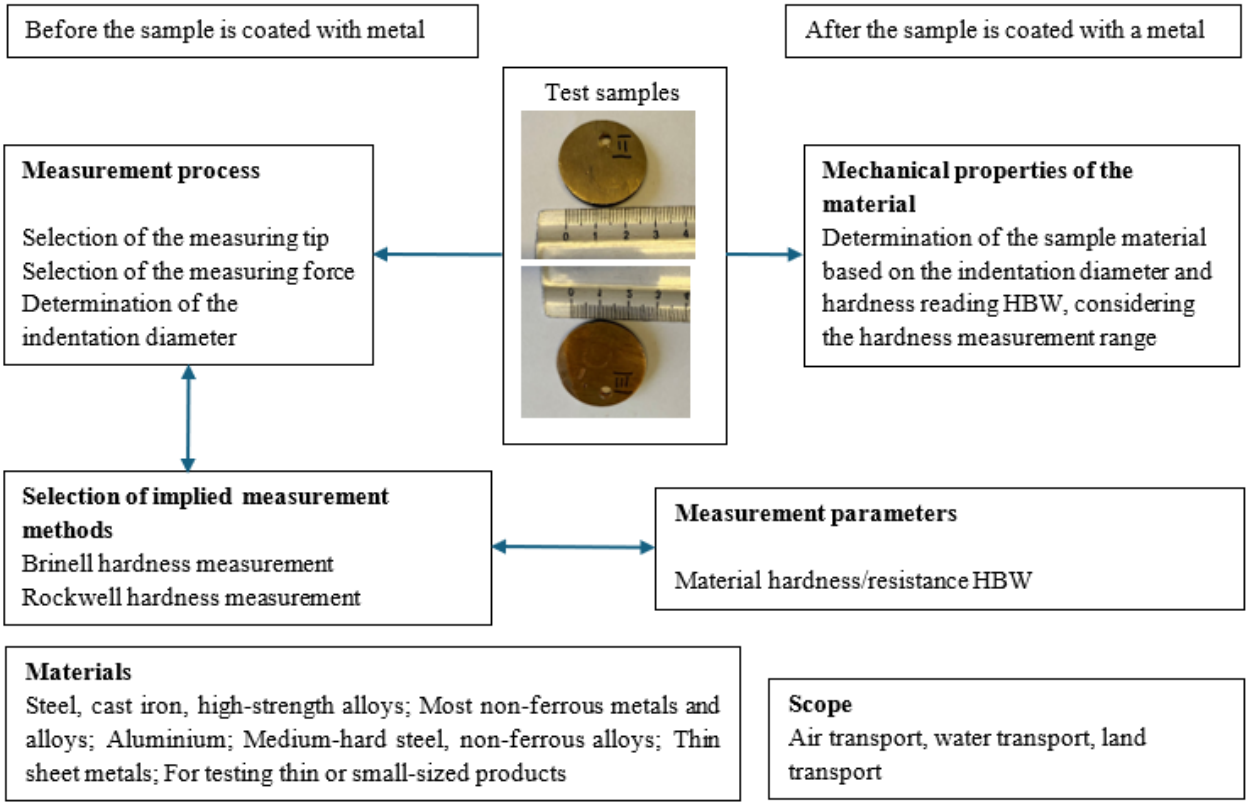


Fig. 1. Algorithm for determining parameters for hardness/resistance measurements
Source: created by authors

A reference sample with the specified hardness is attached to the Brinell press. The press is calibrated according to it. The hardness measurements of the material were performed using the selected Brinell method with the EMCO-TEST N3A hardness measuring press and a Brinell microscope. Selected: indenter with WC ball ⌀ 2.5 mm; pressing force 187.5 kgf. They were applied with a dwell time of 10 s and maintained in contact with the sample surface for another 10 s. The customer- closed joint-stock company "Termikas", purposefully did not specified material so that the test results would be realistic. Each test sample was tested five times. After each test, the indentation diameters were measured in two directions, and the averages were determined (see Table 4). Then the hardness was determined in HBW units using the table [6].

Results

The hardness measurements performed on the three components of the M-14P aircraft engine yielded consistent and repeatable indentation diameters and Brinell hardness values across all test repetitions. All values were determined under controlled load conditions using the Brinell method described in methodology section, ensuring full methodological traceability.

Tested M-14P aircraft engine components were previously used engine parts. Each specimen was subjected to five indentation tests. The full dataset-including individual indentation diameters d and corresponding HBW hardness values-is presented in Table 1, Table 2 and Table 3.

Table 1

Indentation diameter and hardness measurements of piston pin material

Test No.	Indentation d (mm)	Hardness HBW
1	1,20	156
2	1,19	158
3	1,20	156
4	1,21	153
5	1,20	156

Source: created by authors

Table 2

Indentation diameter and hardness measurements of intake valve guide bushing material

Test No.	Indentation d (mm)	Hardness HBW
1	1,50	95,5
2	1,50	95,5
3	1,49	96,6
4	1,50	95,5
5	1,50	95,5

Source: created by authors

Table 3

Indentation diameter and hardness measurements of exhaust valve guide bushing material

Test No.	Indentation d (mm)	Hardness HBW
1	1,15	170
2	1,16	167
3	1,15	170
4	1,14	174
5	1,15	170

Source: created by authors

Measurements, illustrated in Figure 2, confirm the expected material-dependent hardness behavior: The piston pin demonstrated the highest stability and intermediate hardness, characteristic of medium-carbon structural steels. The intake valve guide bushing showed the lowest hardness, consistent with tin or aluminum bronzes used in lower-temperature valve guidance. The exhaust valve guide bushing exhibited the highest hardness among the bushings, in line with thermally exposed bronze alloys subjected to work hardening and thermal cycling.

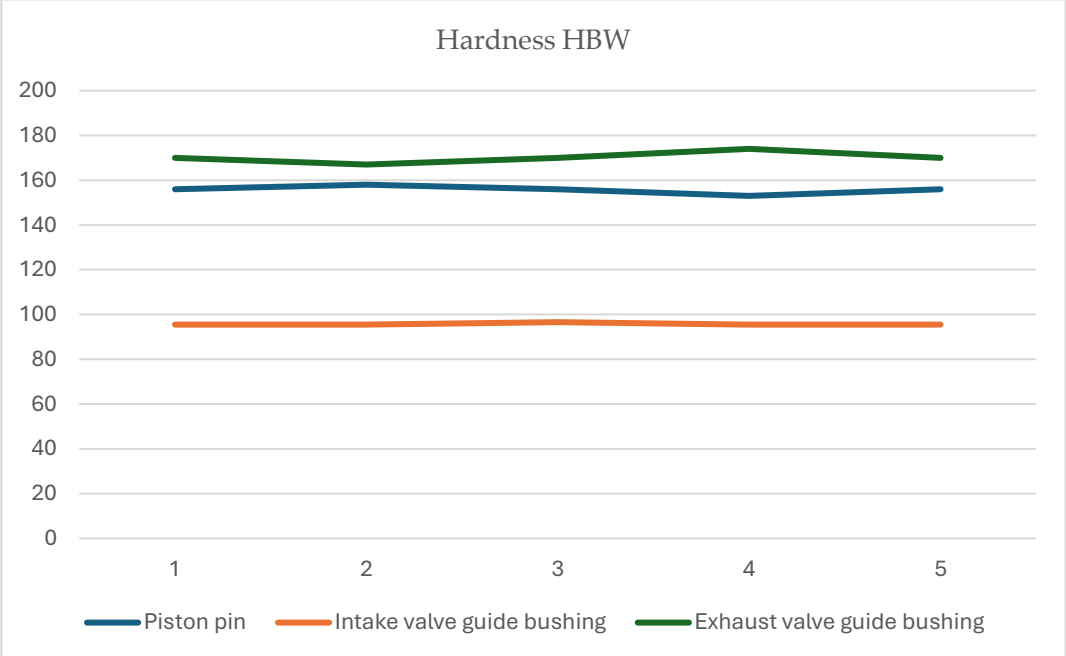


Figure 2. Hardness measurements of engine M-14P component materials

Source: created by authors

To evaluate measurement consistency and support material classification, mean values and standard deviations were computed for each sample's indentation diameters and HBW hardness. These results are summarized in Table 4.

Table 4

Statistical summary: mean indentation diameters and HBW hardness values with standard deviations

Sample	Mean d (mm)	SD d	Mean HBW	SD HBW
Piston pin	1,2	0,0063	155,8	1,6
Intake bushing	1,498	0,004	95,72	0,44
Exhaust bushing	1,15	0,0063	170,2	2,23

Source: created by authors

A comparative hardness analysis was visualized using a bar chart illustrating the mean HBW values for all three components. The results demonstrate strong agreement with expected material characteristics for aircraft engine components: Measured values fall within the typical ranges for steel (140–220 HBW) and bronze alloys (60–180 HBW). The measured hardness of the exhaust bushing suggests operational work hardening and potential effects of galvanizing or surface treatment. The small standard deviations indicate high measurement repeatability, validating both the measurement protocol and the parameter selection algorithm introduced in the methodology. Overall, the obtained data conclusively supports the identification of component materials and affirms that the Brinell method with optimized parameters is reliable for maintenance-level diagnostics of M-14P engine elements. Three parts of the M-14P engine were tested using the Brinell and Rockwell methods.

Discussions

The obtained hardness values for the three M-14P engine components align well with the expected mechanical behavior of steel and bronze alloys used in internal combustion engine systems. The piston pin demonstrated hardness values characteristic of medium-carbon steels (approximately 150–200 HBW), which agrees with established mechanical requirements for load-bearing reciprocating components [14,23]. The low variability of indentation diameters confirms stable plastic deformation and homogeneous microstructure, consistent with literature describing steel's predictable indentation response under Brinell loading conditions [13,17].

The intake and exhaust valve guide bushings exhibited hardness values typical of bronze alloys used in sliding and thermally loaded interfaces (≈90–170 HBW). The significantly higher hardness of the exhaust bushing compared to the intake bushing suggests thermally induced strain hardening and microstructural evolution during operation. Such behavior is consistent with findings in indentation studies on heat-affected or coated alloys, where thermal cycling and surface treatments increase resistance to localized deformation [21,25]. These results further support the observation that indentation hardness in copper-based alloys is sensitive to temperature-driven changes in dislocation density and phase distribution [23].

The small standard deviations across all samples indicate that the measurement procedure was repeatable and that measurement uncertainty remained within acceptable limits for the Brinell method, as defined in ISO 6506-1 and supported by calibration studies reported in the literature [14,18]. The observed hardness hierarchy—Exhaust bushing > Piston pin > Intake bushing—is therefore not an artifact of measurement noise but reflects genuine material differences tied to function and operating conditions.

Furthermore, the correlation between indentation diameter and HBW hardness determined in this study validates the parameter selection approach described in Section 2.4. Prior research confirms that hardness-based material identification is feasible when indentation geometry is properly related to mechanical response and when elastic-plastic deformation behavior is accounted for [1,22]. The present results support this framework and demonstrate that the Brinell method, combined with an optimized parameter determination algorithm, is suitable for routine diagnostics of M-14P components.

Overall, the findings reinforce the suitability of hardness testing as a practical tool for verifying material composition, assessing operational degradation, and supporting maintenance decisions in piston aircraft engines.

Conclusions

This study demonstrated that Brinell hardness testing, when supported by an optimized parameter determination algorithm, is a reliable and effective approach for identifying material types and evaluating mechanical behavior in M-14P aircraft engine components. The results showed clear differences in hardness between the piston pin, intake valve guide bushing, and exhaust valve guide bushing, reflecting their distinct functional roles and alloy compositions.

The piston pin exhibited hardness values typical of medium-carbon steels, confirming its suitability for transferring cyclic loads in the engine. The intake valve guide bushing demonstrated lower hardness, consistent with bronze alloys designed for stable sliding performance under moderate thermal conditions. In contrast, the exhaust valve guide bushing displayed significantly higher hardness, indicating thermal exposure–induced work hardening and supporting its use in high-temperature operating environments.

The low standard deviations across repeated measurements verified the repeatability and reliability of the applied Brinell testing method. Moreover, the relationship between indentation diameter and hardness closely matched established material hardness ranges, validating the use of hardness-based classification for maintenance diagnostics.

Overall, the findings confirm that the Brinell method, combined with parameter optimization, can serve as a practical and accurate tool for material verification, structural assessment, and quality control in piston aircraft engine maintenance workflows. The approach may be further extended to other engine components or similar mechanical systems where rapid and non-destructive material identification is essential.

References

1. Tuck, J., Korsunsky, A. M., & Bull, S. D. (2001). *On the application of the work-of-indentation approach to depth-sensing indentation experiments in coated systems.* Surface and Coatings Technology, 137(2–3), 217–224. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01063-X
2. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
3. Boyer, H. (Ed.). (2010). *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys.* ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.hb.htgnfa
4. ASTM E10-18. (2018). *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.* ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0010-18
5. ASTM E18-20. (2020). *Standard Test Method for Rockwell Hardness of Metallic Materials.* ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0018-20
6. Härtevergleichstabelle. Zug- festigkeit. Vickers- härte. Kugel- eindruck. Brinell- härte. Rockwellhärte. MPa. HV mm. HB. HRB. HRC. 200. 63. 7,32. https://www.stahlnetz.de/files/de/general/Haertevergleichstabelle.pdf
7. Fischer-Cripps, A. C. (2011). *Nanoindentation* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9
8. Malzbender, J., With, G. de, & den Toonder, J. M. J. (2000). *Elastic and viscoelastic indentation behaviour of materials.* Journal of Materials Research, 15(5), 1127–1136. https://doi.org/10.1557/JMR.2000.0160
9. Jamison, R., & Shen, Y.-L. (2016). *Indentation and overall compression behavior of multilayered thin-film composites.* Journal of Composite Materials, 50(4), 507–521. https://doi.org/10.1177/0021998315576768
10. EMCO-TEST. (2023). *Indenters in hardness testing.* https://www.emcotest.com/en/accessories/indenter-in-hardness-testing
11. Hainsworth, S. V., & McGurk, M. (2015). *Hardness testing and its application in engineering materials.* International Materials Reviews, 60(1), 1–28. https://doi.org/10.1179/1743280414Y.0000000046
12. ASTM E384-16. *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. ASTM International (2016). https://doi.org/10.1520/E0384-16
13. Smith, W.F., & Hashemi, J. (2010). *Foundations of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill.
14. Davis, J.R. (Ed.). (1998). *Metals Handbook, Vol. 2: Properties and Selection—Nonferrous Alloys*. ASM International.
15. ISO 6506-1:2014. *Metallic Materials — Brinell Hardness Test — Part 1: Test Method*.
16. ASTM E10-18. *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0010-18
17. Hainsworth, S.V., & McGurk, M. (2015). Hardness testing in engineering materials. *International Materials Reviews*, 60(1), 1–28. https://doi.org/10.1179/1743280414Y.0000000046
18. Dieter, G.E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.
19. Ullner, C., & Fischer-Cripps, A. (2017). Calibration procedures in macro-indentation hardness testing. *Materials Characterization*, 131, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.06.020
20. Everitt, N.M. (2003). Indentation spacing effects in Brinell and Vickers testing. *Materials Science and Technology*, 19(7), 954–958. https://doi.org/10.1179/026708303225005006
21. Tuck, J., Korsunsky, A., & Bull, S. (2001). Indentation behaviour of coated systems. *Surface and Coatings Technology*, 137(2–3), 217–224. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01063-X
22. Fischer-Cripps, A. (2011). *Nanoindentation*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9872-9
23. Totten, G.E., & MacKenzie, D.S. (Eds.) (2003). *Handbook of Aluminum: Vol. 2 – Alloy Production and Materials Manufacturing*. CRC Press.
24. FAA. *Aircraft Materials Specifications Manual*. Federal Aviation Administration (2020).
25. Jamison, R., & Shen, Y.-L. (2016). Indentation behavior of multilayered thin-film composites. *Journal of Composite Materials*, 50(4), 507–521. https://doi.org/10.1177/0021998315576768

M-14P ORLAIVIO VARIKLIO VOŽTUVO KREIPIANČIŲJŲ IR STŪMOKLIO PIRŠTO MEDŽIAGOS ĮVERTINIMAS TAIKANT BRINELIO KIETUMO METODĄ

Santrauka

Šiame tyrime nagrinėjamas trijų M-14P orlaivio variklio komponentų – stūmoklio piršto, įsiurbimo vožtuvo kreipiančiųjų įvorės ir išmetimo vožtuvo kreipiančiųjų įvorės – kietumas ir medžiagų charakteristikos. Optimizuotas parametrų vertinimo metodas buvo pritaikytas siekiant susieti įspaudimo skersmenis su Brinelio kietumo vertėmis ir identifikuoti medžiagos, nežinant medžiagos tipo. Išvados patvirtina Brinelio kietumo bandymo ir optimizuoto

parametrų vertinimo algoritmo naudojimą kaip praktinę priemonę medžiagų tipo nustatymui ir diagnostiniam vertinimui. Šis metodas gali būti taikomas siekiant nustatyti medžiagos vientisumą, aptikti eksploatacinius sutrikimus ir pagrįsti sprendimų priėmimą atliekant aviacijos komponentų patikrą.

Reikšminiai žodžiai: optimizuotas parametrų vertinimas, Brinelio kietumas, medžiagos patikrinimas, M-14P orlaivio variklis, stūmoklio pirštas, įsiurbimo vožtuvo kreipiančiųjų įvorė, išmetimo vožtuvo kreipiančiųjų įvorė.

PERFORMANCE AND FATIGUE ANALYSIS OF 3D-PRINTED TPU FOR SOFT ROBOTIC GRIPPER APPLICATIONS

Aleksandrs Okunevs, Viktors Gutakovskis, Artis Iesmins
Riga Technical College

Abstract

The long-term durability of 3D-printed soft robotic grippers is a critical challenge for their industrial adoption, with material fatigue under cyclic loading being a primary limiting factor. This study aims to address this gap by systematically evaluating the early-stage fatigue performance and cost-effectiveness of three distinct thermoplastic polyurethane (TPU) filaments: a soft (84A), a hard (96A), and a carbon-fiber-reinforced (90A) variant. For this purpose, identical gripper fingers were fabricated from each material using Fused Filament Fabrication (FFF) and subjected to 1,000 grasping cycles using a PLC-controlled pneumatic test rig. Permanent deformation was quantified at set intervals by measuring the change in the length of the main structural edges. A cost-performance analysis was also conducted to assess economic viability. The results revealed that the CF-reinforced TPU was approximately three times more resistant to permanent deformation than the standard TPUs. Counterintuitively, the Hard TPU (96A) exhibited the highest deformation, demonstrating that Shore hardness is not a reliable predictor of fatigue performance for this application. The findings indicate that while fiber reinforcement significantly enhances durability, it comes at the cost of reduced compliance and increased processing difficulty, highlighting a critical trade-off for industrial applications. These insights provide practical guidance for material selection in the design of durable soft robotic end-effectors. Future work will extend this evaluation to higher cycle counts and more complex loading conditions to better predict long-term operational performance in industrial environments.

Keywords: 3D print, TPU, robotic gripper, fatigue analysis

Introduction

Modern production cannot be imagined without robots. Robotics is a field of technology that combines mechanics, electronics, and computer science to create automated machines capable of performing various tasks. Robots have become an integral part of many industries, medicine, agriculture, and even everyday life. A robot is an automated device consisting of a control system, an actuator (manipulator, gripper), and sensors that allow it to move in space and interact with the surrounding environment. They are equipped with grippers, tools, and other technological equipment that enable them to perform manipulation and manufacturing tasks.

A gripper is a mechanical device designed to hold, grasp, and manipulate objects. Grippers are widely used in various sectors, such as manufacturing, medicine, and the automotive industry. Many residents of Latvia can see a six-axis manipulator with a gripper at the automated sample reception points of Egils Gulbis Laboratory (Fig.1.). These systems use a manipulator with a gripper to issue and receive testing kits.



Fig. 1. Egils Gulbis laboratory automated system

In industrial manufacturing processes, one of the automated operations is the so-called “pick and place” action. Grippers are often used for such purposes. They perform well when the shape of the handled

parts or workpieces is constant. However, if the part shape is variable or complex, standard grippers can no longer perform their function effectively.

Adaptive Grippers and Their Types

Adaptive grippers are devices that automatically grasp and move objects of different shapes and sizes. They are often used in robotics, especially with collaborative robots that work alongside humans. These grippers have control and electromechanical systems that allow them to adapt to different gripping conditions. They can lift and move objects of various shapes, making them universally applicable. [1]

Adaptive grippers are classified into parallel grippers, vacuum grippers, magnetic grippers, as well as specialized grippers that imitate the movements of the human hand (Fig. 2).



Fig.2. Universal grippers Robotiq 2F-85 un 2F-140

Parallel Grippers

Parallel grippers may have two or three gripping fingers and use various types of actuation:
electric;
servo-electric;
pneumatic.

As examples, the universal adaptive grippers Robotiq 2F-85 and 2F-140 can be mentioned, which are suitable for gripping objects of complex shapes.

Applications of Adaptive Grippers

Adaptive grippers are used in production and assembly lines because they can handle a wide range of objects. They can pick up and hold small, large, soft, or rigid items, making them ideal for tasks such as quality inspection, machine tending, and assembly. Their precision in controlling the position, speed, and force of each finger enables delicate handling of components, which is critical in advanced manufacturing processes.

Most often, however, adaptive grippers are used together with collaborative robots, where they work alongside human operators. Human-like movements and easy programmability make them suitable for tasks requiring close human–robot interaction, improving efficiency and safety in the workplace.

Soft Robotics

A new trend is so-called “soft robotics,” which has opened up new possibilities for the development of adaptive grippers. These grippers, made of flexible materials, can grasp and hold soft or irregularly shaped objects, making them suitable for use in industry, agriculture, and healthcare.

Soft robotics is a new field focused on creating robots from highly flexible materials that mimic the properties of biological tissues. Soft robots are made from elastic materials such as elastomers or hydrogels, allowing them to mechanically deform like living organisms. This flexibility enables them to move in complex environments, manipulate delicate objects, and safely interact with humans. Hybrid systems that combine the advantages of both soft and rigid robotics are also currently being studied.

TPE Materials for 3D Printing

Thermoplastic elastomers (TPE) are a class of copolymers or physical polymer blends (usually plastic and rubber) consisting of materials with both thermoplastic and elastomeric properties. TPEs are increasingly used in 3D printing due to their flexibility, durability, and ease of processing.

TPEs are used in a wide range of applications because of their versatile properties. In the medical sector, TPEs comply with recognized standards such as USP Class VI and DIN ISO 10993, making them suitable for use in medicine, pharmaceuticals, and diagnostics. These standards ensure that TPEs are safe and effective for use in various medical devices and components, thereby enhancing patient safety and product reliability.

In consumer goods, TPEs are commonly used to manufacture items such as phone cases, grip sleeves, and vibration-damping elements. Their flexibility, durability, and tactile properties make them ideal for products requiring a comfortable grip and resistance to wear, improving user experience and product longevity.

TPEs are also widely used in industrial applications, including the production of fasteners, seals, gaskets, adapters, handles, and grips. Their ability to maintain performance under stress and varying environmental conditions makes them valuable in industrial settings where reliability and durability are critical.

The automotive industry also benefits from the use of TPEs. These materials are suitable for manufacturing automotive components because they can withstand stress and impacts—properties that materials such as PLA and ABS cannot match. The resilience and flexibility of TPEs contribute to the safety, efficiency, and longevity of automotive parts, making them essential for components exposed to mechanical and environmental challenges.

Thermoplastic elastomers have a unique combination of properties that make them particularly suitable for specific 3D printing tasks. These materials are characterized by their flexibility while maintaining dimensional stability at room temperature, which is ideal for applications requiring tensile and bending properties. In addition, TPEs are environmentally friendly, recyclable, and free from latex, PVC, and phthalates, with low odor and reduced emissions.

In terms of mechanical properties, TPEs typically have a tensile modulus of 60 MPa, tensile strength of 7 MPa, and elongation at break of 250%, along with high elasticity and good tribological properties. Thermally, TPEs have a melting temperature of approximately 138 °C and a density of 1080 kg/m³. Furthermore, they offer excellent UV and weather resistance, allowing them to withstand harsh environments and climates, further expanding their range of applications.

Despite their many advantages, TPEs also present certain challenges in the 3D printing process. One significant issue is printability: due to their flexibility, TPEs can cause problems such as stringing, oozing, and poor bridging. These materials may not perform well with Bowden extruders, and a direct-drive extruder is usually required for optimal results.

TPEs also require specific printing parameters, including a printing temperature range of 210–230 °C and a build plate temperature of 30–60 °C. Higher printing speeds can cause filament compression and jamming. When designing flexible parts, it is recommended to use negative tolerances between components to ensure a tight fit. Optimizing feed rates and printing at lower layer heights in the range of 0.1–0.2 mm can also improve print quality.

TPEs are often compared with other flexible filaments such as TPU (thermoplastic polyurethane) and TPC (thermoplastic copolyester). TPU, a form of TPE, is stiffer and more durable, making it easier to print. It retains its elastic properties at lower temperatures and has higher chemical resistance compared to TPE. TPC, on the other hand, is a polyester-based flexible filament known for good thermal stability and chemical resistance, making it suitable for tougher flexible parts.

Another alternative is Soft PLA—an elastic filament made from organic fibers treated with chemicals, providing a balance between flexibility and ease of printing. Each of these materials has its own set of properties that make them suitable for different applications, highlighting the importance of choosing the right filament based on the specific requirements of a 3D printing project. [2]

3D Modeling of the Gripper Using Fusion360

The author describes the development of a robotic gripper using the 3D modeling software Fusion360. The gripper consists of five main components:

fixed mount on the cylinder,

guide,

fixed mount on the cylinder rod,

gripper “fingers,”
cylinder mount to the robot flange.

The parts were designed separately and then assembled into a single model. All components were developed taking into account the specifications of the robot Universal Robots UR10e and the cylinder Festo ADVU-16-40-A-P-A to ensure precise operation and compatibility.

The “finger” mount to the cylinder was designed using the Fusion360 “Sketch” and “Extrude” functions. Its design precisely matches the shape of the cylinder, allowing the user to easily and efficiently connect the finger to the cylinder (Fig. 3).

The guide was designed as a cylindrical form incorporating a guide for the second component. It was created using the Fusion360 “Sketch” and “Extrude” functions to form the cylinder and guide geometry (Fig. 4).

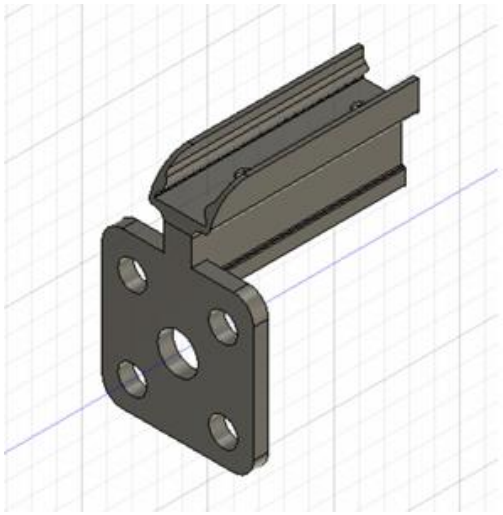


Fig.3. Finger

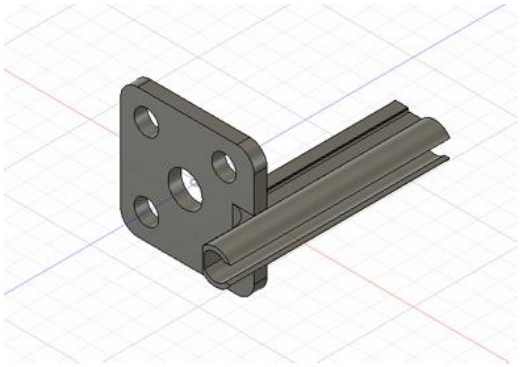


Fig.4. Guide rod

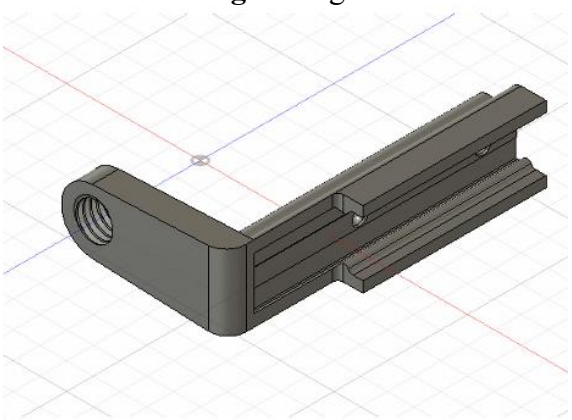


Fig.5. Cylinder rod fixed part

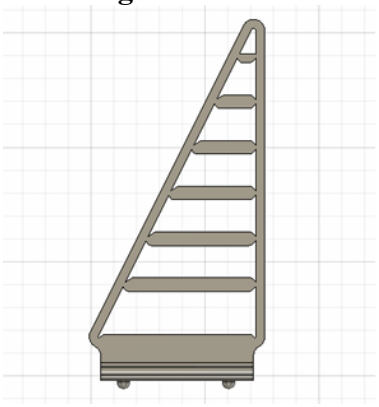


Fig.6. Gripper finger

The fixed mount on the cylinder rod (Fig. 5) was also designed using the Fusion360 “Sketch” and “Extrude” functions, ensuring a precise fit to the cylinder rod and providing stability.

The gripper “fingers” (Fig. 6) were designed using the Fusion360 “Sketch” and “Extrude” functions to create a triangular shape. They were designed to grasp objects securely and ensure the stability of the handled object.

3D Printing of the Robotic Gripper Model

Two different polymers were used for 3D printing the robotic gripper: PLA (polylactic acid) and TPU (thermoplastic polyurethane). PLA is a biodegradable and environmentally friendly polymer that is easy to print and provides high printing accuracy. TPU is flexible and durable, which is important for the operation of the gripper.

PLA printing parameters;
printing temperature: 200–230 °C;
build plate temperature: 60–80 °C;

printing speed: 50–60 mm/s.
TPU printing parameters:
printing temperature: 220–250 °C;
build plate temperature: 80–100 °C;
printing speed: 20–40 mm/s.

The 3D printing process was carried out using a Bambu Lab A1 3D printer. Before printing, the printer was calibrated to ensure accuracy. The gripper 3D model was then loaded, and appropriate printing parameters were selected depending on the polymer used. During printing, print quality and parameters were regularly monitored to achieve the highest possible accuracy. After printing, the parts were inspected and assembled into a complete gripper tool assembly.

Material Sustainability

The author examines the key materials used in the gripper design: PLA (polylactide), TPU (thermoplastic polyurethane), and pneumatic cylinders. Polylactic acid (PLA) is a biodegradable and bio-based thermoplastic derived from renewable resources such as corn starch, tapioca root starch, or sugarcane. [3] Its sustainability is high because it is biodegradable and compostable under industrial conditions. However, although biodegradable, PLA may require specific conditions to initiate degradation, and the process can take several years. [4]

Thermoplastic polyurethane (TPU) is flexible, durable, and resistant to oils and greases, making it an excellent choice for many industrial applications. [5] However, while TPU is durable, it is not biodegradable and may pose environmental issues if not properly managed. Some TPU types are biodegradable and produced from renewable resources, reducing their environmental impact. [6]

Pneumatic cylinders are commonly used in automation and mechanical systems. Their sustainability depends on the materials they are made from and their operating conditions. Pneumatic cylinders made of steel or aluminum can last many years if properly maintained and used. [6] However, like any mechanical system, pneumatic cylinders are subject to wear and require regular maintenance. Alternatives such as electric cylinders can offer better energy efficiency and lower operating costs in some applications. [6]

These materials can be sustainable in different aspects, but their production and disposal may have environmental impacts that must be considered when selecting materials for any product or system.

Conclusions

An adaptive two-finger gripper capable of efficiently and safely manipulating various objects has been developed.

Existing solutions in the adaptive gripper market were studied during the project.

A mechanical design was developed, a prototype was created, and experiments were conducted to test its functionality.

Research on adaptive grippers confirms their growing importance in modern robotics, as they can handle objects of various shapes, sizes, and weights, improving the efficiency and versatility of robotic processes.

Autodesk Fusion 3D modeling and 3D printing technologies are suitable tools for designing and creating adaptive grippers, enabling the development of customizable and functional devices.

Although the development and use of adaptive grippers involve challenges such as economic viability and material selection, their application potential in various industries—especially manufacturing and assembly—is significant.

Material selection for adaptive gripper construction is crucial, considering both functionality and environmental aspects. PLA and TPU materials have their advantages and disadvantages, and their choice depends on the specific application.

The efficiency and environmental impact of pneumatic systems must be considered when selecting the control system for an adaptive gripper. Alternatives such as electric cylinders may offer better energy efficiency and lower operating costs.

References

1. Festo: Adaptive gripper finger DHAS-GF-60-U-BU | Festo USA. / Internets. – https://www.festo.com/us/en/a/3998967/ – 13.01.2025.
2. atterHackers: Filament comparison guide: PLA vs TPU. / Internets. – https://www.matterhackers.com/news/filament-comparison-guide-pla-vs-tpu – 05.10.2024.
3. 3D Insider: Is PLA biodegradable? / Internets. – https: // 3dinsider.com/is-pla-biodegradable/ – 20.09.2024.

4. Swiftpak: Why is PLA not sustainable? / Internets. – https://www.swiftpak.co.uk/insights/why-is-pla-not-sustainable/ – 25.09.2024.
5. ICP DAS: Why is TPU considered ESG - friendly? /Internets. – https://bmp.icpdas.com/why-is-tpu-considered-esg-friendly/ – 30.09.2024.
6. Covestro: Making TPU raw materials more circular. / Internets. – https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2021/making-tpu-raw-mat erials-more-circular – 01.10.2024.

Author contributions:

Conceptualization, V.G.; methodology, A.I.; formal analysis, A.O.; investigation, A.I., writing original draft preparation, A.O.; writing review and editing, A.I. and V.G.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

SOCIALINIŲ IR EDUKOLOGINIŲ MOKSLŲ KRYTIS

PROFESIONALIŲ VAIRUOTOJŲ DARBO SPECIFIKA VISUOMENINIAME TRANSPORTE: PSICHOFIZIOLOGINIŲ, ERGONOMINIŲ IR ORGANIZACINIŲ VEIKSNIŲ INTEGRUOTA ANALIZĖ SAUGOS KONTEKSTE

Albertas Šarinskas
Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

Anotacija

Visuomeninio transporto sistemose profesionalių vairuotojų veikla yra vienas svarbiausių eismo saugos ir paslaugų kokybės determinančių. Nepaisant technologinės pažangos, žmogiškasis faktorius išlieka kritiniu sistemos elementu, kurio būklė tiesiogiai veikia eismo įvykių tikimybę. Šio tyrimo tikslas – sistemingai išanalizuoti profesionalių vairuotojų darbo specifiką, integruojant psichofiziologinius, ergonominius ir organizacinius veiksnius bei įvertinant jų sąveiką saugos kontekste. Tyrimas grindžiamas sistemine literatūros apžvalga, taikant naratyvinės sintezės metodą. Rezultatai rodo, kad vairuotojų darbo specifika yra daugiamatė sistema, kurioje nuovargis, stresas, darbo krūvis ir ergonominės sąlygos veikia nelineariai ir tarpusavyje stiprina vienas kito poveikį. Ilgos darbo pamainos, pamaininis darbas ir neoptimalios darbo sąlygos lemia psichofiziologinės būklės pablogėjimą, kuris tiesiogiai susijęs su reakcijos laiko didėjimu ir klaidų tikimybe. Ergonominiai veiksniai, tokie kaip ilgalaikis sėdėjimas ir vibracija, turi kumuliacinį poveikį sveikatai ir netiesiogiai veikia saugą per kognityvinių funkcijų pablogėjimą. Tyrimas atskleidžia, kad efektyvus saugos valdymas reikalauja integruoto požiūrio, apimančio darbo organizavimą, ergonomiką ir psichofiziologinės būklės stebėseną. Siūloma pereiti nuo fragmentuoto prie sisteminio ir duomenimis grįsto modelio, kuris leistų identifikuoti rizikas realiu laiku ir optimizuoti darbo sąlygas. Gauti rezultatai turi praktinę reikšmę transporto įmonėms ir politikos formuotojams, siekiantiems didinti eismo saugą ir darbo efektyvumą.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI. Vairuotojai; visuomeninis transportas; nuovargis; ergonomika; eismo sauga; darbo organizavimas; žmogiškasis faktorius

Įvadas

Visuomeninis transportas šiuolaikinėse urbanizuotose visuomenėse tampa neatsiejama tvaraus judumo sistemos dalimi, užtikrinančia efektyvų gyventojų mobilumą, mažinančia transporto spūstis bei prisidedančia prie aplinkosauginio poveikio mažinimo. Augant miestų populiacijai ir didėjant transporto srautams, transporto sistemos patiria vis didesnį kompleksinį spaudimą, kuris pasireiškia ne tik infrastruktūros apkrova, bet ir didėjančiais reikalavimais transporto paslaugų kokybei, saugumui bei efektyvumui (Zabielaitė & Paliulis, 2017: 3-4). Šiame kontekste visuomeninio transporto vairuotojai tampa vienu iš kritinių sistemos elementų, nuo kurių tiesiogiai priklauso visos sistemos funkcionavimo stabilumas ir patikimumas.

Nepaisant technologinės pažangos, vairuotojas išlieka pagrindiniu sprendimų priėmėju realiu laiku veikiančioje dinaminėje aplinkoje. Tai iš esmės skiria visuomeninio transporto vairuotojų veiklą nuo daugelio kitų profesijų, nes jų darbo rezultatai turi tiesioginį ir momentinį poveikį tiek keleivių saugai, tiek platesnei eismo sistemai. Šiuo požiūriu vairuotojo veikla gali būti traktuojama kaip aukštos rizikos, aukštos atsakomybės ir nuolatinio kognityvinio įsitraukimo reikalaujanti profesija.

Mokslinėje literatūroje pastaraisiais dešimtmečiais pastebima aiški tendencija pereiti nuo siauro techninio transporto sistemų vertinimo prie integruoto, žmogaus veiksnius akcentuojančio požiūrio. Ši transformacija grindžiama prielaida, kad net ir pažangiausios technologinės sistemos negali būti efektyvios be tinkamai funkcionuojančio žmogiškojo elemento. Todėl vis daugiau dėmesio skiriama vairuotojų psichofiziologinei būklei, darbo aplinkos ergonomikai, organizaciniams veiksniams bei jų tarpusavio sąveikai.

Profesionalių vairuotojų darbo specifika pasižymi dideliu daugialypiškumu, kuris apima techninius, kognityvinius, emocinius ir socialinius komponentus. Vairuotojas vienu metu atlieka kelias funkcijas: valdo transporto priemonę, stebi eismo aplinką, priima sprendimus, komunikuoja su keleiviais ir laikosi griežtų veiklos reikalavimų, tokių kaip tvarkaraščiai ar saugos protokolai. Tokia veiklos struktūra lemia didelį darbo krūvį, kuris nėra vien fizinis, bet apima ir reikšmingą kognityvinį bei emocinį komponentą.

Ypač svarbus aspektas yra psichofiziologinis krūvis, kuris atsiranda dėl nuolatinės dėmesio koncentracijos, informacijos apdorojimo ir sprendimų priėmimo poreikio. Tyrimai rodo, kad ilgalaikis tokio pobūdžio krūvis gali lemti nuovargį, sumažėjusį budrumą ir padidėjusią klaidų tikimybę. Šie veiksniai yra tiesiogiai susiję su eismo sauga, nes net nedidelis reakcijos laiko padidėjimas gali turėti kritinių pasekmių sudėtingose eismo situacijose (Li et al., 2026: 6).

Be psichofiziologinių veiksnių, svarbų vaidmenį atlieka ir ergonominiai aspektai. Ilgalaikis sėdėjimas, vibracijos poveikis, ribotas judėjimas ir ne visada optimaliai suprojektuota darbo vieta gali sukelti įvairius raumenų ir skeleto sistemos sutrikimus. Epidemiologiniai tyrimai rodo, kad profesionalūs vairuotojai patenka į padidintos rizikos grupę, kalbant apie lėtinius nugaros skausmus, kaklo įtampą ir kitus su darbo

pobūdžiu susijusius sveikatos sutrikimus. Tai ne tik mažina gyvenimo kokybę, bet ir gali turėti įtakos darbo efektyvumui bei saugai.

Dar vienas svarbus aspektas yra darbo organizavimas. Pamaininis darbas, ilgos darbo valandos, nereguliarūs grafikai ir laiko spaudimas sudaro papildomą stresinį foną, kuris gali sustiprinti psichofiziologinius neigiamus efektus. Šiuolaikiniai tyrimai vis dažniau pabrėžia, kad darbo organizavimas turi būti laikomas ne tik administraciniu, bet ir strateginiu saugos valdymo elementu. Technologijų plėtra iš esmės keičia vairuotojų darbo pobūdį. Pažangios vairuotojo pagalbos sistemos (ADAS), telematika, dalinė automatizacija ir skaitmeninės valdymo sistemos suteikia naujų galimybių didinti saugą ir efektyvumą. Tačiau tuo pačiu jos kelia ir naujų iššūkių, susijusių su žmogaus ir technologijos sąveika. Vienas iš aktualiausių klausimų yra vadinamasis „automatizacijos paradoksas“, kai didėjant automatizacijos lygiui mažėja vairuotojo įsitraukimas, o tai gali lemti prastesnį situacinį suvokimą kritinėse situacijose.

Aplinkosauginis aspektas taip pat tampa vis svarbesnis. Transporto sektorius yra vienas iš pagrindinių šiltnamio efektą sukeliančių dujų šaltinių, todėl visuomeninio transporto efektyvumo didinimas yra svarbus klimato kaitos mažinimo kontekste. Vairuotojų elgsena, ypač vairavimo stilius, turi tiesioginę įtaką kuro sąnaudoms ir emisijoms. Ekologiško vairavimo principai gali reikšmingai sumažinti energijos vartojimą, tačiau jų taikymas priklauso nuo vairuotojų kompetencijos, motyvacijos ir darbo sąlygų (Dainauskas & Bražukienė, 2013: 58).

Svarbu pažymėti, kad visi šie veiksniai nėra izoliuoti – jie sąveikauja tarpusavyje ir formuoja kompleksinę sistemą. Pavyzdžiui, netinkamas darbo grafikas gali sukelti nuovargį, kuris lemia prastesnį vairavimo stilių, didesnes emisijas ir didesnę eismo įvykių tikimybę. Todėl būtinas integruotas požiūris, apimantis visus šiuos aspektus.

Atsižvelgiant į išvardytas problemas ir tendencijas, šio straipsnio tikslas yra sistemingai išanalizuoti visuomeninio transporto vairuotojų darbo specifiką, identifikuojant pagrindinius veiksnius, lemiančius darbo krūvį, saugą, sveikatą ir aplinkosauginį efektyvumą. Straipsnyje siekiama ne tik apibendrinti esamus tyrimus, bet ir pateikti kritinę jų analizę bei integruoti skirtingų disciplinų įžvalgas.

Straipsnyje keliami šie pagrindiniai tyrimo klausimai:

- kokie veiksniai apibrėžia profesionalių vairuotojų darbo specifiką,
- kaip šie veiksniai veikia saugą ir sveikatą,
- koks technologijų ir darbo organizavimo vaidmuo mažinant neigiamą poveikį,
- kaip vairuotojų elgsena susijusi su aplinkosauginiu efektyvumu.

Ateities tyrimų kontekste galima išskirti kelias svarbias kryptis. Pirma, vis didesnę reikšmę įgauna dirbtinio intelekto taikymas vairuotojų būklės stebėsenai ir prognozavimui. Antra, didžiųjų duomenų analizė leidžia pereiti nuo fragmentuoto prie sisteminio supratimo apie realias darbo sąlygas. Trečia, būtina plėtoti individualizuotus darbo modelius, kurie atsižvelgtų į vairuotojų fiziologinius ir psichologinius skirtumus. Galiausiai, vis svarbesnis tampa integruotas požiūris, jungiantis saugos, efektyvumo ir aplinkosaugos tikslus.

Apibendrinant galima teigti, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika yra kompleksinis, daugiamatis ir dinamiškas reiškinys, kurio analizė reikalauja tarpdisciplininio požiūrio. Šio straipsnio struktūra grindžiama sistemine literatūros analize, leidžiančia nuosekliai atskleisti pagrindinius šios problematikos aspektus ir pateikti integruotą jų vertinimą.

Metodologija

Šiame straipsnyje taikoma metodologinė prieiga grindžiama sisteminės literatūros apžvalgos principais, siekiant užtikrinti analizuojamos informacijos patikimumą, nuoseklumą ir mokslinį pagrįstumą. Atsižvelgiant į nagrinėjamos temos tarpdisciplinišKumą, metodologija integruoja transporto inžinerijos, ergonomikos, profesinės sveikatos, psichologijos, aplinkosaugos ir taikomosios statistikos tyrimus. Toks kompleksinis metodinis pagrindas leidžia ne tik apibendrinti esamus tyrimus, bet ir atlikti jų kritinę analizę, identifikuojant pagrindines tendencijas bei spragas (Kardelis, 2005: 112-114).

Šis straipsnis remiasi sisteminės apžvalgos principais su naratyvinės sintezės elementais. Toks metodologinis pasirinkimas yra pagrįstas tuo, kad nagrinėjama tema apima įvairias mokslo disciplinas ir skirtingus tyrimo metodus, todėl vien tik kiekybinė metaanalizė nebūtų pakankama. Naratyvinė sintezė leidžia integruoti heterogeniškus duomenis ir pateikti konceptualiai nuoseklų analizės rezultatą.

Apžvalgos tipas ir metodinis pagrindas

Straipsnyje taikoma sisteminė literatūros apžvalga (angl. systematic review), kuri yra laikoma vienu patikimiausių metodų apibendrinant mokslines žinias. Šis metodas leidžia struktūruotai identifikuoti, atrinkti ir analizuoti mokslinius šaltinius, sumažinant subjektyvumo ir atrankos šališkumo riziką.

Metodologinis pagrindas iš dalies remiasi PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) gairėmis, kurios plačiai taikomos sisteminėse apžvalgose. PRISMA metodika užtikrina:

- skaidrų publikacijų atrankos procesą,
- aiškiai apibrėžtus įtraukimo ir atmetimo kriterijus,
- nuoseklų duomenų analizės procesą.

Tačiau, atsižvelgiant į temos specifiką, PRISMA schema šiame tyrime taikoma adaptuotai, nes analizuojami tyrimai pasižymi metodologiniu nevienalytiškumu (pvz., eksperimentiniai, stebėjimo, modeliavimo tyrimai).

Duomenų analizės metodai

Atrinkti tyrimai buvo sisteminami ir analizuojami taikant kelis metodus:

1. Teminė analizė (thematic analysis):
   Leido suskirstyti tyrimus pagal pagrindines temas:
   - psichofiziologiniai veiksniai
   - ergonomika
   - sauga
   - darbo organizavimas
   - technologijos
   - aplinkosauga
2. Kryžminė analizė (cross-analysis):

Leido palyginti skirtingų tyrimų rezultatus ir nustatyti bendras tendencijas bei prieštaravimus.

3. Kritinė analizė:

Vertintas tyrimų metodologinis pagrįstumas, identifikuojant galimus šališkumus ir ribotumus.

Šių metodų derinimas suteikė galimybę ne tik apibendrinti duomenis, bet ir sukurti konceptualų modelį.

Metodologijos ribotumai

Nepaisant sisteminio požiūrio, tyrimas turi keletą ribotumų, kurie buvo identifikuoti ir ankstesniame tekste .

Pagrindiniai ribotumai:

- Tyrimų heterogeniškumas:
- Skirtingos metodikos, imtys ir vertinimo kriterijai apsunkina tiesioginį rezultatų palyginimą.
- Ribotas longitudinių tyrimų skaičius:
- Dauguma tyrimų yra trumpalaikiai, todėl sunku įvertinti ilgalaikį poveikį.
- Geografiniai skirtumai:
- Skirtingos darbo sąlygos, infrastruktūra ir reglamentavimas apsunkina rezultatų apibendrinimą globaliu mastu.
- Duomenų trūkumas realiomis sąlygomis:
- Dalis tyrimų atliekami laboratorinėmis sąlygomis, kurios ne visada atspindi realią darbo aplinką.

Metodologinės tendencijos ir ateities kryptys

Analizė rodo, kad metodologiniai požiūriai šioje srityje sparčiai evoliucionuoja. Pagrindinės tendencijos:

- perėjimas nuo laboratorinių tyrimų prie realaus laiko duomenų analizės,
- didžiųjų duomenų (big data) ir telematikos naudojimas,
- dirbtinio intelekto taikymas elgsenos ir nuovargio prognozavimui,
- integruotų modelių kūrimas, apimančių kelis veiksnius vienu metu.

Ateityje tikėtina, kad metodologija taps dar labiau orientuota į:

- individualizuotus modelius,
- adaptacines sistemas,
- kompleksinių sistemų analizę.

Taikyta metodologija leidžia nuosekliai ir kritiškai įvertinti profesionalių vairuotojų darbo specifiką, integruojant skirtingų mokslo sričių įžvalgas. Sisteminė literatūros apžvalga kartu su naratyvine sinteze suteikia galimybę ne tik apibendrinti esamas žinias, bet ir identifikuoti pagrindines tyrimų spragas bei ateities kryptis. Metodologinis požiūris, grindžiamas tarpdisciplinine integracija, yra būtinas siekiant suprasti

kompleksinę vairuotojų darbo specifiką ir kurti efektyvias saugos, darbo organizavimo bei aplinkosaugos strategijas.

Vairuotojų darbo specifikos teoriniai pagrindai

Profesionalių vairuotojų darbo specifikos analizė visuomeniniame transporte reikalauja sisteminio teorinio pagrindo, leidžiančio integruoti skirtingų mokslo sričių – transporto inžinerijos, ergonomikos, kognityvinės psichologijos ir kompleksinių sistemų teorijos – įžvalgas. Vairuotojo veikla negali būti interpretuojama kaip izoliuotas procesas, nes ji vyksta dinaminėje, daugiamatėje sistemoje, kurioje nuolat sąveikauja žmogus, techninė sistema ir aplinkos veiksniai. Tokia sąveika lemia ne tik veiklos efektyvumą, bet ir saugos lygį, todėl teorinis šios veiklos modeliavimas tampa esminiu žingsniu siekiant suprasti rizikos formavimosi mechanizmus.

Šiuolaikinėje mokslinėje literatūroje vairuotojo veikla vis dažniau traktuojama kaip daugiamatė funkcijų sistema, kurioje vienu metu vyksta keli paraleliniai procesai. Transporto priemonės valdymas, kuris istoriškai buvo laikomas pagrindine vairuotojo funkcija, iš tikrųjų yra tik viena iš sudėtingos veiklos dimensijų. Šalia techninių veiksmų, tokių kaip greičio reguliavimas, trajektorijos palaikymas ar stabdymas, vairuotojas nuolat vykdo sudėtingus kognityvinius procesus, susijusius su informacijos apdorojimu, situacijos vertinimu ir sprendimų priėmimu. Šie procesai vyksta realiu laiku ir dažnai esant aukštam neapibrėžtumo lygiui, todėl jų efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo žmogaus psichofiziologinės būklės (Sadauskas, 2019: 27).

Be kognityvinės ir techninės dimensijos, visuomeninio transporto vairuotojų veikloje svarbią vietą užima socialinė sąveika. Skirtingai nei daugelyje kitų transporto sektoriaus sričių, čia vairuotojas nuolat kontaktuoja su keleiviais, sprendžia konfliktines situacijas ir atlieka paslaugos teikėjo funkciją. Ši aplinkybė įveda papildomą emocinį krūvį, kuris gali veikti tiek sprendimų priėmimą, tiek bendrą darbo efektyvumą. Kartu egzistuoja ir organizacinė veiklos dimensija, susijusi su tvarkaraščių laikymusi, maršrutų koordinavimu ir reakcija į veiklos sutrikimus, kurie dažnai yra nenumatyti ir reikalauja greito adaptacinio atsako.

Šių funkcijų integracija leidžia teigti, kad vairuotojo darbas yra kompleksinė veikla, kurios analizė negali apsiriboti vien tik techniniais ar fiziologiniais aspektais. Šiame kontekste vienas iš svarbiausių teorinių modelių yra žmogaus–transporto priemonės–aplinkos sistema, leidžianti suvokti vairavimą kaip integruotą procesą. Ši sistema apima tris pagrindinius komponentus: žmogų, kuris pasižymi tam tikrais fiziologiniais, kognityviniais ir elgsenos parametrais; transporto priemonę, kuri apibrėžia technines ir ergonomines sąlygas; bei aplinką, kuri yra dinamiška, neapibrėžta ir dažnai sunkiai prognozuojama. Svarbiausia šio modelio savybė yra tai, kad sauga ir efektyvumas priklauso ne nuo atskirų komponentų, o nuo jų tarpusavio sąveikos kokybės. Net ir esant optimalioms techninėms sąlygoms, žmogaus nuovargis ar nepalankios aplinkos sąlygos gali lemti sistemos destabilizaciją.

Darbo krūvio teorija yra dar vienas esminis konceptas, leidžiantis analizuoti vairuotojų veiklą. Darbo krūvis šiame kontekste apibrėžiamas kaip santykis tarp užduoties reikalavimų ir žmogaus gebėjimų juos įvykdyti. Šis santykis nėra pastovus – jis kinta priklausomai nuo aplinkos sudėtingumo, darbo trukmės, psichofiziologinės būklės ir kitų veiksnių. Ypač svarbus yra kognityvinis darbo krūvis, kuris susijęs su informacijos apdorojimo intensyvumu ir sprendimų priėmimo sudėtingumu. Empiriniai tyrimai rodo, kad egzistuoja optimalus darbo krūvio lygis, kuriame veiklos efektyvumas yra maksimalus. Nukrypimai nuo šio lygio, tiek į mažesnę, tiek į didesnę pusę, gali lemti veiklos pablogėjimą. Šis principas aiškiai atsispindi Yerkes–Dodson dėsnyje, kuris apibūdina nelinearinį ryšį tarp aktyvumo (arba streso) ir veiklos efektyvumo.

Žmogiškojo faktoriaus teorija suteikia papildomą pagrindą suprasti klaidų atsiradimo mechanizmus. Vairuotojų klaidos nėra atsitiktinės – jos dažniausiai kyla dėl sisteminių veiksnių, tokių kaip nuovargis, stresas ar netinkamas darbo organizavimas (Augėnas, 2015: 41). Klasikinė klaidų klasifikacija išskiria įgūdžių, taisyklių taikymo ir sprendimų klaidas, kurios atitinka skirtingus kognityvinio apdorojimo lygius. Ši klasifikacija leidžia identifikuoti, kokie veiksniai lemia konkrečių klaidų atsiradimą ir kokios intervencijos galėtų būti efektyviausios. Pavyzdžiui, dėmesio sutrikimai dažniau siejami su nuovargiu, o sprendimų klaidos – su nepakankama informacija ar netinkamu situacijos vertinimu.

Kompleksinių sistemų teorija dar labiau praplečia šį supratimą, pabrėždama, kad transporto sistema pasižymi nelinearinėmis sąveikomis ir emergentinėmis savybėmis. Tai reiškia, kad nedideli pokyčiai viename sistemos elemente gali sukelti disproporcingai didelį poveikį visai sistemai. Pavyzdžiui, nedidelis reakcijos laiko padidėjimas dėl nuovargio gali kritinėje situacijoje lemti eismo įvykį. Tokios sistemos pasižymi dideliu jautrumu pradinių sąlygų pokyčiams, todėl jų analizė reikalauja tikimybinio ir dinaminio modeliavimo metodų (Ahmad et al., 2026: 9).

Svarbus aspektas yra tai, kad rizika šiose sistemose nėra statinė – ji nuolat kinta priklausomai nuo vairuotojo būklės, aplinkos sąlygų ir technologinių veiksnių. Todėl tradiciniai deterministiniai modeliai vis dažniau keičiami tikimybiniais ir daugiakriteriniais metodais, leidžiančiais geriau atspindėti realaus pasaulio variabilumą. Tokie modeliai leidžia ne tik vertinti esamą situaciją, bet ir prognozuoti galimus scenarijus, kas yra ypač svarbu saugos valdymo kontekste.

Apibendrinant galima teigti, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika yra daugiamatė ir dinamiška sistema, kurios analizė reikalauja integruoto teorinio požiūrio. Žmogaus–transporto priemonės–aplinkos modelis, darbo krūvio teorija, žmogiškojo faktoriaus analizė ir kompleksinių sistemų teorija sudaro pagrindą, leidžiantį suprasti šios veiklos mechanizmus. Šių teorinių modelių integracija leidžia ne tik paaiškinti esamus reiškinius, bet ir identifikuoti pagrindines rizikos formavimosi priežastis bei kurti efektyvias intervencijas.

Ateities tyrimų kontekste vis didesnę reikšmę įgauna integruotų modelių kūrimas, kurie apimtų tiek žmogaus būklės, tiek technologinių sistemų, tiek aplinkos veiksnių sąveiką. Taip pat pastebima tendencija pereiti prie duomenimis grįstų modelių, naudojančių realaus laiko informaciją ir dirbtinio intelekto metodus. Tokie modeliai leidžia dinamiškai vertinti riziką ir adaptuoti sprendimus, atsižvelgiant į besikeičiančias sąlygas. Todėl teorinių pagrindų plėtra tampa ne tik akademiniu, bet ir praktiniu iššūkiu, siekiant kurti saugesnes, efektyvesnes ir tvaresnes transporto sistemas.

Psichofiziologiniai veiksniai

Psichofiziologiniai veiksniai yra vienas svarbiausių profesionalių vairuotojų darbo specifikos komponentų, kuris lemia tiek eismo saugą, tiek darbo efektyvumą ir ilgalaikę darbuotojų sveikatą. Vairuotojo veikla pasižymi nuolatine sąveika tarp fiziologinių procesų ir kognityvinių funkcijų, todėl šių veiksnių analizė turi būti grindžiama integruotu požiūriu, apimančiu neuroergonomiką, darbo fiziologiją ir kognityvinę psichologiją. Skirtingai nei fizinis krūvis, kuris yra gana lengvai išmatuojamas, psichofiziologinis krūvis pasižymi dideliu kintamumu ir priklausomybe nuo individualių savybių, darbo sąlygų bei aplinkos veiksnių.

Vienas iš pagrindinių psichofiziologinių veiksnių yra nuovargis, kuris laikomas vienu reikšmingiausių saugos rizikos determinantų transporto sektoriuje. Nuovargis yra kompleksinis reiškinys, apimantis tiek fiziologinius, tiek kognityvinius aspektus. Fiziologinis nuovargis dažniausiai siejamas su ilgalaikiu statiniu krūviu, kuris būdingas vairuotojų darbui dėl ilgo sėdėjimo ir riboto judėjimo. Tuo tarpu kognityvinis nuovargis atsiranda dėl nuolatinio dėmesio koncentravimo, informacijos apdorojimo ir sprendimų priėmimo poreikio. Ypač svarbus yra miego trūkumo sukeltas nuovargis, kuris gali turėti eksponentinį poveikį reakcijos laikui ir sprendimų kokybei (Darma et al., 2026: 5).

Empiriniai tyrimai rodo, kad nuovargis tiesiogiai veikia pagrindinius vairavimo parametrus, tokius kaip reakcijos laikas, dėmesio stabilumas ir situacinis suvokimas. Net ir nedidelis reakcijos laiko padidėjimas gali turėti kritinių pasekmių, ypač esant sudėtingoms eismo situacijoms (Gabrišiūnas, 2017: 32). Be to, nuovargis gali sukelti mikro-miego epizodus, kurie yra ypač pavojingi, nes jų metu vairuotojas trumpam praranda sąmoningą kontrolę. Šie epizodai dažnai pasireiškia monotoniškose situacijose, pavyzdžiui, važiuojant ilgais maršrutais ar esant mažam eismo intensyvumui (Wang et al., 2026: 11).

Kitas svarbus psichofiziologinis veiksnys yra stresas, kuris visuomeninio transporto kontekste dažnai yra nuolatinis ir daugialypis. Vairuotojai susiduria su įvairiais streso šaltiniais, įskaitant intensyvų eismą, laiko spaudimą, socialinę sąveiką su keleiviais ir nenumatytas situacijas. Stresas gali turėti tiek trumpalaikį, tiek ilgalaikį poveikį. Trumpuoju laikotarpiu jis gali padidinti budrumą ir reakcijos greitį, tačiau ilgalaikis stresas lemia kognityvinių funkcijų pablogėjimą, emocinį išsekimą ir padidėjusią klaidų tikimybę.

Kognityvinė apkrova yra glaudžiai susijusi su stresu ir nuovargiu, tačiau turi savarankišką reikšmę. Ji apibrėžiama kaip informacijos kiekis, kurį vairuotojas turi apdoroti per tam tikrą laiką, ir yra tiesiogiai susijusi su darbo aplinkos sudėtingumu. Didelė kognityvinė apkrova gali lemti informacijos filtravimo sutrikimus, sprendimų priėmimo klaidas ir situacinio suvokimo praradimą. Tačiau svarbu pažymėti, kad ir per maža apkrova gali būti pavojinga, nes ji sukelia monotoniją ir mažina dėmesio koncentraciją. Todėl optimalus kognityvinės apkrovos lygis yra kritinis veiksnys užtikrinant saugų vairavimą.

Reakcijos laikas yra vienas svarbiausių rodiklių, atspindinčių psichofiziologinę būklę. Jis priklauso nuo daugelio veiksnių, įskaitant nuovargį, stresą ir informacijos apdorojimo greitį. Tipinėmis sąlygomis reakcijos laikas svyruoja nuo 0,7 iki 1,5 sekundės, tačiau esant nuovargiui gali reikšmingai padidėti. Šis padidėjimas turi disproporcingai didelį poveikį saugai, nes kritinėse situacijose net nedidelis vėlavimas gali lemti nesugebėjimą išvengti susidūrimo. Reakcijos laiko variacija taip pat rodo, kad vairuotojo būklė nėra pastovi ir gali keistis net per vieną darbo pamainą.

Dėmesio mechanizmai yra dar vienas svarbus psichofiziologinis aspektas. Vairavimas reikalauja kelių dėmesio tipų sąveikos, įskaitant selektyvų, padalintą ir nuolatinį dėmesį. Selektyvus dėmesys leidžia filtruoti

nereikšmingą informaciją, padalintas dėmesys – vienu metu apdoroti kelis informacijos šaltinius, o nuolatinis dėmesys – išlaikyti koncentraciją ilgą laiką. Šių mechanizmų disbalansas gali lemti klaidų atsiradimą, ypač esant dideliam darbo krūviui ar nuovargiui.

Cirkadiniai ritmai ir pamaininis darbas taip pat turi reikšmingą poveikį vairuotojų psichofiziologinei būklei. Žmogaus organizmas yra pritaikytas veikti pagal natūralų paros ritmą, todėl darbas nakties metu ar ankstyvomis ryto valandomis gali sukelti budrumo sumažėjimą ir miego kokybės pablogėjimą. Ypač kritinis laikotarpis yra tarp 2 ir 6 valandos ryto, kai organizmo fiziologiniai rodikliai pasiekia žemiausią lygį. Pamaininis darbas trikdo šiuos ritmus ir gali sukelti ilgalaikius sveikatos sutrikimus, įskaitant metabolinius ir širdies bei kraujagyslių sistemos sutrikimus.

Psichofiziologinių būklių vertinimas yra sudėtingas procesas, reikalaujantis įvairių metodų integracijos. Fiziologiniai rodikliai, tokie kaip širdies ritmo variabilumas, elektroencefalografija ar akių judesių analizė, leidžia objektyviai įvertinti vairuotojo būklę. Tačiau šie metodai dažnai yra sudėtingi ir reikalauja specializuotos įrangos. Todėl praktikoje dažnai naudojami subjektyvūs metodai, tokie kaip klausimynai ar savijautos vertinimai, nors jie gali būti mažiau tikslūs. Elgsenos rodikliai, pavyzdžiui, vairavimo trajektorijos svyravimai ar reakcijos laiko matavimai, suteikia papildomos informacijos apie realią vairuotojo būklę (Hao et al., 2026: 14).

Svarbus aspektas yra psichofiziologinių veiksnių sąveika su kitais darbo specifikos elementais. Nuovargis ir stresas gali ne tik tiesiogiai didinti eismo įvykių tikimybę, bet ir netiesiogiai veikti vairavimo stilių, didindami kuro sąnaudas ir emisijas (Useche et al., 2018: 7-8). Taip pat jie gali paveikti keleivių aptarnavimo kokybę ir bendrą transporto sistemos efektyvumą. Tai rodo, kad psichofiziologiniai veiksniai turi būti vertinami ne izoliuotai, o kaip integruotos sistemos dalis.

Pastaraisiais metais stebima aiški tendencija pereiti nuo reaktyvaus prie proaktyvaus psichofiziologinių veiksnių valdymo. Tradiciškai vairuotojų būklė buvo vertinama retrospektyviai, analizuojant įvykusius incidentus, tačiau naujos technologijos leidžia realiu laiku stebėti vairuotojo būklę ir prognozuoti galimas rizikas. Dirbtinio intelekto ir didžiųjų duomenų analizės metodai suteikia galimybę kurti adaptacines sistemas, kurios gali automatiškai identifikuoti nuovargio ar streso požymius ir inicijuoti prevencines priemones (Chen et al., 2026: 6-7).

Ateities tyrimų kontekste svarbu plėtoti individualizuotus modelius, kurie atsižvelgtų į vairuotojų fiziologinius ir psichologinius skirtumus. Skirtingi žmonės skirtingai reaguoja į darbo krūvį, todėl vienodi sprendimai gali būti neefektyvūs. Taip pat būtina integruoti psichofiziologinius duomenis su kitais parametrais, tokiais kaip darbo organizavimas, technologijos ir aplinkos veiksniai, siekiant sukurti holistinį rizikos vertinimo modelį.

Apibendrinant galima teigti, kad psichofiziologiniai veiksniai yra esminė profesionalių vairuotojų darbo specifikos dalis, lemianti veiklos ribas ir saugos lygį. Jų poveikis yra daugialypis, dinamiškas ir dažnai nelinearinis, todėl efektyvus jų valdymas reikalauja integruoto, duomenimis grįsto ir individualizuoto požiūrio. Šių veiksnių analizė sudaro pagrindą tolesniems tyrimams, orientuotiems į ergonomikos, darbo organizavimo ir technologinių sprendimų optimizavimą.

Ergonominiai ir biomechaniniai aspektai

Ergonominiai ir biomechaniniai veiksniai sudaro vieną iš esminių profesionalių vairuotojų darbo specifikos komponentų, kuris tiesiogiai veikia tiek darbuotojų sveikatą, tiek jų darbo efektyvumą ir netiesiogiai – eismo saugą. Visuomeninio transporto vairuotojų darbo pobūdis pasižymi ilgalaikiu statiniu krūviu, ribotu judrumu ir nuolatiniu mechaninių veiksnių, tokių kaip vibracija, poveikiu. Šių veiksnių kompleksinė sąveika lemia kumuliacinį poveikį žmogaus organizmui, kuris dažnai pasireiškia tik po ilgesnio laiko, tačiau turi ilgalaikes pasekmes.

Vienas pagrindinių ergonominių iššūkių yra ilgalaikis sėdėjimas, kuris yra neišvengiama vairuotojų darbo dalis. Skirtingai nei dinaminės veiklos, kuriose raumenų grupės nuolat kinta, statinis sėdėjimas sukelia pastovų tam tikrų raumenų grupių įtempimą ir riboja kraujotaką. Biomechaniškai tai reiškia, kad stuburo juosmens dalis, ypač L4–L5 segmentai, patiria padidintą apkrovą, kuri ilgainiui gali lemti degeneracinius pokyčius. Be to, dėl riboto judėjimo sumažėja raumenų aktyvumas, o tai dar labiau apsunkina kraujo cirkuliaciją ir skatina nuovargio kaupimąsi.

Svarbus aspektas yra tai, kad vairuotojų laikysena dažnai nėra ideali. Vairo, pedalų ir valdymo elementų išdėstymas lemia tam tikrą asimetriją kūno padėtyje, kuri ilgainiui gali sukelti disbalansą tarp raumenų grupių. Tokia asimetrija gali būti subtili, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje ji tampa reikšmingu veiksniu, prisidedančiu prie lėtinių nugaros, kaklo ir pečių skausmų atsiradimo. Epidemiologiniai tyrimai patvirtina, kad profesionalūs vairuotojai dažniau nei kitų profesijų atstovai patiria raumenų ir skeleto sistemos sutrikimus, kurie tiesiogiai susiję su darbo pobūdžiu.

Ne mažiau svarbus biomechaninis veiksnys yra viso kūno vibracija, kuri yra nuolatinė vairuotojų darbo aplinkos dalis. Vibracija atsiranda dėl kelio dangos nelygumų, transporto priemonės konstrukcinių savybių ir važiavimo režimo. Jos poveikis priklauso nuo dažnio, amplitudės ir trukmės, o ilgesnis poveikis gali turėti reikšmingų pasekmių. Ypač pavojingi yra rezonansiniai dažniai, kurie sutampa su žmogaus kūno natūraliais svyravimais, nes tokiu atveju vibracijos poveikis sustiprėja. Tokios sąlygos gali skatinti stuburo diskų degeneraciją, didinti raumenų nuovargį ir mažinti bendrą fizinį komfortą.

Svarbu pabrėžti, kad vibracija veikia ne tik raumenų ir skeleto sistemą, bet ir centrinę nervų sistemą. Tyrimai rodo, kad ilgalaikis vibracijos poveikis gali turėti įtakos kognityvinėms funkcijoms, mažinti dėmesio koncentraciją ir didinti nuovargį. Tai reiškia, kad biomechaniniai veiksniai gali turėti tiesioginį poveikį psichofiziologinei būklei, o per ją – ir eismo saugai.

Darbo vietos ergonomika yra dar vienas kritinis aspektas, lemiantis vairuotojų darbo kokybę. Vairuotojo kabinos dizainas turi užtikrinti optimalias darbo sąlygas, atsižvelgiant į žmogaus antropometrinius parametrus ir biomechaninius principus. Sėdynės reguliavimo galimybės, vairo padėtis, pedalų išdėstymas ir valdymo elementų pasiekiamumas turi būti pritaikyti taip, kad sumažintų fizinį krūvį ir leistų išlaikyti neutralią kūno padėtį. Tačiau praktikoje dažnai pasitaiko situacijų, kai darbo vieta nėra tinkamai pritaikyta individualiems poreikiams, o tai lemia padidintą raumenų įtampą ir greitesnį nuovargio atsiradimą.

Ergonomikos problemos dažnai yra susijusios su projektavimo sprendimais, kurie ne visada atsižvelgia į realias darbo sąlygas. Pavyzdžiui, valdymo elementų išdėstymas gali būti optimizuotas techniniu požiūriu, tačiau nepakankamai įvertinti žmogaus judesių ribotumai ar pasikartojančių veiksmų poveikis. Tai ypač aktualu moderniose transporto priemonėse, kuriose integruojama vis daugiau technologinių sprendimų, didinančių informacijos kiekį ir sąveikos sudėtingumą.

Raumenų ir skeleto sistemos sutrikimai yra viena dažniausių profesionalių vairuotojų sveikatos problemų. Šie sutrikimai atsiranda dėl ilgalaikio statinio krūvio, vibracijos ir pasikartojančių mikrojudesių kombinacijos. Dažniausiai pasireiškia apatinės nugaros dalies skausmas, kaklo ir pečių įtampa bei rankų ir riešų perkrovos sindromai. Šių sutrikimų vystymasis yra laipsniškas ir dažnai nepastebimas ankstyvose stadijose, tačiau ilgainiui jie gali reikšmingai sumažinti darbo našumą ir net lemti profesinį nedarbingumą.

Svarbus aspektas yra ergonominių ir psichofiziologinių veiksnių tarpusavio sąveika. Fizinis diskomfortas gali didinti stresą ir mažinti dėmesio koncentraciją, o tai tiesiogiai veikia sprendimų priėmimo kokybę. Tuo pačiu metu psichofiziologinis nuovargis gali keisti laikyseną ir judesių koordinaciją, didindamas biomechaninį krūvį. Ši abipusė sąveika rodo, kad ergonomika ir psichofiziologija turi būti vertinamos kaip integruota sistema, o ne kaip atskiros sritys (D. D. Nguyen et al., 2026: 5-6).

Pastaraisiais metais ergonomikos srityje pastebima tendencija pereiti nuo standartizuotų sprendimų prie individualizuoto darbo vietos pritaikymo. Naujos technologijos leidžia kurti reguliuojamas sėdynes, adaptyvias valdymo sistemas ir vibracijos slopinimo sprendimus, kurie gali būti pritaikyti konkretaus vairuotojo poreikiams. Taip pat vis plačiau taikomi skaitmeniniai modeliai ir biomechaninės simuliacijos, leidžiančios įvertinti darbo vietos ergonomiką dar projektavimo stadijoje (Kim & Kim, 2026: 7-8).

Ateities tyrimų kontekste svarbu plėtoti integruotus ergonominius modelius, kurie apimtų ne tik fizinius, bet ir kognityvinius bei organizacinius veiksnius. Pavyzdžiui, darbo vietos dizainas turėtų būti vertinamas ne tik pagal fizinį komfortą, bet ir pagal jo poveikį dėmesio koncentracijai, reakcijos laikui ir sprendimų priėmimui. Taip pat būtina integruoti realaus laiko duomenis apie vairuotojų būklę, siekiant dinamiškai pritaikyti darbo sąlygas.

Apibendrinant galima teigti, kad ergonominiai ir biomechaniniai veiksniai yra kritiniai profesionalių vairuotojų darbo specifikos elementai, turintys ilgalaikį ir kumuliacinį poveikį sveikatai ir darbo efektyvumui. Jų analizė rodo, kad net ir nedideli ergonominiai trūkumai ilgainiui gali sukelti reikšmingų problemų, todėl būtina sisteminė ir integruota šių veiksnių analizė. Efektyvus ergonomikos valdymas ne tik mažina traumų ir ligų riziką, bet ir prisideda prie saugesnės, efektyvesnės ir tvaresnės transporto sistemos kūrimo.

Sauga ir rizikos veiksniai

Eismo sauga visuomeniniame transporte yra kompleksinis reiškinys, kurį lemia daugelio tarpusavyje susijusių veiksnių sąveika. Profesionalių vairuotojų veikla šioje sistemoje užima centrinę vietą, nes būtent jų sprendimai ir reakcijos realiu laiku daro tiesioginę įtaką eismo įvykių tikimybei ir jų pasekmių sunkumui. Skirtingai nei techniniai ar infrastruktūriniai veiksniai, žmogiškasis faktorius pasižymi dideliu variabilumu ir jautrumu vidinėms bei išorinėms sąlygoms, todėl jo analizė yra ypač svarbi siekiant suprasti saugos mechanizmus.

Moksliniai tyrimai nuosekliai rodo, kad eismo įvykiai retai yra vieno veiksnio rezultatas – dažniausiai jie atsiranda dėl kelių veiksnių kombinacijos. Šie veiksniai tradiciškai skirstomi į tris pagrindines grupes: žmogiškuosius, techninius ir aplinkos. Nors techniniai gedimai ar nepalankios oro sąlygos gali prisidėti prie avarijų, dauguma tyrimų patvirtina, kad žmogiškasis faktorius tiesiogiai arba netiesiogiai dalyvauja didžiojoje dalyje eismo įvykių. Tai reiškia, kad vairuotojo būklė, elgsena ir sprendimų priėmimo kokybė yra kritiniai saugos elementai.

Žmogiškojo faktoriaus analizė rodo, kad klaidos vairavimo procese nėra atsitiktinės, bet dažnai yra sisteminių sąlygų pasekmė. Kognityvinės psichologijos požiūriu vairuotojų klaidos gali būti suskirstytos į kelias kategorijas, atspindinčias skirtingus informacijos apdorojimo lygius. Įgūdžių klaidos dažniausiai susijusios su dėmesio trūkumu ar automatinių veiksmų sutrikimu, taisyklių taikymo klaidos atsiranda netinkamai interpretuojant situaciją, o sprendimų klaidos siejamos su neteisingu situacijos vertinimu ar informacijos trūkumu. Ši klasifikacija leidžia suprasti, kad skirtingos klaidos kyla dėl skirtingų priežasčių, todėl jų prevencija reikalauja diferencijuotų priemonių (Liu et al., 2026: 5-6).

Vienas iš svarbiausių rizikos veiksnių yra nuovargis, kuris tiesiogiai veikia vairuotojo gebėjimą adekvačiai reaguoti į eismo situacijas. Nuovargis mažina budrumą, lėtina reakcijos laiką ir didina sprendimų klaidų tikimybę. Empiriniai tyrimai rodo, kad rizika didėja ne linijiniu, o eksponentiniu būdu, ypač ilgėjant darbo laikui ir mažėjant poilsio intervalams. Kritinės ribos dažniausiai siejamos su ilgesnėmis nei 8–10 valandų darbo pamainomis ir nepakankamu poilsiu tarp jų. Ši nelinearinė priklausomybė rodo, kad net nedideli darbo organizavimo pokyčiai gali turėti disproporcingai didelį poveikį saugai.

Stresas yra dar vienas svarbus rizikos veiksnys, kuris dažnai veikia kartu su nuovargiu. Intensyvus eismas, laiko spaudimas ir socialinė sąveika su keleiviais sukuria nuolatinį stresinį foną, kuris gali pabloginti kognityvines funkcijas. Nors trumpalaikis stresas gali padidinti budrumą, ilgalaikis jo poveikis dažniausiai yra neigiamas, nes jis mažina sprendimų kokybę ir didina klaidų tikimybę. Be to, stresas gali skatinti rizikingą elgseną, pavyzdžiui, staigų greitėjimą ar neadekvačius manevrus, kurie didina eismo įvykių tikimybę.

Rizikos analizėje svarbi vieta tenka matematiniams ir statistiniams modeliams, kurie leidžia kiekybiškai įvertinti skirtingų veiksnių poveikį. Tikimybiniai modeliai leidžia nustatyti eismo įvykių tikimybę, atsižvelgiant į įvairius parametrus, tokius kaip nuovargis, darbo krūvis ar streso lygis. Regresiniai modeliai suteikia galimybę įvertinti kiekvieno veiksnio santykinę įtaką, o sisteminės analizės metodai, tokie kaip „Swiss cheese“ modelis, leidžia suprasti, kaip kelių nepriklausomų klaidų kombinacija gali lemti avariją. Šie modeliai rodo, kad sauga yra ne vieno veiksnio funkcija, o kompleksinės sistemos rezultatas.

Darbo organizavimas yra vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių rizikos lygį. Ilgos darbo valandos, nereguliarūs grafikai ir didelis darbo intensyvumas sukuria sąlygas, kurios didina nuovargį ir kognityvinę apkrovą. Be to, laiko spaudimas gali skatinti vairuotojus priimti rizikingus sprendimus, siekiant kompensuoti vėlavimus. Socialiniai veiksniai, tokie kaip konfliktai su keleiviais, taip pat gali turėti įtakos dėmesio koncentracijai ir sprendimų priėmimui, todėl jie turi būti vertinami kaip svarbus saugos elementas.

Technologijų plėtra suteikia naujų galimybių mažinti riziką, tačiau tuo pačiu įveda ir naujų iššūkių. Pažangios vairuotojo pagalbos sistemos gali sumažinti klaidų tikimybę ir padėti išvengti kritinių situacijų, tačiau jos taip pat gali mažinti vairuotojo budrumą dėl automatizacijos efekto. Per didelis pasitikėjimas technologijomis gali lemti situacinio suvokimo praradimą, o tai ypač pavojinga situacijose, kai reikia greitai perimti kontrolę. Todėl technologijų integracija turi būti grindžiama žmogaus veiksnių principais, siekiant išlaikyti optimalų žmogaus ir sistemos sąveikos balansą.

Svarbus aspektas yra rizikos nelinearišKumas ir dinamiškumas. Skirtingi veiksniai sąveikauja tarpusavyje ir gali stiprinti vienas kito poveikį. Pavyzdžiui, nuovargis gali padidinti streso poveikį, o stresas – skatinti rizikingą elgseną. Tokia sąveika lemia, kad rizika negali būti vertinama kaip statinis dydis – ji nuolat kinta priklausomai nuo vairuotojo būklės, darbo sąlygų ir aplinkos veiksnių. Todėl efektyvus saugos valdymas reikalauja dinaminio ir adaptacinio požiūrio.

Integruotas rizikos modelis leidžia apibendrinti šiuos procesus ir suprasti, kad sauga yra kompleksinės sistemos funkcija, kurioje dalyvauja psichofiziologiniai, ergonominiai, organizaciniai ir technologiniai veiksniai. Šis modelis pabrėžia, kad vieno veiksnio optimizavimas nėra pakankamas, jei ignoruojami kiti sistemos komponentai. Pavyzdžiui, technologijų diegimas gali būti neefektyvus, jei nebus sprendžiamos darbo organizavimo ar ergonomikos problemos.

Pastaraisiais metais saugos tyrimuose vis didesnis dėmesys skiriamas proaktyviam rizikos valdymui. Tradiciniai metodai, orientuoti į įvykusių avarijų analizę, palaipsniui keičiami metodais, kurie leidžia identifikuoti riziką dar prieš jai realizuojantis. Realiojo laiko duomenų analizė, telematika ir dirbtinio intelekto sprendimai suteikia galimybę nuolat stebėti vairuotojo būklę ir elgseną, identifikuoti rizikingus

modelius ir taikyti prevencines priemones. Tokie metodai leidžia pereiti nuo reaktyvaus prie adaptacinio saugos valdymo.

Ateities tyrimų kryptys rodo, kad saugos analizė vis labiau integruojama su kitomis sritimis, tokiomis kaip aplinkosauga ir efektyvumas. Vairuotojų elgsena turi įtakos ne tik saugai, bet ir kuro sąnaudoms bei emisijoms, todėl būtina kurti modelius, kurie vienu metu vertintų kelis kriterijus. Taip pat svarbu plėtoti individualizuotus rizikos modelius, kurie atsižvelgtų į vairuotojų fiziologinius ir psichologinius skirtumus.

Apibendrinant galima teigti, kad eismo sauga visuomeniniame transporte yra kompleksinis ir dinamiškas reiškinys, kurio pagrindinis elementas yra žmogiškasis faktorius. Nuovargis, stresas, darbo organizavimas ir technologijos sudaro tarpusavyje susijusių veiksnių sistemą, kuri lemia bendrą rizikos lygį. Efektyvus saugos valdymas reikalauja integruoto požiūrio, kuris apimtų visus šiuos veiksnius ir leistų kurti adaptacines, duomenimis grįstas sprendimų sistemas.

Darbo organizavimas ir socialiniai aspektai

Darbo organizavimas ir socialiniai aspektai yra vieni svarbiausių, tačiau dažnai nepakankamai įvertinamų profesionalių vairuotojų darbo specifikos komponentų, turinčių tiesioginę įtaką psichofiziologinei būklei, darbo efektyvumui ir eismo saugai. Skirtingai nei techniniai ar ergonominiai veiksniai, kurie dažniausiai yra lengviau identifikuojami ir kvantifikuojami, organizaciniai ir socialiniai aspektai pasižymi didesniu kompleksiniu pobūdžiu, nes integruoto požiūrio, apimančio darbo psichologiją, organizacijų valdymą ir transporto sistemų analizę. jie susiję su žmogaus elgsena, motyvacija, darbo kultūra ir instituciniu reguliavimu (Tautkevičienė, 2023: 34-35).

Vienas iš pagrindinių darbo organizavimo elementų yra darbo grafikai, kurie visuomeninio transporto sektoriuje dažniausiai grindžiami pamaininiu darbo principu. Tokia darbo struktūra yra būtina siekiant užtikrinti nenutrūkstamą transporto paslaugų teikimą, tačiau ji sukuria papildomų iššūkių vairuotojų psichofiziologinei būklei. Nereguliarūs grafikai, ankstyvos rytinės ar naktinės pamainos trikdo natūralius cirkadinius ritmus, o tai lemia sumažėjusį budrumą, miego kokybės pablogėjimą ir bendrą organizmo adaptacijos sutrikimą. Šie veiksniai tiesiogiai susiję su padidėjusia klaidų tikimybe ir eismo saugos rizika.

Darbo trukmė ir poilsio režimas yra glaudžiai susiję su nuovargio kaupimu. Ilgos darbo pamainos, ypač viršijančios 8–10 valandų, lemia eksponentinį nuovargio didėjimą, kuris neigiamai veikia reakcijos laiką, dėmesio koncentraciją ir sprendimų priėmimo kokybę. Tuo tarpu nepakankamas poilsio laikas tarp pamainų neleidžia organizmui pilnai atsistatyti, todėl nuovargis tampa kumuliaciniu reiškiniu. Tyrimai rodo, kad optimalus darbo ir poilsio balansas yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių saugų ir efektyvų vairavimą. Be to, vis dažniau pabrėžiama individualizuotų darbo grafikų svarba, atsižvelgiant į darbuotojų chronotipą ir fiziologinius ypatumus.

Darbo intensyvumas yra dar vienas svarbus organizacinis veiksnys, kuris tiesiogiai veikia vairuotojų kognityvinę apkrovą ir emocinę būklę. Visuomeninio transporto vairuotojai dažnai dirba laikydamiesi griežtų tvarkaraščių, kurie ne visada atitinka realias eismo sąlygas. Dėl to atsiranda nuolatinis laiko spaudimas, kuris skatina vairuotojus priimti greitus ir kartais rizikingus sprendimus, siekiant išvengti vėlavimų. Toks spaudimas gali lemti agresyvesnį vairavimo stilių, padidinti streso lygį ir sumažinti sprendimų racionalumą. Be to, didelis darbo intensyvumas riboja galimybes daryti pertraukas, kurios yra būtinos nuovargio mažinimui.

Socialiniai aspektai yra neatsiejama vairuotojų darbo dalis, ypač visuomeniniame transporte, kur vairuotojai nuolat bendrauja su keleiviais. Ši sąveika gali būti tiek teigiama, tiek neigiama, tačiau konfliktinės situacijos ir agresyvus keleivių elgesys yra dažnas streso šaltinis. Tokios situacijos reikalauja ne tik profesinių įgūdžių, bet ir emocinės savireguliacijos, kuri ilgainiui gali sukelti emocinį išsekimą (Kuzmarskienė, 2024). Socialinis stresas gali nukreipti dėmesį nuo pagrindinės užduoties – saugaus vairavimo, o tai tiesiogiai didina eismo įvykių riziką.

Profesinis perdegimas yra ilgalaikio streso ir nepalankių darbo sąlygų pasekmė, kuri vis dažniau identifikuojama transporto sektoriuje. Perdegimas pasireiškia emociniu išsekimu, sumažėjusiu darbo motyvacijos lygiu ir depersonalizacija, kai darbuotojas tampa abejingas savo darbui ir aplinkai. Šis reiškinys turi tiesioginį poveikį darbo kokybei ir saugai, nes mažėja dėmesio koncentracija, didėja klaidų tikimybė ir mažėja atsakomybės jausmas. Be to, perdegimas yra susijęs su didesniu darbuotojų kaitos lygiu, kuris sukuria papildomų iššūkių organizacijoms.

Organizacinė kultūra ir valdymo praktikos taip pat daro reikšmingą įtaką vairuotojų darbo sąlygoms. Saugos kultūra organizacijoje apibrėžia, kaip darbuotojai suvokia saugą ir kaip jie elgiasi kritinėse situacijose. Organizacijos, kurios skiria dėmesį darbuotojų gerovei, mokymams ir grįžtamajam ryšiui, dažniausiai pasižymi aukštesniu saugos lygiu. Priešingai, organizacijos, kuriose dominuoja tik ekonominiai tikslai ir ignoruojami žmogaus veiksniai, dažniau susiduria su saugos problemomis.

Svarbus aspektas yra organizacinių ir psichofiziologinių veiksnių tarpusavio sąveika. Netinkamai suorganizuotas darbas gali sukelti nuovargį ir stresą, kurie savo ruožtu veikia kognityvines funkcijas ir didina klaidų tikimybę. Ši sąveika yra nelinearinė, nes keli veiksniai gali stiprinti vienas kito poveikį. Pavyzdžiui, ilgos darbo valandos kartu su dideliu darbo intensyvumu gali sukelti disproporcingai didelį nuovargio lygį, palyginti su kiekvieno veiksnio poveikiu atskirai.

Pastaraisiais metais darbo organizavimo tyrimuose vis didesnis dėmesys skiriamas sisteminiam požiūriui, kuris leidžia vertinti ne tik individualius veiksnius, bet ir jų sąveiką. Tokie modeliai leidžia identifikuoti kritinius taškus sistemoje, kuriuose intervencijos gali turėti didžiausią poveikį. Pavyzdžiui, darbo grafikų optimizavimas gali būti efektyvesnė priemonė nei technologijų diegimas, jei pagrindinė problema yra nuovargis.

Technologijų integracija taip pat keičia darbo organizavimo pobūdį. Telematikos sistemos leidžia stebėti vairuotojų veiklą realiu laiku, analizuoti jų elgseną ir teikti grįžtamąjį ryšį. Tai suteikia galimybę ne tik identifikuoti problemas, bet ir taikyti prevencines priemones. Tačiau svarbu užtikrinti, kad šios technologijos būtų naudojamos ne kaip kontrolės, o kaip pagalbos priemonė, nes priešingu atveju jos gali didinti stresą ir mažinti darbuotojų pasitenkinimą darbu.

Ateities tyrimų kontekste svarbu plėtoti individualizuotus darbo organizavimo modelius, kurie atsižvelgtų į vairuotojų fiziologinius ir psichologinius skirtumus. Taip pat būtina integruoti darbo organizavimo aspektus su kitais veiksniais, tokiais kaip ergonomika ir technologijos, siekiant sukurti holistinį darbo aplinkos modelį. Dirbtinio intelekto ir didžiųjų duomenų analizės metodai gali suteikti naujų galimybių optimizuoti darbo grafikus, prognozuoti nuovargį ir adaptuoti darbo sąlygas realiu laiku.

Apibendrinant galima teigti, kad darbo organizavimas ir socialiniai aspektai yra kritiniai veiksniai, formuojantys profesionalių vairuotojų darbo aplinką ir saugos lygį. Jų poveikis yra kompleksinis ir dažnai netiesioginis, tačiau labai reikšmingas. Efektyvus šių veiksnių valdymas reikalauja sisteminio požiūrio, kuris apimtų ne tik organizacinius sprendimus, bet ir žmogaus veiksnių integraciją į visą transporto sistemą.

Diskusija

Atlikta analizė leidžia teigti, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika visuomeniniame transporte yra kompleksinė, daugiamatė ir dinamiška sistema, kurios veikimą lemia glaudi psichofiziologinių, ergonominių ir organizacinių veiksnių sąveika. Skirtingi aspektai, nagrinėti ankstesniuose skyriuose, negali būti interpretuojami kaip izoliuoti komponentai, nes jų poveikis pasireiškia tik per sisteminę sąveiką, kuri lemia galutinį saugos rezultatą. Todėl diskusija orientuojama į integruotą šių veiksnių vertinimą, išryškinant pagrindinius mechanizmus, lemiančius rizikos formavimąsi.

Vienas esminių šio tyrimo aspektų yra tai, kad vairuotojų darbo specifika negali būti adekvačiai vertinama redukcionistiniu požiūriu, kai atskiri veiksniai analizuojami nepriklausomai vienas nuo kito. Psichofiziologiniai procesai, tokie kaip nuovargis ir stresas, yra tiesiogiai susiję su darbo organizavimu ir ergonominėmis sąlygomis. Pavyzdžiui, ilgos darbo pamainos ir nereguliarūs grafikai lemia nuovargio kaupimąsi, kuris mažina reakcijos greitį ir situacinį suvokimą. Tuo pačiu metu neoptimalios ergonominės sąlygos gali sukelti fizinį diskomfortą, kuris didina stresą ir mažina dėmesio koncentraciją. Tokia abipusė sąveika rodo, kad sauga yra ne pavienių veiksnių, o kompleksinės sistemos rezultatas.

Žmogiškasis faktorius išlieka dominuojantis saugos determinantų elementas, nepaisant technologinės pažangos. Nors techninės sistemos gali sumažinti tam tikrų klaidų tikimybę, jos negali kompensuoti žmogaus psichofiziologinės būklės svyravimų. Analizė rodo, kad klaidos dažniausiai kyla ne dėl individualių vairuotojų trūkumų, o dėl sisteminių darbo sąlygų, kurios skatina nuovargį, stresą ir kognityvinę perkrovą. Tai leidžia daryti išvadą, kad saugos valdymas turi būti orientuotas ne tik į vairuotojo elgseną, bet ir į darbo aplinkos bei organizacinių procesų optimizavimą.

Darbo organizavimas šiame kontekste išryškėja kaip vienas svarbiausių sisteminių veiksnių, turinčių tiesioginį poveikį saugai. Pamaininis darbas, ilgos darbo valandos ir laiko spaudimas sukuria sąlygas, kurios didina nuovargį ir mažina kognityvinių funkcijų efektyvumą. Ypač svarbu pažymėti, kad šių veiksnių poveikis yra nelinearinis – nedideli darbo organizavimo pokyčiai gali turėti disproporcingai didelį poveikį saugos lygiui. Tai rodo, kad efektyvus saugos valdymas turi būti grindžiamas sisteminiu darbo organizavimo optimizavimu, o ne tik pavienių problemų sprendimu.

Ergonominių veiksnių analizė taip pat patvirtina jų svarbą bendrame saugos kontekste. Nors ergonomika dažnai vertinama kaip darbuotojų sveikatos aspektas, šiame tyrime nustatyta, kad ji turi tiesioginį ryšį su kognityvinėmis funkcijomis ir sprendimų priėmimo kokybe. Ilgalaikis fizinis diskomfortas gali mažinti dėmesio koncentraciją, didinti nuovargį ir skatinti klaidų atsiradimą. Be to, ergonominiai veiksniai pasižymi kumuliaciniu poveikiu, todėl jų įtaka ilgainiui gali tapti reikšminga net ir esant nedideliems pradiniams nukrypimams nuo optimalių sąlygų.

Svarbus diskusijos aspektas yra psichofiziologinių veiksnių nelineari dinamika. Nuovargis, stresas ir kognityvinė apkrova ne tik veikia atskirai, bet ir stiprina vienas kito poveikį. Pavyzdžiui, nuovargis gali sumažinti gebėjimą susidoroti su stresu, o stresas gali padidinti kognityvinę apkrovą, kas dar labiau apsunkina sprendimų priėmimą. Tokia sąveika lemia, kad rizika didėja ne linijiniu, o eksponentiniu būdu, ypač esant kelių neigiamų veiksnių kombinacijai. Šis aspektas yra kritiškai svarbus kuriant rizikos vertinimo ir valdymo modelius (Zhou et al., 2026: 6-7).

Metodologiniu požiūriu analizė atskleidė reikšmingus tyrimų ribotumus, kurie turi būti įvertinti interpretuojant rezultatus. Vienas pagrindinių iššūkių yra tyrimų heterogeniškumas, kuris apsunkina rezultatų palyginimą ir apibendrinimą. Skirtingos metodikos, skirtingi vertinimo rodikliai ir nevienodi imčių dydžiai lemia, kad kai kurie rezultatai gali būti sunkiai interpretuojami bendrame kontekste. Be to, dauguma tyrimų yra atliekami kontroliuojamomis sąlygomis, kurios ne visada atspindi realią darbo aplinką, pasižyminčią dideliu kintamumu ir neapibrėžtumu.

Dar viena svarbi problema yra ilgalaikių tyrimų trūkumas, kuris riboja galimybę įvertinti kumuliacinį darbo sąlygų poveikį vairuotojų sveikatai ir saugai. Dauguma esamų tyrimų yra trumpalaikiai ir orientuoti į momentinius efektus, todėl nepakankamai atspindi ilgalaikes tendencijas. Tai rodo, kad ateities tyrimai turėtų būti orientuoti į longitudinalinius duomenis ir realaus laiko stebėseną, leidžiančią geriau suprasti dinamiškus procesus.

Praktiniu požiūriu atlikta analizė leidžia išskirti keletą pagrindinių krypčių, kurios gali prisidėti prie saugesnės transporto sistemos kūrimo. Pirma, būtina optimizuoti darbo organizavimą, atsižvelgiant į žmogaus fiziologinius poreikius ir darbo krūvio dinamiką. Antra, svarbu gerinti ergonomines sąlygas, siekiant sumažinti fizinį diskomfortą ir jo netiesioginį poveikį kognityvinėms funkcijoms. Trečia, būtina integruoti psichofiziologinės būklės stebėsenos metodus, kurie leistų identifikuoti rizikines būsenas dar prieš joms pasireiškiant kritinėse situacijose.

Ateities tyrimų kontekste svarbu plėtoti integruotus modelius, kurie apimtų visus pagrindinius veiksnius ir jų sąveiką. Tokie modeliai turėtų būti grindžiami realaus laiko duomenimis ir gebėti adaptuotis prie besikeičiančių sąlygų. Taip pat būtina didesnį dėmesį skirti individualizacijai, nes vairuotojų reakcijos į darbo krūvį ir stresą gali reikšmingai skirtis. Individualizuoti sprendimai galėtų padidinti tiek saugą, tiek darbo efektyvumą.

Apibendrinant galima teigti, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika yra kompleksinė sistema, kurioje sauga formuojasi dėl daugelio veiksnių sąveikos. Žmogiškasis faktorius išlieka centrinis elementas, o darbo organizavimas ir ergonomika yra pagrindiniai veiksniai, lemiantys jo būklę. Efektyvus saugos valdymas reikalauja integruoto, sisteminio ir duomenimis grįsto požiūrio, kuris leistų ne tik identifikuoti rizikas, bet ir aktyviai jas valdyti.

Išvados

1. Atlikta sisteminė analizė leidžia daryti išvadą, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika visuomeniniame transporte yra kompleksinis, daugiamatis ir dinamiškas reiškinys, kurio esmę sudaro psichofiziologinių, ergonominių ir organizacinių veiksnių tarpusavio sąveika. Šie veiksniai veikia ne izoliuotai, o formuoja integruotą sistemą, kurioje kiekvieno elemento poveikis priklauso nuo bendros darbo aplinkos ir vairuotojo būklės. Todėl eismo sauga šiame kontekste turi būti vertinama kaip sisteminis rezultatas, o ne pavienių veiksnių suma.

2. Vienas svarbiausių tyrimo rezultatų yra tai, kad psichofiziologiniai veiksniai, ypač nuovargis ir stresas, išlieka pagrindiniais rizikos determinantais, lemiančiais vairuotojų veiklos efektyvumą ir klaidų tikimybę. Nustatyta, kad šių veiksnių poveikis yra nelinearinis ir kumuliacinis – ilgėjant darbo laikui ir mažėjant poilsio intervalams, rizika didėja disproporcingai. Nuovargis tiesiogiai veikia reakcijos laiką, dėmesio koncentraciją ir situacinį suvokimą, o stresas mažina sprendimų racionalumą ir gali skatinti rizikingą elgseną. Šių veiksnių sąveika lemia, kad vairuotojų būklė tampa kritiniu saugos elementu.

3. Ergonominiai ir biomechaniniai aspektai taip pat turi esminę reikšmę, nors jų poveikis dažnai pasireiškia netiesiogiai. Ilgalaikis statinis krūvis, vibracijos poveikis ir neoptimalios darbo vietos sąlygos sukelia fizinį diskomfortą, kuris mažina dėmesio koncentraciją ir didina nuovargį. Šie veiksniai pasižymi kumuliaciniu poveikiu, todėl ilgainiui gali reikšmingai paveikti tiek sveikatą, tiek darbo efektyvumą. Nustatyta, kad ergonomikos gerinimas yra ne tik sveikatos, bet ir saugos klausimas, nes fizinė būklė tiesiogiai susijusi su kognityvinėmis funkcijomis.

4. Darbo organizavimas išryškėja kaip vienas svarbiausių sisteminių veiksnių, lemiančių psichofiziologinę būklę ir saugos lygį. Pamaininis darbas, nereguliarūs grafikai, ilgos darbo valandos ir laiko

spaudimas sudaro sąlygas nuovargio ir streso kaupimuisi, kurie tiesiogiai veikia vairavimo kokybę. Nustatyta, kad net ir nedideli darbo organizavimo pokyčiai gali turėti reikšmingą poveikį saugai, todėl šis aspektas turi būti vertinamas kaip strateginis transporto sistemos valdymo elementas.

5. Svarbi išvada yra ta, kad vairuotojų darbo specifika turi būti analizuojama kaip kompleksinė sistema, kurioje psichofiziologiniai, ergonominiai ir organizaciniai veiksniai sąveikauja tarpusavyje ir stiprina vienas kito poveikį. Redukcionistinis požiūris, orientuotas į atskirus veiksnius, yra nepakankamas, nes jis neleidžia įvertinti realios rizikos struktūros. Todėl būtina taikyti integruotus modelius, kurie apimtų visą darbo aplinkos kontekstą.

6. Tyrimas taip pat parodė, kad efektyvus saugos valdymas negali būti grindžiamas vien technologiniais sprendimais, jei nėra sprendžiamos žmogaus veiksnių ir darbo organizavimo problemos. Nors technologijos gali sumažinti tam tikrų klaidų tikimybę, jos negali kompensuoti nuovargio, streso ar nepalankių darbo sąlygų poveikio. Todėl būtina kurti holistines strategijas, kurios apimtų tiek techninius, tiek organizacinius ir žmogaus veiksnių aspektus.

7. Praktiniu požiūriu tyrimo rezultatai leidžia suformuluoti kelias pagrindines kryptis, kurios gali prisidėti prie saugesnės ir efektyvesnės transporto sistemos kūrimo. Pirma, būtina optimizuoti darbo grafikus, atsižvelgiant į žmogaus biologinius ritmus ir nuovargio kaupimosi dėsningumus. Antra, svarbu gerinti ergonomines darbo sąlygas, siekiant sumažinti fizinį krūvį ir jo netiesioginį poveikį kognityvinėms funkcijoms. Trečia, būtina diegti psichofiziologinės būklės stebėsenos sistemas, leidžiančias realiu laiku identifikuoti rizikines būsenas. Ketvirta, svarbu stiprinti vairuotojų mokymą ir kompetencijas, ypač akcentuojant saugaus elgesio ir streso valdymo aspektus.

8. Ateities tyrimų kontekste būtina plėtoti ilgalaikius ir realiomis sąlygomis pagrįstus tyrimus, kurie leistų geriau suprasti kumuliacinį darbo sąlygų poveikį. Taip pat svarbu kurti individualizuotus modelius, kurie atsižvelgtų į vairuotojų fiziologinius ir psichologinius skirtumus, bei integruoti realaus laiko duomenų analizę į sprendimų priėmimo procesus. Tokie modeliai galėtų tapti pagrindu adaptyvioms sistemoms, kurios dinamiškai reaguotų į besikeičiančias sąlygas.

Apibendrinant galima teigti, kad profesionalių vairuotojų darbo specifika yra esminis veiksnys, lemiantis visuomeninio transporto saugą. Šios srities tyrimai turi būti grindžiami tarpdisciplininiu požiūriu, integruojančiu žmogaus veiksnius, ergonomiką ir darbo organizavimą. Tik toks požiūris leidžia sukurti efektyvias priemones, kurios ne tik mažintų eismo įvykių riziką, bet ir gerintų darbo sąlygas bei bendrą transporto sistemos veikimą.

Literatūra

1. Ahmad, K., Em, P. P., & Ab Aziz, N. A. (n.d.). Security of Drivers in Intelligent Transportation Systems: Privacy Preserving Federated Transfer Learning for Driver Drowsiness Detection. *Frontiers in Computer Science*, *8*, 1723711. Retrieved April 9, 2026, from https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2026.1723711/full
2. Augėnas, D. (2015). *Pradedančiųjų vairuotojų sukeliamų eismo įvykių tyrimas* [PhD Thesis, Kauno technologijos universitetas.]. https://epubl.ktu.edu/object/elaba:8661336/
3. Chen, S., Huang, J., Liu, Y., Ye, S., & Bai, Y. (2026). Embodied Visual Perception for Driver Fatigue Monitoring Systems: A Hierarchical Decoupling Framework for Robust Fatigue Detection and Scenario Understanding. *Electronics*, *15*(3), 689. https://www.mdpi.com/2079-9292/15/3/689
4. Dainauskas, S., & Bražukienė, I. (2013). Lietuvos automobilių kelių avaringumo teritorinė analizė. *Geografija*, *49*(1). http://www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/geografija/article/view/2659
5. Darma, Y., Saleh, S., Fisaini, J., Sugiarto, S., Saida, P. R., & Mauladea, F. (2026). Assessing how physical and mental fatigue affect driving speed on the Banda Aceh–Medan highway, Indonesia. *Traffic Safety Research*, *8*, e000131–e000131. https://tsr.international/TSR/article/view/28470
6. Gabrišiūnas, T. (2017). *Kelių transporto eismo įvykių Panevėžio mieste tyrimas* [PhD Thesis, Kauno technologijos universitetas.]. https://epubl.ktu.edu/object/elaba:22774020/
7. Hao, Y., Sun, X., Liu, H., & Wang, D. (2026). A fatigue driving detection method based on driver posture and facial state analysis. *Scientific Reports*. https://www.nature.com/articles/s41598-026-44994-4
8. Kardelis, K. (2005). *Mokslinių tyrimų metodologija ir metodai:(edukologija ir kiti socialiniai mokslai)*. Lucilijus. https://www.lituanistika.lt/content/50721
9. Kim, S. Y., & Kim, Y. S. (2026). A Study on Autonomous Driving Motion Sickness from the Perspective of Multimodal Human Signals. *Sensors*, *26*(5), 1675. https://www.mdpi.com/1424-8220/26/5/1675
10. Kuzmarskienė, I. (2024). *Integruotos viešojo transporto paslaugų sistemos kuriama vertė Tauragės regiono savivaldybių gyventojams* [PhD Thesis, Kauno technologijos universitetas.]. https://epubl.ktu.edu/object/elaba:198736370/

11. Li, J., Fu, C., Tang, J., Zhou, L., Chen, H., Zhou, W., Chen, C., & Luo, J. (2026). Multimodal Phenotyping Dataset of Driving Fatigue. *Scientific Data*. https://www.nature.com/articles/s41597-026-06634-4
12. Liu, X., WU, Y., Dong, C., LIANG, B., Wang, Y., & Yan, X. (n.d.). What associates with distraction and fatigue of tourist bus drivers? Evidences from the monitoring on millions of driving miles. *Evidences from the Monitoring on Millions of Driving Miles*. Retrieved April 9, 2026, from https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=6172941
13. Nguyen, D. D., Pham, V. H., Nguyen, C. B., & Tran, H. Q. V. (2026). Edge-AI Smart Camera System for Early Driver Drowsiness Detection and Warning. In N. T. Nguyen, A.-C. Le, T. D. Tran, T.-P. Hong, Y. Manolopoulos, N. A. Le Khac, P. Tran Tin, & V.-N. Huynh (Eds.), *Computational Intelligence in Engineering Science* (Vol. 2944, pp. 622–637). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-21628-1_44
14. Sadauskas, A. (2019). *Automobilio stabilumo tyrimas atliekant įvairius manevrus* [PhD Thesis, Kauno technologijos universitetas.]. https://epubl.ktu.edu/object/elaba:37611933/
15. Tautkevičienė, S. (2023). Evaluating economic driving in the context of green logistics. *Applied Scientific Research*, *2*(1), 7–16. https://ojs.svako.lt/TMT/article/view/92
16. Useche, S. A., Gómez, V., Cendales, B., & Alonso, F. (2018). Working conditions, job strain, and traffic safety among three groups of public transport drivers. *Safety and Health at Work*, *9*(4), 454–461. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791116302086
17. Wang, Q., Li, K., Wang, X., Qin, J., & Yu, C. (2026). A Deep Learning-Enabled Framework for Driver Drowsiness Assessment and Forecasting With HRV Matching Based on Dual Optical Fiber Sensor System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11361372/
18. Zabielaitė, M., & Paliulis, G. M. (2017). *Pėsčiųjų saugumo analizė avaringiausiose Vilniaus miesto gatvėse*. https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/157057
19. Zhou, Y., Guo, F., Wang, X., & Cai, J. (2026). Effects of subjective driving workload on hazard perception performance in older drivers: A driving simulation study. *Traffic Injury Prevention*, *27*(4), 410–419. https://doi.org/10.1080/15389588.2025.2513398

WORK CHARACTERISTICS OF PROFESSIONAL DRIVERS IN PUBLIC TRANSPORT: AN INTEGRATED ANALYSIS OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL, ERGONOMIC, AND ORGANIZATIONAL FACTORS IN THE CONTEXT OF SAFETY

Summary

In public transport systems, the activities of professional drivers are one of the key determinants of traffic safety and service quality. Despite technological progress, the human factor remains a critical element of the system, whose condition directly affects the probability of traffic accidents. The aim of this study is to systematically analyze the work characteristics of professional drivers by integrating psychophysiological, ergonomic, and organizational factors and evaluating their interaction in the context of safety. The study is based on a systematic literature review using the method of narrative synthesis. The results indicate that the work characteristics of drivers constitute a multidimensional system in which fatigue, stress, workload, and ergonomic conditions interact nonlinearly and mutually reinforce each other's effects. Long working hours, shift work, and suboptimal working conditions lead to the deterioration of psychophysiological condition, which is directly associated with increased reaction time and a higher probability of errors. Ergonomic factors, such as prolonged sitting and vibration, have a cumulative impact on health and indirectly affect safety through the deterioration of cognitive functions. The study reveals that effective safety management requires an integrated approach encompassing work organization, ergonomics, and monitoring of psychophysiological condition. A transition from a fragmented to a systemic and data-driven model is proposed, enabling real-time identification of risks and optimization of working conditions. The findings have practical implications for transport companies and policymakers seeking to improve traffic safety and work efficiency.

Key words:

ANALYSIS AND DESIGN OF MICROPROCESSOR WORKBENCH ARCHITECTURE FOR EDUCATIONAL PURPOSES

Saulius Paukštė
Vilnius Gediminas Technical University

Abstract
This article analyses various microprocessor workbench architectures that are made for self-learning or learning purposes and proposes a different design suitable for learning computer architecture. Altogether, 4 different computer architecture designs are covered based on their simplicity, instruction set, addressable memory size, data bus size, and other relevant features. A proposed solution for a simple yet capable microprocessor workbench architecture schematic is presented, which encompasses design philosophies deemed to be suitable for educational purposes.
Key words: Microprocessor, workbench, computer, architecture, schematic.

Introduction

The Vilnius Gediminas Technical University Computer Engineering study program contains the subjects related to the development of a computer system (*Computer Engineering*, n.d.). While some workbenches based on conventional microprocessors exist in the institution, there has been no known attempt of developing a custom 8-bit microprocessor. Prasad et al., 2016, although discussing a software-based approach to understanding computer organization and computer architecture, conclude that due to complexity of the subject it includes not only lecture-based learning, but practical learning as well. Jamieson et al., 2022 also make the claim that with the rise of complexity of computer hardware, education of students of this subject is becoming ever so challenging. Examining a wider selection of such and similar systems is fundamental to properly understanding them. Thus, an analysis and example solution is offered for an architecture of how a workbench built for laboratory works could look like. This article first covers relevant already developed devices based on their simplicity, instruction set, addressable memory size, data bus size, and other relevant features. Then, a functional block diagram and schematic of a proposed system are introduced and discussed.

Analogous device overview

YouTuber 3D Sage showcases a custom-designed computer, consisting of a clock, program counter, and RAM (*I Made My Own Computer | Let's See How It Works - YouTube*, n.d.). The clock uses a 555 timer IC along with a configurable RC circuit to have a controllable 1–20 Hz clock output. A switch attached to the timer allows the clock signal to be halted when it is not toggled. The program counter is a 74HC161 4-bit binary counter which loops from 0x0 to 0xF according to a clock pulse. A CDP1824 32-word 8-bit RAM module is used (although only 16 words are accessible) which can be addressed by the program counter. The 4 MSB are used for operands and the 4 LSB are used for opcodes of which there are 5 (Table 1).

Table 1

Instruction set of 3D Sage computer

Operation code	Instruction explanation
0111	Halt clock
1011	Reset program counter
1101	Jump to operand address
1110	Controller input
1111	Do nothing

Source: I Made My Own Computer | Let's See How It Works - YouTube, n.d.

This RAM module can be programmed using 8 switches that can be seen at the bottom of the device along with the clock enable and write inputs (Fig. 1). The red PCB contains the clock circuit, the green PCB – the program counter circuit, while the blue PCB contains the RAM circuit. The architecture only allows for immediate addressing.



Fig. 1. 3D Sage computer
Source: I Made My Own Computer | Let's See How It Works - YouTube, n.d.

Additionally, 3D Sage presents 3 external modules – a 3x5 LED matrix array double 8-way switch for external input to control the LED matrix and a speaker module to output 4-bit sound according to operand contents (Fig. 2). While this system is simple to understand, the limited instruction set and 4-bit operands limit the use case outside of rudimentary instruction of computer architecture.

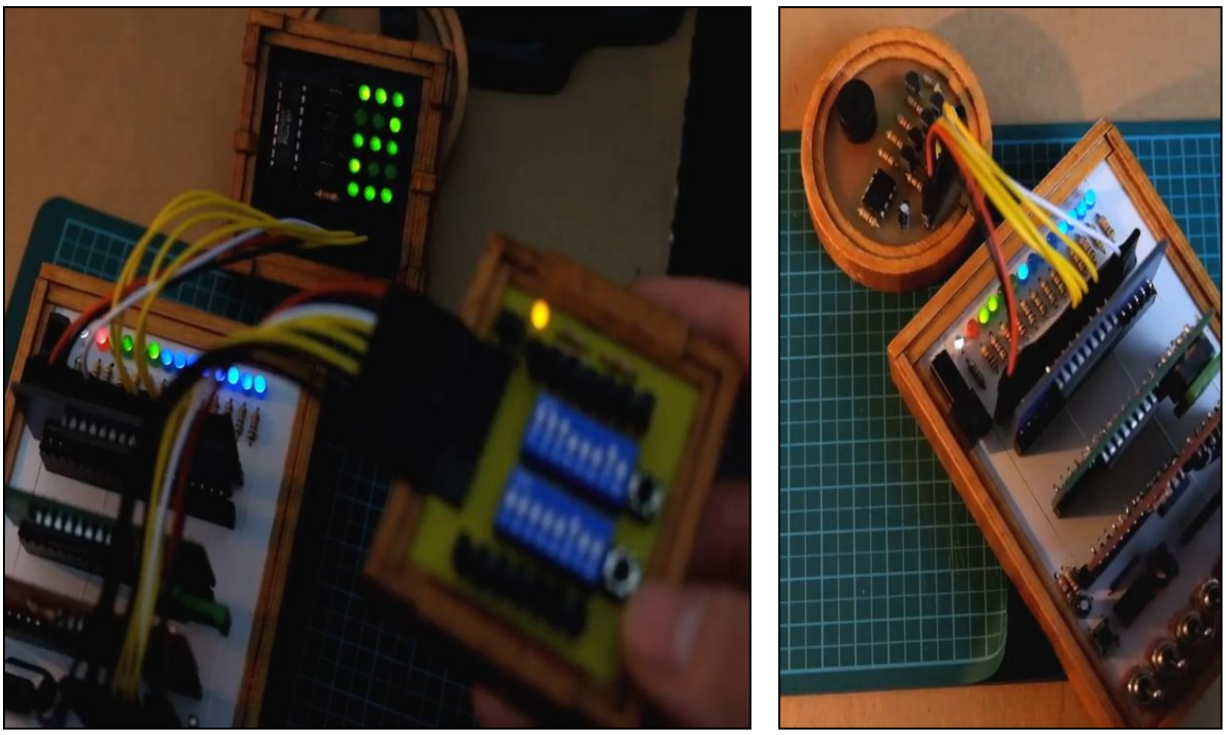


Fig. 2. 3x5 LED matrix and control input (left) and speaker (right) modules
Source: I Made My Own Computer | Let's See How It Works - YouTube, n.d.

Ben Eater presents a SAP-1 (Malvino, & Brown., 1977/1999, p. 140) architecture (*8-Bit Computer Update - YouTube*, n.d.) microprocessor with the addition of conditional jump instructions (Ben Eater, 2018). The designed system is made up of various 74HC and 74LS series ICs, consisting primarily of the latter IC family. The computer has a programmable instruction set of up to 15 instructions. A high-level overview of the system schematic can be seen in Fig. 3. RAM is programmable via a quad switch inside the MAR and an octa switch to set the memory contents itself.

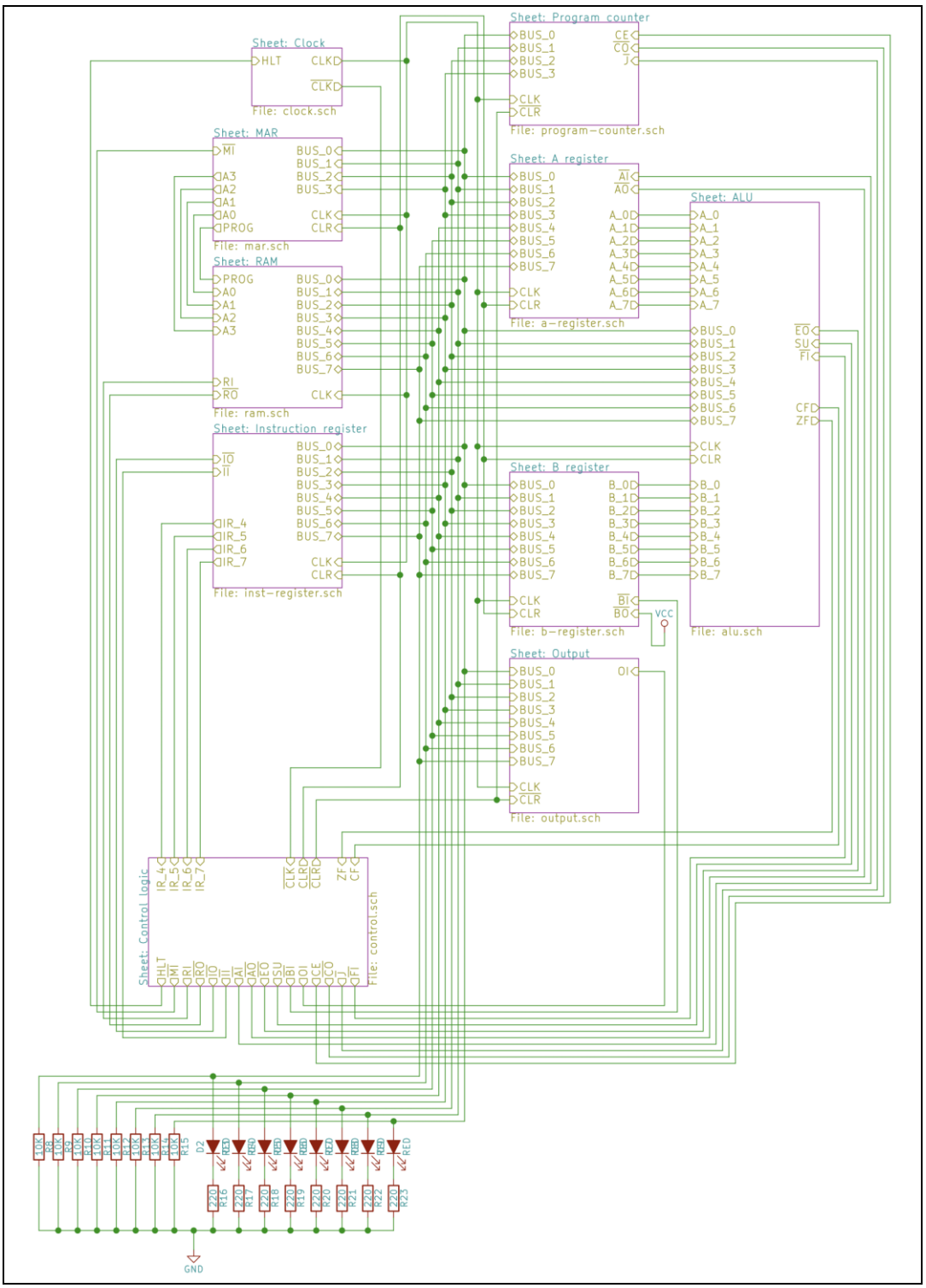


Fig. 3. Ben Eater's computer high-level schematic
Source: Build an 8-Bit Computer | Ben Eater, n.d.

Due to using a 4-bit 74LS161 4-bit binary counter and 4 MSB for the opcode while using 4 LSB for the operands, 16 memory locations can be addressed. The data bus is 8-bit wide. Additionally, it features 2 general purpose registers one of which is only used for arithmetic operation operands, an output, memory addressing, instruction, and flag registers. The operation codes can be configured by programming 2 EEPROMS using an Arduino Nano EEPROM programmer (Fig. 4) that are implemented as decoders to form a control word according to set flags and current instruction register contents.

In such a system, the operation codes can be custom-made due to them only impacting addressing of the EEPROM, thus making the system quite configurable. Additionally, both direct and immediate addressing exist.

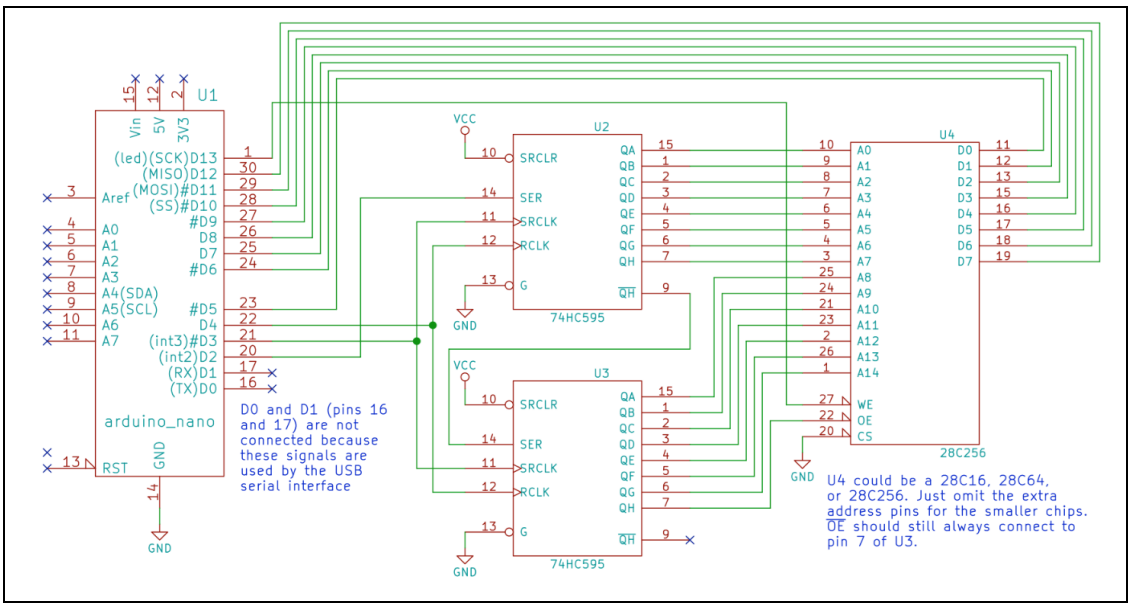


Fig. 4. Arduino-based EEPROM programmer schematic
Source: Eater, 2017/2026

While this architecture offers an improvement compared to the 3D Sage computer, the implementation itself is questionable due to the design being done on breadboards, limiting proper power distribution in addition to pitfalls that can introduce critical errors, such as not accounting for EEPROM output pin noise when switching addresses that can produce wrong control words, leaving floating inputs on IC chips which can produce voltage drops and noise, and not connecting LEDs in series with current limiting resistors, leading to further potential noise.

Ajdari & Tabandeh, 2016 demonstrate the design and decision challenges of developing both hardware and software for a computer system used for teaching computer architecture. They use the Abu-Reihan Processor (ARC) architecture to develop a computer capable of immediate, direct, indexed, and indirect addressing. In addition to having multiple various purpose registers, it also features an LCD display to view register and flag contents via a constantly running monitor and 3 keypads for controlling the microprocessor itself. The complete system and monitor can be seen in Fig. 5.

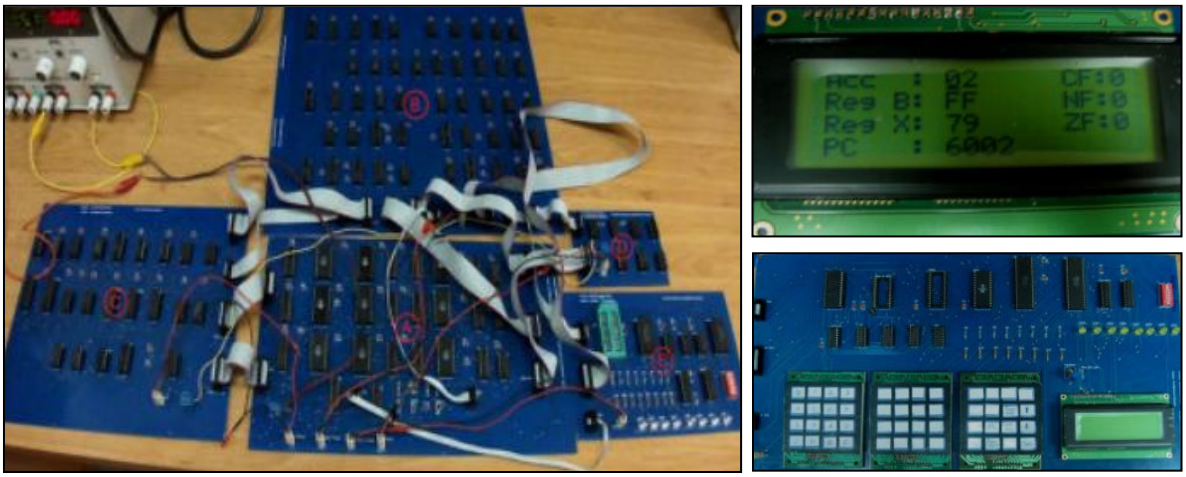


Fig. 5. ARC computer (left), where a – control unit, b – register connections, c – ALU, d – instruction decoder, e – external memory IO ports, and monitor with keypad control (right)
Source: Ajdari & Tabandeh, 2016

While the microprocessor does feature an increased instruction address bus of 16 bits as well as introducing such features as a subroutine calls and hardware monitor, due to exactly the rich feature set it can be deemed too complex for introductory understanding of computer architecture. Moreover, the lack of output variability reduces the variety of tasks that could be given using this system.

GitHub user TomNisbet presents an improved SAP-like computer architecture named SAP-Plus (TomNisbet, 2026a). This design features a modular PCB backplane and bus connectors for the flexible arrangement of functional blocks as well as variable instruction microstep count from 3 to 16 while still using 74LS series and 74HC series ICs, similar to Ben Eater. Additionally, a stack and stack pointer is introduced with all registers being expanded to at least 8 bits. The unassembled PCB templates and working microprocessor workbench can be seen in Fig. 6.

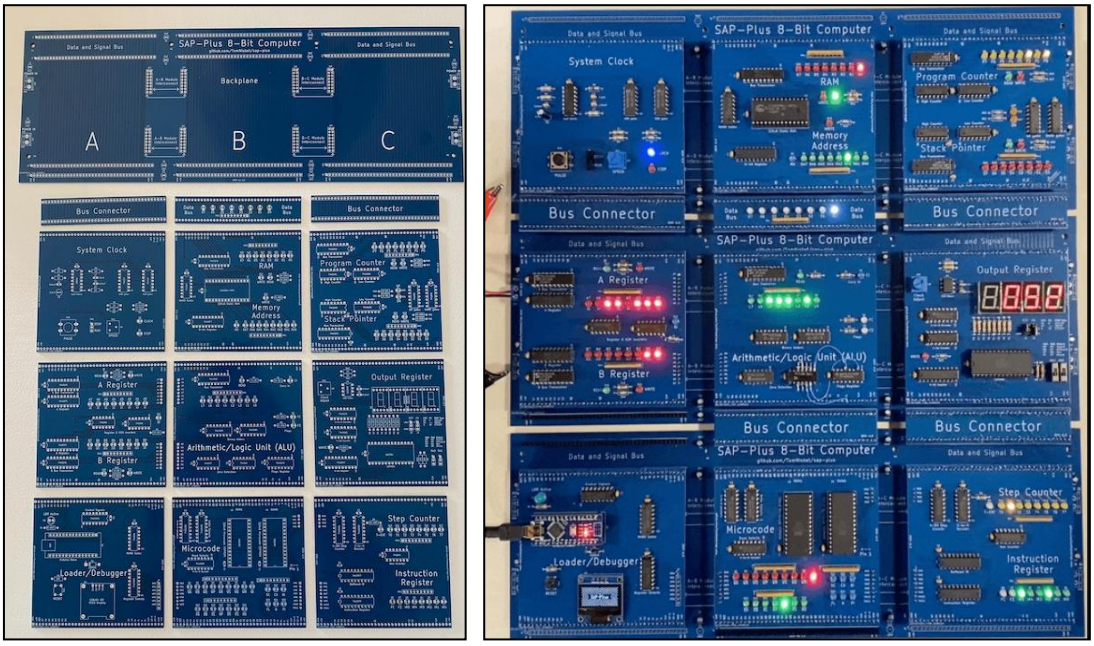


Fig. 6. Component-less PCB (left) and working, assembled computer (right)
Source: TomNisbet, 2026*a*

The system features 6-bit memory addressing. This in turn with the aforementioned features allows for 64 different instructions. Additionally, EEPROM outputs are used again for forming the control words for the system, however, here various register input and output controls are multiplexed TomNisbet, 2026b, allowing for increased controllable register size while still using 2 8-bit word 28C256 EEPROM ICs. Moreover, the instruction register along with flag register contents are buffered to be output to the control logic during the rising edge of the inverted clock signal. While this system allows for quick and simple connection between different logical blocks and simple custom block development, such a wide feature set again can be considered non-crucial due to the stack pointer and implemented Arduino RAM programmer being unnecessary, to name a few.

The comparison of key features of overviewed system can be seen in Table 2.

Table 2

Comparison of reviewed devices

Device	Maximum instruction count	Data bus	Inputs	Outputs
3D Sage's computer	4	4-bit	RAM write, clock control, external switches	3x5 LED matrix, 4-bit speaker, LEDs for IC values
Ben Eater's computer	16	8-bit	RAM write, clock control, external switches	4 7-segment displays, LEDs for IC values
ARC microprocessor	256	8-bit	RAM write, debug keypads	LCD display for system monitor, LEDs for IC values
SAP-Plus computer	64	8-bit	RAM write, clock control, external switches	4 7-segment displays, LEDs for IC values, OLED screen for loading and debugging

Source: made by author

Proposed device

After analysing the presented devices, a suggested functional block diagram of a microprocessor workbench can be presented (Fig. 7). The clock should switch between manual and pulsed input to provide the ability to inspect the system's operation in depth. The system itself features an 8-bit program counter to keep the value of the address of the next instruction which can be incremented using a clock pulse or set to a specific value using a jump instruction. The memory addressing register is used for storing the current command memory address while the RAM itself uses 12-bit wide words with the 4 MSB used for storing the opcode and the 8 LSB used for storing the operands. This architecture allows for 256-bit addressing and 8-bit direct or immediate addressing while still remaining relatively simple.

The instruction register stores the currently executed instruction, and the control logic sets the control word according to said instruction and a non-variable 5-step counter. The ALU can perform addition and subtraction operations. These operations along with conditional jump instructions allow for more complex arithmetic operations, such as multiplication Register A is an 8-bit accumulator, while the 8-bit register B is used for calculation operands, and the output register stores the data produced on requested output. In this case, the output is a quad 7-segment LED display. No monitor is present due to each functional block incorporating LEDs that display the current value of all register contents being sufficient.

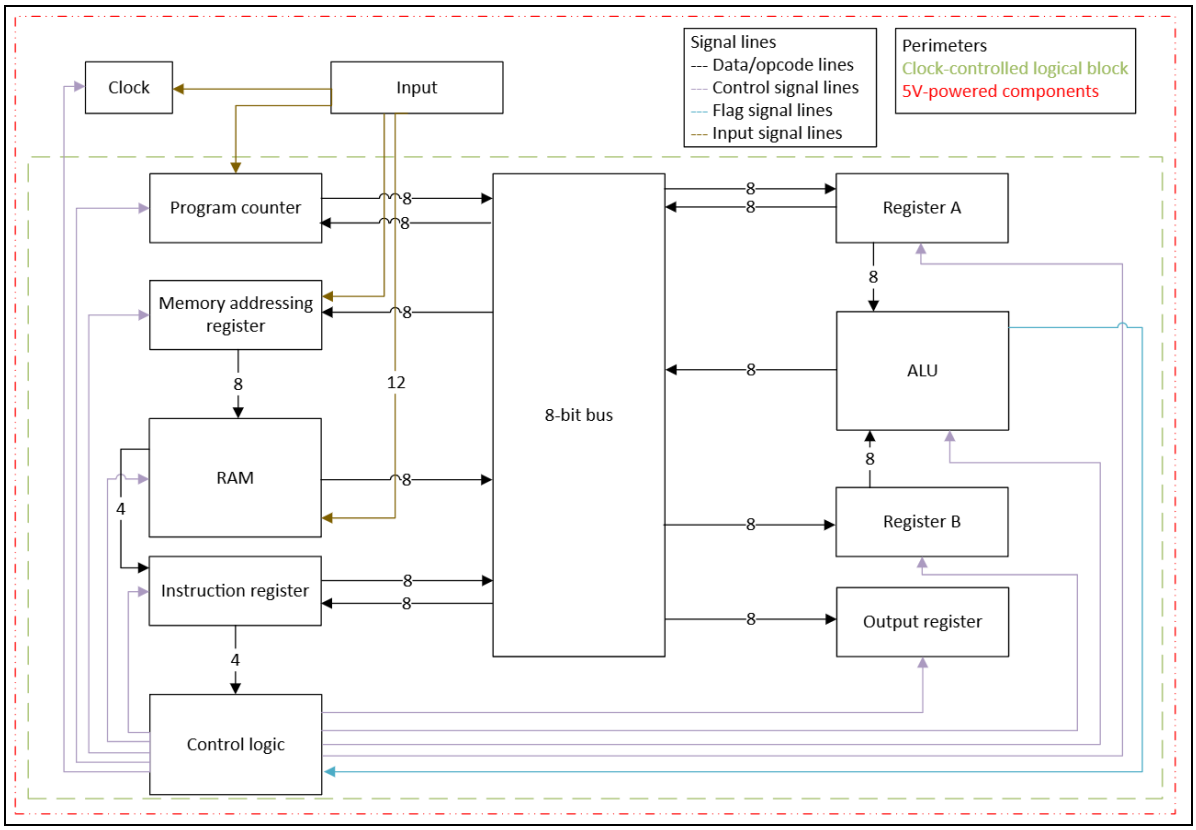


Fig. 7. Proposed functional block diagram for developed system
Source: made by author

Schematics for the above present function blocks can be seen below (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 pav.). ICs are separated by their function inside dashed boxes for clarity. Global labels are used to indicate signals that are shared between different sheets. Moreover, it is also worth noting that due to encompassing a design similar to the SAP-Plus computer, present on each sheet are connections to a global bus and module interconnects where necessary.

Fig. 8 shows a pulsed and manual clock switching circuit and an 8-bit program counter. The clock circuit generates both a regular and inverted clock signal which is used for the control logic and instruction register functional blocks. The manual clock signal comes from a push button that is debounced using a pull-up resistor and a bypass capacitor with the output going into a 74HC14 Schmitt inverter to eliminate noise. The program counter is an 8-bit binary counter which is able to either send its output to the 8-bit bus or take in values from the bus in case of a jump operation being completed.

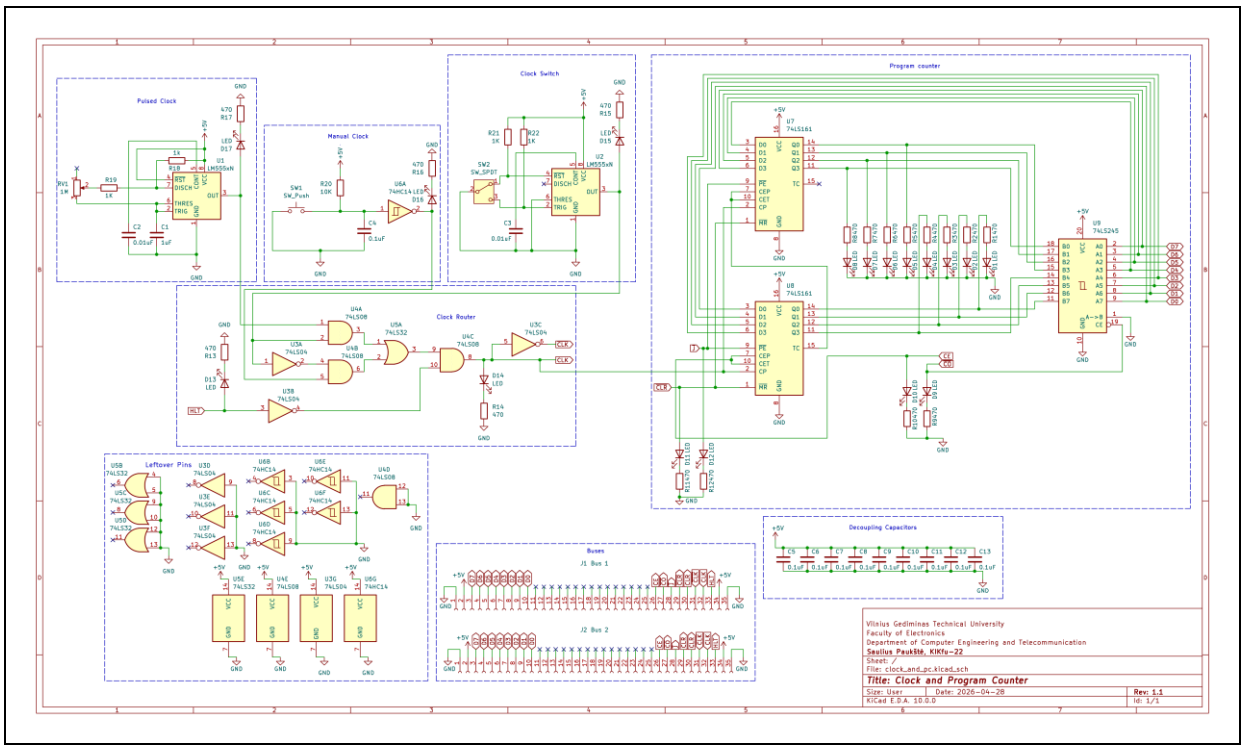


Fig. 8. Clock and program counter schematic
Source: made by author

The control logic schematic can be seen in Fig. 9. An EEPROM decoder here takes the input of a binary counter that counts up to 5 for the 3 LSB, followed by 4 instruction register bits and the 7th address bit either being set to high or low to allow for writing a singular Arduino program of Ben Eater (Eater, 2017/2026). On the rising edge of the inverted clock signal, this address is taken in and according to it a control word for the rest of the system is formed. A reset circuit is also implemented to set all register and counter values to 0.

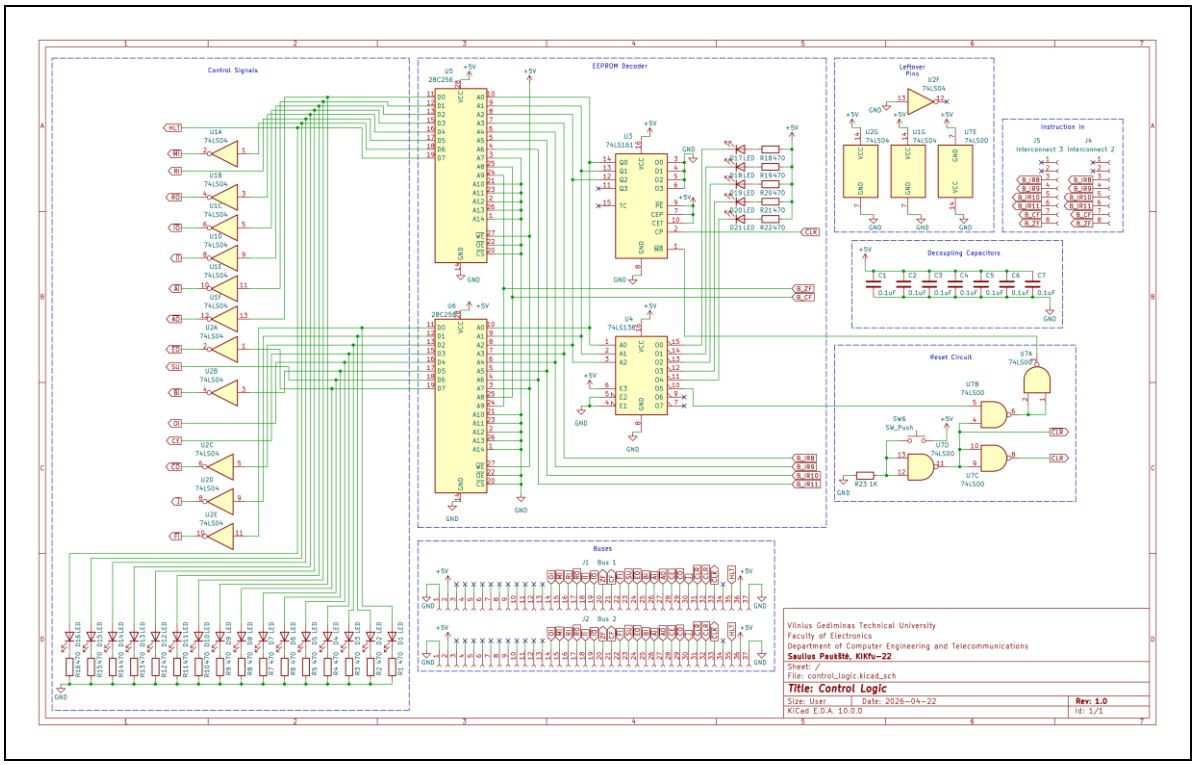
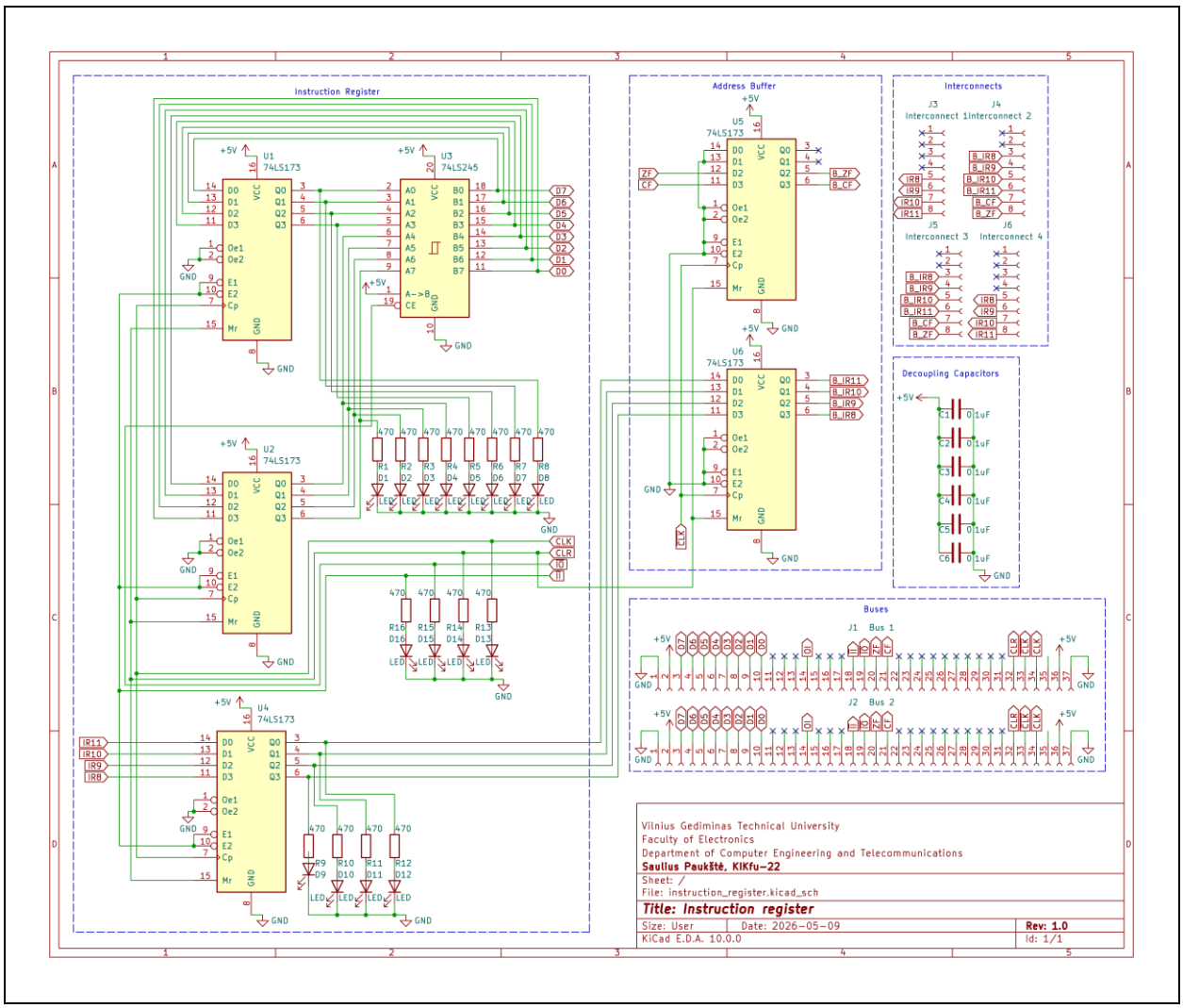


Fig. 9. Control logic schematic
Source: made by author

The instruction register in Fig. 10. Takes in 4 opcode bits and 8 operand bits from the RAM on the rising edge of the clock signal. Opcode bits are then buffered with additional flag register bits and sent out to the control logic while the operand can be sent to the 8-bit data bus for instructions that require it. This design aims to avoid sporadic EEPROM output on address switching, which can make the system non-deterministic.



10 pav. Instruction register schematic
Source: made by author

Fig. 11 presents the MAR and RAM module. 256 12-bit words can either be written to or read from depending on the selection through a switch on the module. 74LS157 quad 2-1 multiplexers are used to appropriately route selected mode signals. Since the opcode bits should never be rewritten during execution, the input of the execute mode is routed to the output for the 4 MSB of the 12-bit word. As RAM write operations are performed while no program is running, no debounce circuits for the button and switch are required.

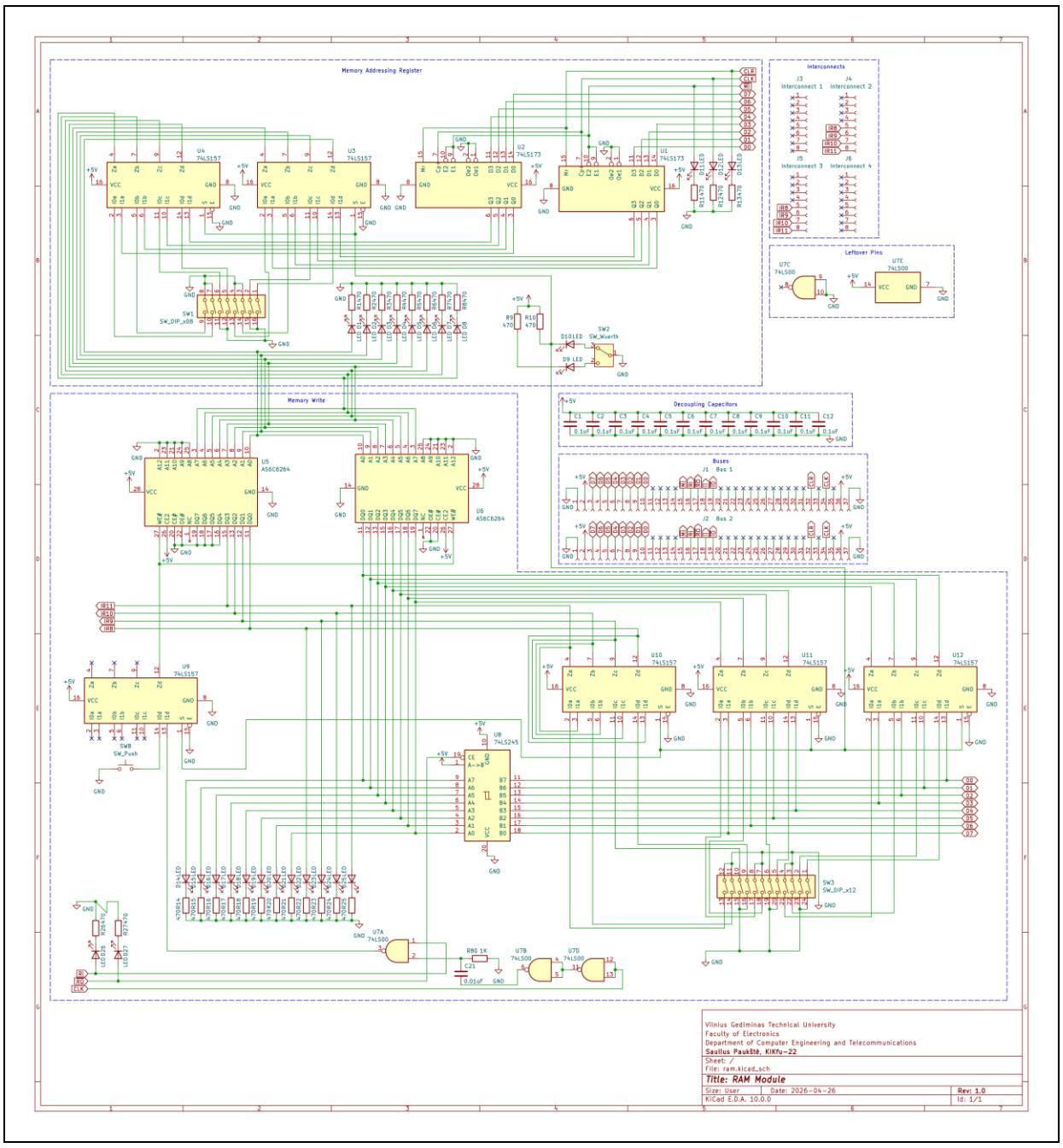


Fig. 11 pav. MAR and RAM schematic
Source: made by author

Registers A and B are shown in Fig. 12. These are 2 8-bit registers of which register A is used as the accumulator and therefore has both input and output signals while register B is only used for storing operands used for arithmetic operations; therefore, it only has an input signal. The unclocked output of both of these registers is sent to the accumulator. Similar to most other registers of the system, a 74LS245 bus transceiver is present to set output to high impedance in case of no output from the registers required.

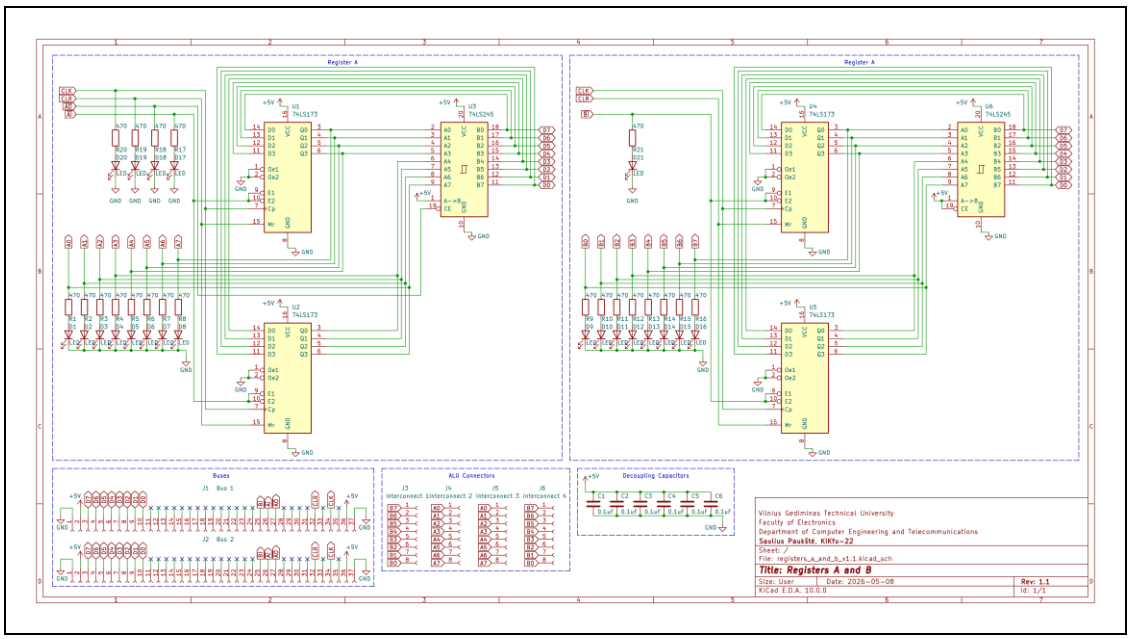


Fig. 12. Registers A and B schematic
Source: made by author

The ALU shown in Fig. 13. performs either addition or subtraction operations. The latter are performed using 2's complement which is achieved through the use of 74LS86 quad XOR gates and a subtract signal which also acts as the carry in signal for the lower order nibble. Additionally, a 2-bit flags register is present which contains the values of a zero and 8-bit carry flag that can be used for conditional jump instructions.

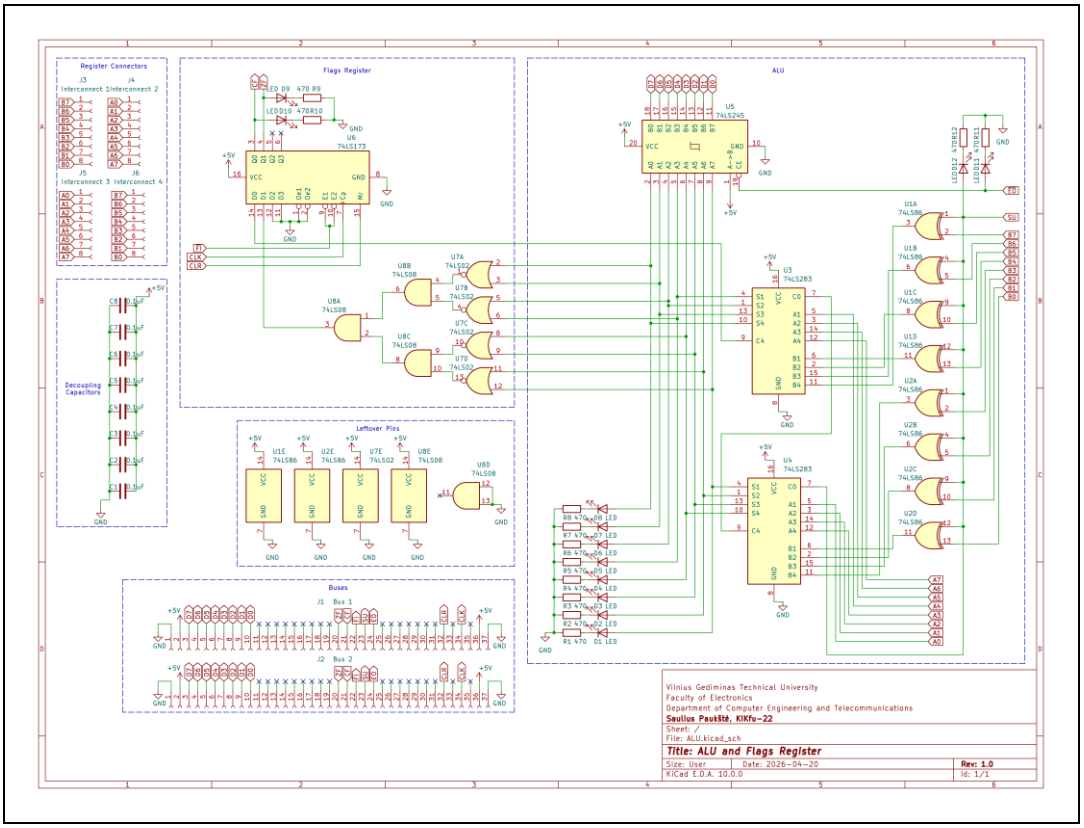


Fig. 13. ALU schematic
Source: made by author

In Fig. 14 the output register can be seen. Instead of 8 LEDs for displaying the contents of the register, a quad 7-segment common anode display is used. In a similar logic that can be seen in pav 9., an

EEPROM decoder decodes a specific output signal to this display using the contents of an 8-bit register as the address for the 8 lower bits. The 2 upper bits of the address are taken from a separate digit select driving circuit which controls the refresh of the display via a counter and 74LS139 2-4 demultiplexer circuit. Moreover, the MSB of the EEPROM is set by a switch which can be used to set the display mode to 2s' complement when required if the decoder is programmed correctly.

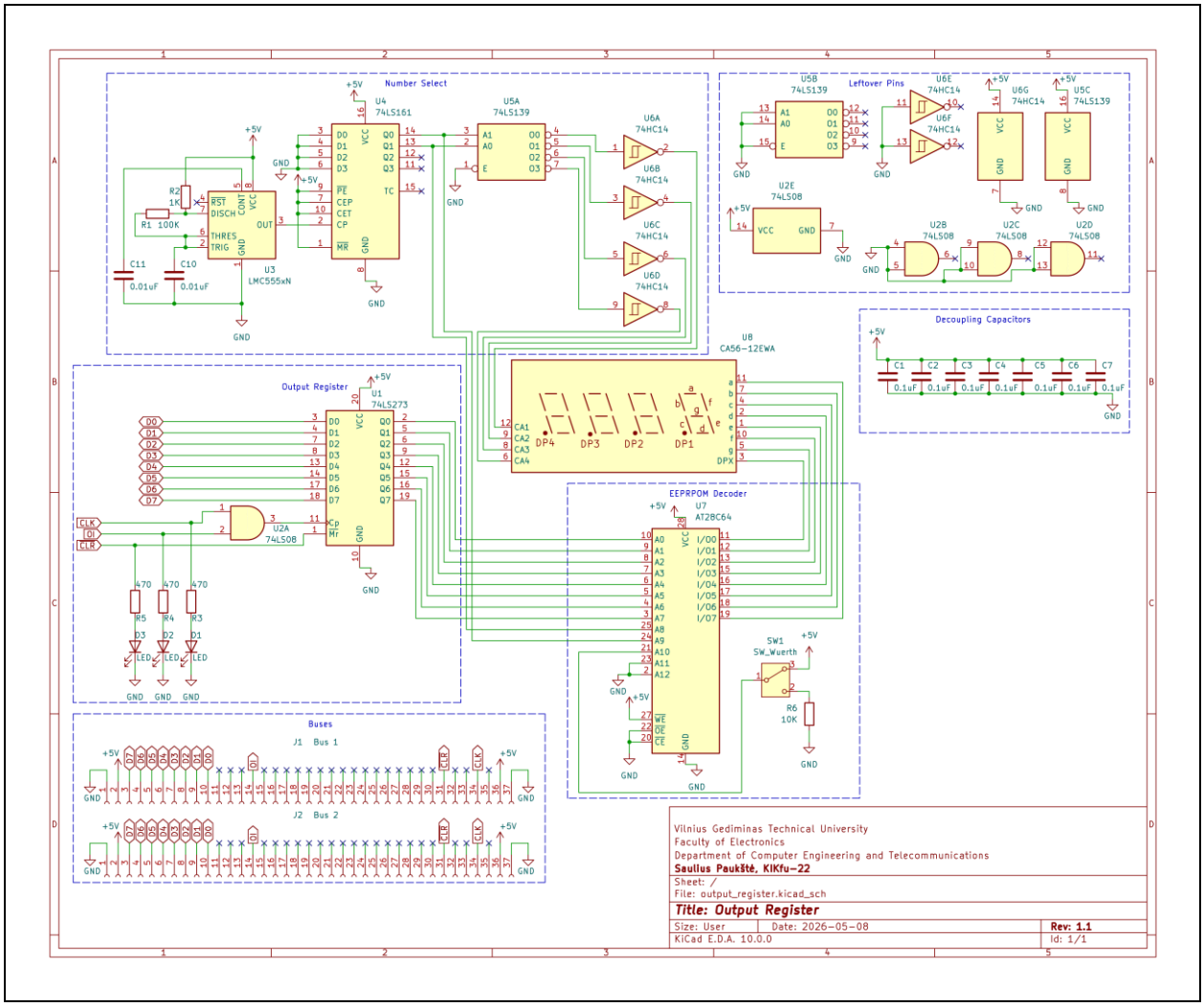


Fig. 14. Output register schematic
Source: made by author

Conclusions

1. 4 different microprocessor architecture implementations were analysed in terms of their complexity and feature set.
2. Using the analysed material, a new microprocessor architecture is proposed, incorporating modular design from (TomNisbet, 2026a) while also keeping the relative simplicity of Ben Eater (*Build an 8-Bit Computer | Ben Eater*, n.d.) improved upon SAP-1 (Malvino, & Brown., 1977/1999) computer architecture.
3. While existing solutions already offer an approach for learning computer architecture, the complexity (or lack thereof) produces undesirable results, such as limited feature set or an number of features not sufficiently explored in a reasonable time frame for a computer architecture subject.

References

1. *8-bit computer update—YouTube*. (n.d.). Retrieved May 8, 2026, from https://www.youtube.com/watch?v=HyznrdDSSGM&list=PLowKtXNTBypGqImE405J2565dvjafglHU

2. Ajdari, M., & Tabandeh, M. (2016). An Educational Hardware/Software Tool for the First Course in Computer Architecture. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, *40*(1), 75–78. https://doi.org/10.1007/s40998-016-0001-5
3. Ben Eater. (2018, April 21). *Conditional jump instructions* [Video recording]. https://www.youtube.com/watch?v=Zg1NdPKoosU
4. *Build an 8-bit computer | Ben Eater*. (n.d.). Retrieved May 8, 2026, from https://eater.net/8bit/schematics
5. *Computer Engineering*. (n.d.). Retrieved May 8, 2026, from https://apply.vilniustech.lt/courses/course/26-bachelor-computer-engineering
6. Eater, B. (2026). *Beneater/eeprom-programmer* [C++]. https://github.com/beneater/eeprom-programmer (Original work published 2017)
7. *I Made My Own Computer | Let's See How It Works—YouTube*. (n.d.). Retrieved May 8, 2026, from https://www.youtube.com/watch?v=-0gccsR1EEs
8. Jamieson, P., Le, H., Martin, N., McGrew, T., Qian, Y., Schonauer, E., Ehret, A., & Kinsy, M. A. (2022). Computer Engineering Education Experiences with RISC-V Architectures—From Computer Architecture to Microcontrollers. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, *12*(3), 45. https://doi.org/10.3390/jlpea12030045
9. Malvino, A. P., & Brown., J. A. (1999). *Digital Computer Electornics* (3rd ed.). GlenDoe/McGraw-Hill. (Original work published 1977, McGraw-Hill, Inc.)
10. Prasad, P. W. C., Alsadoon, A., Beg, A., & Chan, A. (2016). Using simulators for teaching computer organization and architecture. *Computer Applications in Engineering Education*, *24*(2), 215–224. https://doi.org/10.1002/cae.21699
11. TomNisbet. (2026a, February 24). *SAP-Plus 8-bit TTL Computer*. SAP-Plus. https://tomnisbet.github.io/sap-plus/
12. TomNisbet, Y. (2026b, February 24). *Microcode ROMs*. SAP-Plus. https://tomnisbet.github.io/sap-plus/docs/microcode/

MIKROPROCESORIŲ DARBASTALO ARCHITEKTŪROS ANALIZĖ IR PROJEKTAVIMAS ŠVIETIMO TIKSLAIS

Santrauka

Šis straipsnis apžvelgia įvairias mikroprocesorių darbastalių architektūras, naudotas ar naudojamas siekiant mokyti, kaip turėtų atrodyti kompiuterio architektūra. 3D Sage pateikia be galo ribotą, tačiau moduliarų 3 funkcinių blokų (laikrodis, programos skaičiuoklis ir RAM) architektūrą, prie kurios gali būti prijungiami įvairius įėjimo ir išėjimo prievadai. Ben Eater pateikia kiek sudėtingesnę, SAP-1 architektūra grįstą sistemą, kurios instrukcijų sąrašas gali būti išplėstas iki 16 skirtingų operacijų, tačiau įgyvendiną sistemą tik ant prototipavimo plokščių, galutinį sistemos variantą pateikdamas su ne viena galimybę staigiems įtampoms kritimams ir nestabiliam sistemos veikimui. TomNisbet išsprendžia šias problemas ir praplečia sistemos funkcionalumą tiek skirtingų instrukcijų kiekio prasme, tiek pridėdamas tokį funkcionalumą, kaip krūvos rodyklę. Šio autoriaus dizainas taip pat yra moduliarus ir leidžia nesunkiai išplėsti ar modifikuoti sistemą. Ajdari ir Tabandeh pateikia ARC architektūrą grįstą mikroprocesorių, kuris, nors ir neturi specialių išvadų, leidžia vartotojams stebėti registrų vertes sistemos monitoriaus pagalba. Šio straipsnio pasiūlytos sistemos variantas išlieka moduliarus remiantis TomNisbet spausdintinių plokščių dizainų, tačiau išlieka paprastas, išplėsdamas Ben Eater kompiuterio architektūra su 256 atminties adresavimu bei ištaisydamas kritines čia aptinkamas klaidas. Pasiūlyta sistema gali būt nesunkiai plečiama ir modifikuojama, kas kaip ir naudojimasis ja gali būti skiriama kaip užduotis studentams, besimokantiems kompiuterių architektūros ir mikroprocesorių funkcionalumo.

Reikšminiai žodžiai: Mikroprocesorius, darbastalis, kompiuteris, architektūra, schema.

GOOGLE PASLAUGŲ DUOMENŲ OPTIMIZAVIMO PROGRAMA

Jurij Tekutov[1, 2, 3, 4], Julija Smirnova[1]
[1]Klaipėdos valstybinė kolegija, [2]Klaipėdos universitetas, [3]SMK Aukštoji mokykla, [4]Lietuvos verslo kolegija

Anotacija

Programos samprata atskleidė, kad vartotojams trūksta vieningos sistemos *Google Analytics* ir *PageSpeed* duomenų stebėjimui bei optimizavimui. Sudarytas dalykinės srities raiškusis paveikslėlis ir egzistuojančių alternatyvų analizė parodė poreikį integruoti anotacijas, *PageSpeed* duomenis ir naudotojų valdymą. Programos projektavimas parodė, kad programai buvo pasirinkta trijų sluoksnių architektūra, leidžianti lengvai plėsti programos funkcionalumą ateityje. Nustatyti funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai užtikrina, kad programa atitiks vartotojų lūkesčius. Sukurti duomenų bazės modeliai remiasi aiškiais ryšiais tarp esybių. Dinaminės vartotojo kelio ir algoritmų diagramos parodė pagrindines vidines programos veiklas ir jų eigą. Programos realizacijos metu įgyvendinti visi pagrindiniai realizacijos etapai. Technologijos leido užtikrinti konteinerizuotą aplinką ir palengvinti kodo struktūrizavimą. Duomenų gavimas iš *Analytics* ir *PageSpeed API* buvo įgyvendintas per *Google Cloud* paslaugą, naudojant autentifikaciją per paslaugų paskyrą. Duomenų optimizavimas buvo įgyvendintas per paieškos, filtravimo, eksportavimo, metaduomenų pridėjimo ir *PageSpeed* rezultatų nuskaitymo funkcijas. Atlikus rankinį programos testavimą, buvo patvirtinta, kad pagrindinės funkcijos, tokios kaip duomenų gavimas ir filtravimas, veikia teisingai ir atitinka vartotojo poreikius. *API* testavimas su *Postman* įrankiu parodė, kad visos užklausos į programą yra apdorojamos korektiškai, o duomenys grąžinami tinkamu formatu. Programos įvertinimas lyginant su analizuotais įrankiais parodė, kad sukurta programa išsiskiria pritaikomumu, metaduomenų valdymu, PageSpeed integracija ir vartotojų vaidmenų administravimu. Taip pat pagal funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus buvo įvertinta, kad programa atitinka visus reikalavimus.

Reikšminiai žodžiai: Google, Google paslaugos, Google Analytics, Google PageSpeed, duomenų optimizacija, programos sąsaja.

Įvadas

Google paslaugų duomenų optimizavimą verta nagrinėti, nes šiandien dauguma organizacijų naudojasi keliomis Google platformomis, tokiomis kaip *Google Analytics*, *PageSpeed Insights* ir *Search Console*, kad stebėtų ir tobulintų savo skaitmeninį buvimą. Tačiau šios paslaugos veikia atskirai, todėl vartotojams sunku peržiūrėti, interpretuoti duomenis ir su jais reaguoti.

Nors *Google Analytics* ir *Google PageSpeed* yra plačiai naudojami svetainių analitikos ir našumo vertinimo įrankiai, tarp jų nėra įdiegtos tiesioginės, automatinės duomenų integracijos mechanizmo. Taip pat šiuo metu rinkoje neegzistuoja analogiški integraciniai sprendimai. *Google Analytics* orientuotas į vartotojų elgsenos analizę, tuo tarpu *PageSpeed* pateikia techninius našumo rodiklius (*LCP*, *FID*, *CLS* ir kt.), paremtus laboratoriniais ir realių naudotojų duomenimis. Šios sistemos veikia kaip savarankiški analizės moduliai, o jų duomenų sintezė reikalauja papildomų techninių sprendimų (*API* naudojimo, duomenų sandėlių ar BI platformų) (Alaskar, 2025; Vysotska ir kt., 2024). *Google Analytics* ir *Google PageSpeed* paslaugos nėra integruotos tarpusavyje, todėl vartotojai turi pereiti iš vienos sistemos į kitą, o tai išskaido darbo eigą, ir optimizavimo galimybės nėra suteiktos, todėl vartotojai sugaišto daug laiko ieškodami reikiamos informacijos. Todėl reikia sukurti programą, kuri galėtų atvaizduoti duomenis viename vaizde ir pateikti įvairių galimybių juos optimizuoti.

Mokslinėje ir praktinėje literatūroje plačiai nagrinėjamas tiek vartotojų elgsenos modeliavimas, tiek svetainių našumo optimizavimas, tačiau trūksta integruotų modelių, kurie sistemingai jungtų šiuos duomenų tipus vieningoje analitinėje sistemoje ir leistų kiekybiškai įvertinti jų tarpusavio sąveiką (Egbert ir Ulbricht, 2024; Khaled ir kt., 2025; Morales-Arevalo ir Rodríguez, 2025).

Tyrimo klausimas: ar integruota sistema, apjungianti svetainės našumo (*PageSpeed*) ir vartotojų elgsenos (*Analytics*) duomenis, leidžia tiksliau identifikuoti veiksnius ir efektyviau optimizuoti svetainės veikimą nei atskirų įrankių naudojimas?

Tyrimo objektas – *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programos kūrimas.

Tyrimo tikslas – įgyvendinant *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programą, įvertinti integruotos sistemos, apjungiamos „*Google Analytics*“ ir „*PageSpeed*“ duomenis, efektyvumą.

Tyrimo metodika: informacijos šaltinių paieška, mokslinės literatūros analizė, duomenų sisteminimas, projektavimas, realizacija, testavimas ir vertinimas.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos analizė ir egzistuojantys alternatyvūs sprendimai

Google paslaugų duomenų optimizavimo programa – tai programa, skirta gauti *Google* paslaugų duomenis, juos atvaizduoti vartotojams ir suteikti įvairius duomenų optimizavimo įrankius. *Google* sistemoje, įskaitant programų sąsają, yra daugiau nei 200 *Google* paslaugų. Šios paslaugos apima klientų

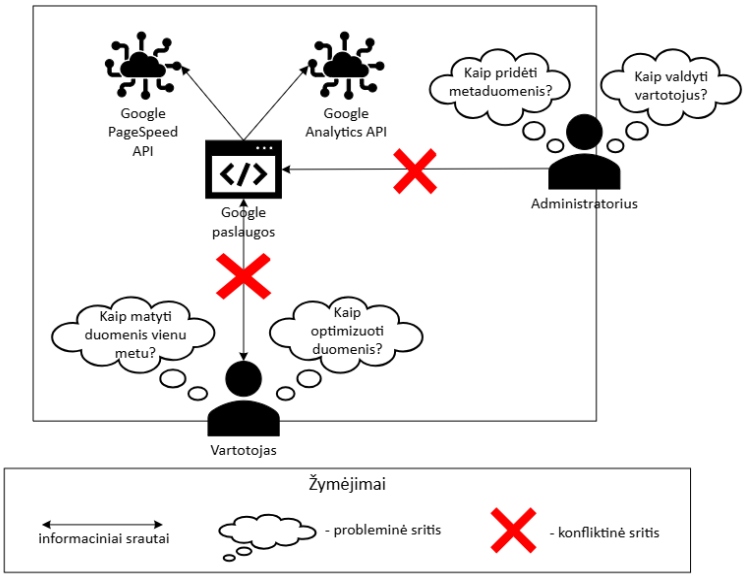
aptarnavimą, dirbtinį intelektą ir mašininį mokymąsi, verslui skirtus sprendimus bei kūrėjų įrankius. Tačiau, kadangi kiekviena paslauga yra unikali ir turi savo paskirtį, ji saugo skirtingus duomenis. Šiuos duomenis galite pasiekti per jų paslaugą, tačiau dažnai jie nėra lengvai matomi ar patogiai optimizuojami.

Google Analytics yra viena iš *Google* sistemos paslaugų, kuri pasižymi tam tikrais duomenų pateikimo ir optimizavimo apribojimais, ypač valdant kelias nuosavybes ar paskyras. Vartotojai negali peržiūrėti ar analizuoti visų nuosavybių duomenis vienoje ataskaitų srityje. Filtravimas ir segmentavimas vartotojo sąsajoje yra funkcionalūs, tačiau jie tampa nepatogūs didelio masto duomenų palyginimams.

Šios programos paskirtis yra pateikti visus *Google* paslaugų duomenis pagrindiniame puslapyje, kad vartotojas galėtų juos peržiūrėti vienu metu, ir turėti įvairų duomenų optimizavimo būdus. Optimizavimo metodai gali apimti duomenų filtravimą, duomenų failų eksportavimą arba net papildomų duomenų pridėjimą.

Apibendrinant, *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programa siekia supaprastinti duomenų gavimą iš skirtingų *Google* paslaugų, užtikrinant aiškų jų atvaizdavimą ir įvairias optimizavimo galimybes vartotojo patogumui.

Dalykinės srities raiškusis paveikslėlis pateikiamas 1 paveiksle.



1 pav. Dalykinės srities raiškusis paveikslėlis
Šaltinis: sudaryta autorių

Viršuje pateiktas raiškusis paveikslėlis vaizduoja esamą situaciją ir iššūkius, su kuriais susiduria vartotojai dirbdami su *Google* įrankiais, tai yra *Google* paslaugomis, skirtais svetainių analitikai ir našumo vertinimui. Diagrama padeda suprasti, kaip vyksta informacijos srautai, kokie yra apribojimai ir kokias problemas patiria tiek įprasti vartotojai, tiek administratoriai.

Numatomi dalyviai: vartotojas, administratorius.

Vartotojas keičiasi informacija su *Google* paslaugomis, į kurias įeina tokios sistemos kaip *Google Analytics* ir *Google PageSpeed Insights*. Informacijos srautas yra dvikryptis – vartotojas užklausia duomenų apie svetainės veiklą ar našumą ir gauna ataskaitas arba metrikas. Tačiau vartotojas apsiriboja tik peržiūra – duomenis negali matyti vienu metu ir optimizavimo galimybės nėra suteiktos.

Administratorius taip pat sąveikauja su *Google* paslaugomis. Visgi, šiuo metu *Google* paslaugos neturi integruotos funkcijos pridėti papildomos informacijos (pvz., žymų ar pastabų) prie analitikos nuosavybių ir nėra galima valdyti vartotojų prieigas.

Pačios *Google* paslaugos yra suskaidytos į dvi atskiras sistemas: *Google Analytics* (naudojimo statistikai) ir *PageSpeed Insights* (našumo vertinimui). Šios paslaugos nėra integruotos tarpusavyje – vartotojai turi pereiti iš vienos sistemos į kitą, o tai išskaido darbo eigą. Nėra galimybės vienoje vietoje peržiūrėti tiek lankomumo, tiek našumo duomenų, ir nėra priemonių pridėti kontekstinės informacijos ar dalintis ja tarp komandų.

Apibendrinant, raiškusis paveikslėlis išryškina informacijos srautų išskaidymą ir poreikį labiau integruotai aplinkai, kurioje būtų galima efektyviau optimizuoti duomenis, bendradarbiauti ir valdyti vartotojus.

Egzistuojančių alternatyvų analizė. Egzistuojančių alternatyvų analizei buvo pasirinktos šios alternatyvos: „*Looker Studio*“, „*SEMrush*“ ir „*Supermetrics*“. Jos buvo pasirinktos analizuoti, nes atspindi pagrindines sritis, kurios dirba su Google paslaugų duomenimis: vizualizacija („*Looker Studio*“), *SEO* ir optimizavimas („*SEMrush*“) bei duomenų automatizavimas („*Supermetrics*“). Kiekviena iš jų sprendžia tam tikras problemas, tačiau nė viena nepasiūlo vieningos, bendradarbiavimui pritaikytos platformos su galimybe redaguoti metaduomenis, žymėti objektus ar valdyti vartotojus – tai funkcijos, kurias apima kuriama programa.

„*Looker Studio*“ – tai nemokamas duomenų vizualizavimo įrankis, leidžiantis kurti interaktyvias ataskaitas iš *Google Analytics*, *Ads*, *Search Console* ir kitų šaltinių. Nors jis puikiai tinka duomenims rodyti, jis nepalaiko našumo rodiklių, tokių kaip *Google PageSpeed*, ir nesuteikia galimybės valdyti vartotojų teisių ar pridėti metaduomenų (Google Cloud, 2025).

„*SEMrush*“ – tai mokama *SEO* platforma, siūlanti raktažodžių stebėjimą, nuorodų analizę ir svetainės auditus. Ji integruojama su Google Analytics ir Search Console, tačiau nepalaiko metaduomenų pridėjimo, vartotojų valdymo ar vieningo Google paslaugų duomenų optimizavimo (Semrush, 2026).

„*Supermetrics*“ – tai duomenų perdavimo įrankis, skirtas automatiškai traukti informaciją iš *Google* paslaugų į *Google Sheets*, *Excel* ar *BigQuery*. Jis padeda kurti ataskaitas ir taupo laiką, tačiau neturi vizualinės sąsajos, žymėjimo funkcijų ar vartotojo optimizacijos galimybių (Google Workspace Marketplace, 2025).

„*Looker Studio*“, „*SEMrush*“, ir „*Supermetrics*“ palyginimas pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė

Egzistuojančių alternatyvų palyginimas

Funkcija / Alternatyvas	***Looker Studio***	***SEMrush***	***Supermetrics***
Integracija su Google Analytics	Taip	Taip	Taip
Integracija su Search Console	Taip	Taip	Taip
Integracija su Google PageSpeed	Ne	Ne	Ne
Metaduomenys	Nėra	Nėra	Nėra
Vartotojų teisių valdymas	Ribotas	Taip (komandų valdymas)	Ribotas
Vizualizacijos galimybės	Labai plačios	Ribotos	Ne (tik duomenų perdavimas)
Eksportavimo galimybės	PDF, CSV, kt.	PDF, CSV, kt.	CSV, Excel, Sheets
Naudotojo sąsajos paprastumas	Intuityvi, pritaikyta visiems	Sudėtingesnė, labiau pažengusiems	Paprasta, bet techninė naudotojams
Pagrindinis tikslas	Ataskaitų ir duomenų vizualizacija	SEO ir rinkodaros analizė	Duomenų surinkimo ir perkėlimo automatizavimas
Kaina	Nemokama	Mokama, planai nuo ~130 €/mėn.	Mokama, planai nuo ~29 €/mėn.

Šaltinis: sudaryta autorių

„*Looker Studio*“, „*SEMrush*“ ir „*Supermetrics*“ yra skirtingi įrankiai, skirti dirbti su *Google* paslaugų duomenimis, tačiau kiekvienas jų orientuotas į skirtingas sritis:

- „*Looker Studio*“ išsiskiria duomenų vizualizavimu – jis leidžia kurti interaktyvias ataskaitas iš tokių šaltinių kaip *Google Analytics* ir *Search Console*. Vis dėlto jis nepalaiko *PageSpeed*, metaduomenų ar vartotojų valdymo;
- „*SEMrush*“ yra išsamus *SEO* įrankis, siūlantis raktažodžių analizę, svetainės auditus ir ribotą *PageSpeed* integraciją. Nors jis integruojasi su *Google* paslaugomis, jis nesuteikia galimybės žymėti duomenų ar valdyti vartotojų;
- „*Supermetrics*“ yra orientuotas į duomenų automatizavimą, perduodant informaciją iš „*Google*“ paslaugų į *Google Sheets*, *BigQuery* ar *Excel*. Tai efektyvus sprendimas ataskaitų kūrimui, bet neturi sąsajos ar duomenų interpretacijos galimybių.

Apibendrinant, „*Looker Studio*“, „*SEMrush*“ ir „*Supermetrics*“ įrankiai sprendžia skirtingus uždavinius – vizualizaciją, *SEO* analizę ar duomenų perdavimą, tačiau nė vienas nepasiūlo visapusiško optimizavimo, žymėjimo ir vartotojų valdymo sprendimo.

Mokslinės literatūros analizė. Šiame poskyryje yra analizuojama mokslinės literatūros, kurios yra ir bus naudojamos programos įgyvendinimui.

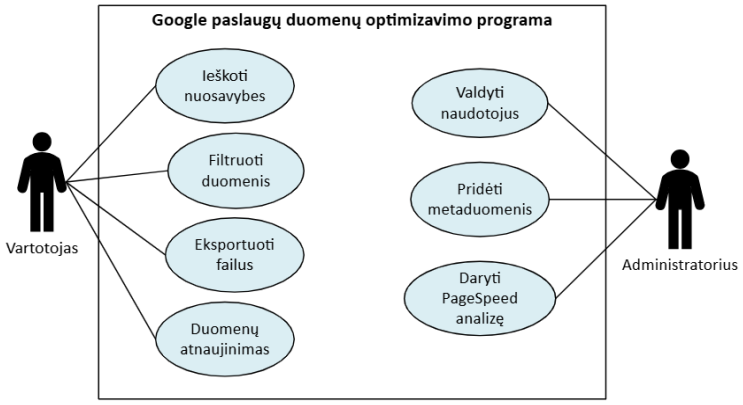
Straipsniai ir jų analizė:

1. Straipsnis: „*The 'Rich Pictures' Method: Its Use and Value, and the Implications for HRD Research and Practice*“. Šiame straipsnyje yra analizuojamas raiškaus paveikslėlio metodas, jo naudojimas ir vertė, kad paskatintu *HRD* tyrėjus pripažinti jo potencialą tiriant žmogaus vystymąsi. Šis straipsnis buvo pritaikytas kuriant raiškųjį paveikslėlį, atspindintį įmonės probleminę situaciją (Gisby ir kt., 2023).
2. Straipsnis: „*Use Case Modeling in a Research Setting of Developing an Innovative Pilgrimage Support System*“. Šiame straipsnyje yra analizuojamas vartotojų atvejų modeliavimas. Šis straipsnis bus naudojamas programos panaudojimo atvejų supratimui, modeliavimui ir surašymui (Vranić ir kt., 2023).
3. Straipsnis: „*An Engineering Approach to Integrate Non-Functional Requirements (NFR) to Achieve High Quality Software Process*“. Šiame straipsnyje yra analizuojami programinės įrangos reikalavimai, labiau nefunkciniai reikalavimai. Šis straipsnis bus naudojamas funkcinių ir nefunkcinių reikalavimų supratimui ir integravimui (Gondal ir kt., 2020).
4. Straipsnis: „*A Three-Tier Architecture Visual-Programming Platform for Building-Lifecycle Data Management*“. Šiame straipsnyje yra analizuojama trijų sluoksnių architektūra ir jos komponentai. Šis straipsnis bus naudojamas planuojamos programos architektūros supratimui ir kūrimui (Abdelrahman ir kt., 2020).
5. Straipsnis: „*Modeling Difficulties in Creating Conceptual Data Models*“. Šiame straipsnyje yra analizuojamas konceptualus modeliavimas ir jų sunkumų tipai. Šis straipsnis bus naudojamas konceptualaus modelio kūrimui duomenų bazės modeliavimui (Rosenthal ir kt., 2022).
6. Straipsnis: „*Analyzing Database Optimization Strategies in Laravel for an Enhanced Learning Management*“. Šiame straipsnyje yra analizuojamas duomenų bazės sistemos veikimo našumas *Laravel* aplinkoje. Šis straipsnis bus naudojamas Laravel naudojimui kartu su duomenų baze (Sasmoko ir kt., 2024).
7. Straipsnis: „*Integration With Docker Container Technologies for Distributed and Microservices Applications: A State-of-the-Art Review*“. Šiame straipsnyje yra analizuojama *Docker* konteinerizacija ir yra aptariami naujos kylančios problemos, susijusios su *Docker* pagrindu vykdomu diegimu. Šis straipsnis bus naudojamas *Docker* aplinkos naudojimui su vaizdais, tai yra failų bibliotekomis, kurios bus įdiegiamos ir naudojamos programos paleidimui (Kithulwatta, 2022).

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos projektavimas

Panaudojimo atvejai. Panaudojimo atvejų diagramos yra naudingos norint parodyti, kaip panaudojimo atvejai yra susiję aiškiais ryšiais ir kaip jie grupuojami pagal temą. Be to, panaudojimo atvejai rašomi natūralia kalba, kad būtų lengvai suprantami visiems suinteresuotiesiems asmenims. Sumodeliuota *UML* panaudojimo atvejų diagrama leidžia išskirti pagrindinius kuriamo produkto funkcinius reikalavimus. Taip pat patogiau suprasti nekompiuterizuojamų darbų aktorių atliekas funkcijas. Panaudojimo atvejų diagrama leidžia vaizdžiai pateikti projekto rezultatą ir tuomet lengviau nustatyti jam pasiekti būtinus darbus.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos panaudojimo atvejai yra parodyti *UML* diagramoje (2 pav.).



2 pav. Panaudojimo atvejų UML diagrama
Šaltinis: sudaryta autorių

Panaudojimo atvejų diagrama pavaizduoja, kaip programą naudoja vartotojas ir administratorius. Vartotojas gali ieškoti nuosavybių pagal pavadinimą, filtruoti duomenis pagal pasirinktus kriterijus, eksportuoti failus (pvz., *CSV* ar *PDF*) tolesnei analizei ir atnaujinti duomenis tiesiai iš *Google API*. Administratorius – vartotojas su administratoriaus vaidmeniu, turi platesnes teises – jis gali valdyti vartotojų

paskyras, pridėti metaduomenis (žymas, būsenas ir pastabas) prie *Google Analytics* nuosavybių ir vykdyti PageSpeed analizę, kad įvertintų svetainės našumą.

Apibendrinant, *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programos panaudojimo atvejų diagrama aiškiai atskiria kiekvieno vaidmens atsakomybes ir parodo programos orientaciją į tiek duomenų prieinamumą, tiek administracinį valdymą.

Funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai. Programinės įrangos sistemos yra pagrįstos funkcinių ir nefunkcinių reikalavimų visuma. Yra keletas reikalavimų iškėlimo metodų, kuriuos galima taikyti siekiant apibrėžti visus kuriamos sistemos reikalavimus. Pradedant nuo funkcinių reikalavimų specifikavimo ir su jais susijusių veikėjų identifikavimo pagal naudojimo atvejų metodą. Tam tikri nefunkciniai reikalavimai ir kokybės atributai gali būti įtraukti jau šiame etape, atsižvelgiant į kūrėjo patirtį ir kuriamos sistemos pobūdį.

Funkciniai reikalavimai – tai tokie reikalavimai, kurie nusako, kokias funkcijas programa privalo turėti, kad vartotojas galėtu atlikti savo užduotis.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos funkciniai reikalavimai:

1. Vartotojas gali filtruoti nuosavybes.
2. Vartotojas gali ieškoti nuosavybę pagal pavadinimą.
3. Vartotojas gali eksportuoti failus su duomenimis.
4. Vartotojas gali atnaujinti duomenis per mygtuką.
5. Administratorius gali pridėti metaduomenis prie nuosavybių (žymą, būseną ir pastabą).
6. Administratorius gali daryti svetainės *Pagespeed* analizę.
7. Administratorius gali valdyti paskyras (pridėti naujas paskyras, ištrinti senas paskyras, keisti paskyros vaidmenį tarp žiūrovo, tai yra įprasto vartotojo, ir administratoriaus).

Nefunkciniai reikalavimai – tai tokie reikalavimai, kurie nėra susieti su programos veikimu, bet apibrėžia, kaip programa turėtų veikti, užtikrina programos patogumą, patikimumą ir efektyvumą.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos nefunkciniai reikalavimai:

1. Programa turi naudoti *Laravel* karkasą.
2. Programa turi saugoti duomenis *MySQL* duomenų bazėje.
3. Programoje turi būti integruota su *Google Analytics API*.
4. Programoje turi būti integruota su *Google PageSpeed Insights API*.

Apibendrinant, prieš *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programos realizaciją buvo gauti ir surašyti programos funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai, į kuriuos bus atsižvelgta programos kūrimo procese, ir tikrinama, ar programa yra galutinai paruošta.

Numatomas architektūros sprendimas. Planuojamos programos architektūra remiasi sluoksniuotu klientas-serveris modeliu – trijų sluoksnių architektūra.

Trisluoksnė architektūra yra klientas-serveris tipo programinės įrangos architektūros modelis, kuris turi daug pritaikymo galimybių paskirstytose programose. Pagrindinis šios architektūros bruožas yra tai, kad ji leidžia pakartotinai naudoti programų sudedamąsias dalis (dar vadinamas komponentais), pavyzdžiui, bendrinti programinius komponentus vykdymo metu, dubliuoti tą patį komponentą, kontroliuojamai adaptuoti kodą arba nepriklausomai adaptuoti komponentus. Šis modelis susideda iš trijų funkcionaliai atskirtų sluoksnių:

1. Pateikties sluoksnis (kliento pusė).
2. Programų (verslo logikos) sluoksnis (dar vadinamas valdiklių ir procesų valdymo sluoksniu).
3. Duomenų sluoksnis (dar vadinamas duomenų saugykla).

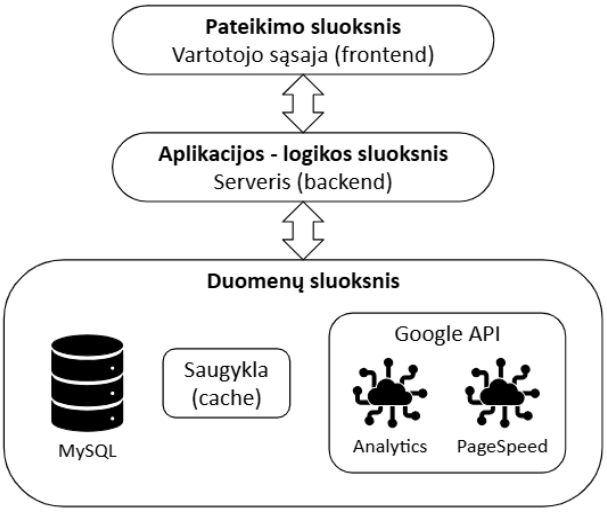
Pateikties sluoksnis yra naudotojo sąsajos dalis. Visi žmogaus ir kompiuterio sąveikos veiksmai vyksta šiame sluoksnyje. Tuo tarpu verslo logikos sluoksnį sudaro pagrindinis variklis, kuriame veikia komponentų funkcijos – jos apdoroja užklausas, gaunamas iš pateikties sluoksnio, paima atitinkamus duomenis iš duomenų sluoksnio, apdoroja juos ir grąžina atsakymą atgal į pateikties sluoksnį. Galiausiai, duomenų sluoksnis apima duomenų užklausas (gavimą iš duomenų šaltinio), saugojimą (pvz., reliacinėje duomenų bazėje vietiniame serveryje) ir prieigą (duomenų perdavimą naudotojui).

Toks trijų sluoksnių architektūros tipas leidžia aiškiai atskirti vartotojo sąsają, verslo logiką ir duomenų tvarkymą.

Programos architektūra pritaikyta tiek paprastiems vartotojams, tiek administratoriams. Vartotojai naudojasi analitiniais duomenimis bei našumo rezultatais, o administratoriai turi papildomų galimybių – jie gali tvarkyti metaduomenis ir valdyti vartotojų paskyras. Šis skirtumas įtakoja programos funkcinių dalių paskirstymą ir sąveikas.

Programos esmė – tai vartotojo sąsajos sluoksnis, loginis apdorojimo sluoksnis bei duomenų valdymo sluoksnis, kuris taip pat jungiasi su išorinėmis paslaugomis. Be to, programa palaiko prieigos kontrolę ir duomenų eksportavimo galimybes.

Programos numatoma architektūros sprendimas atvaizduotas 3 paveiksle.



3 pav. Numatoma programos architektūros sprendimo diagrama
Šaltinis: sudaryta autorių

Programos architektūros sluoksnių analizės:

1. Pateikimo sluoksnis (vartotojo sąsaja). Tai sluoksnis, su kuriuo tiesiogiai sąveikauja vartotojas. Jis atsakingas už duomenų pateikimą, vartotojo įvestį ir užklausų perdavimą verslo logikos sluoksniui. Projektavimo etape šis sluoksnis gali būti įgyvendintas kaip internetinė sąsaja arba darbalaukio programa. Pagrindinės funkcijos: prisijungimas, duomenų peržiūra, filtravimas, eksportavimas bei administracinės funkcijos. Galimi technologiniai sprendimai: darbalaukio grafinė vartotojo sąsaja, interneto sąsaja su interaktyviais komponentais.
2. Aplikacijos – logikos sluoksnis (serveris). Šis sluoksnis atsako už programos loginį funkcionavimą. Jis gauna užklausas iš sąsajos sluoksnio, atlieka validacijas, taiko verslo taisykles (pvz., vaidmenų tikrinimus), apdoroja metaduomenis ir organizuoja duomenų gavimą iš išorinių šaltinių arba duomenų bazės. Taip pat čia įgyvendinama vartotojų teisių kontrolė. Pagrindinės atsakomybės: autentifikacija ir vaidmenų patikra, filtrų pritaikymas ir metaduomenų tvarkymas, vartotojų valdymas, sąveika su duomenų bei išorinių paslaugų sluoksniu.
3. Duomenų sluoksnis. Šis sluoksnis saugo informaciją ir bendrauja su išorinėmis paslaugomis. Vidinėje dalyje saugomi vartotojų duomenys, metaduomenys, puslapių našumo rezultatai ir kita svarbi informacija saugyklose ir *MySQL DB*. Išorinėje dalyje ši programa jungiasi su *Google Analytics* ir *PageSpeed API*. Galimi duomenų tipai: vartotojų informacija ir vaidmenys, *Analytics* paskyrų ir nuosavybių informacija, svetainių našumo rezultatai, metaduomenys (žymos, būsena ir pastabos).

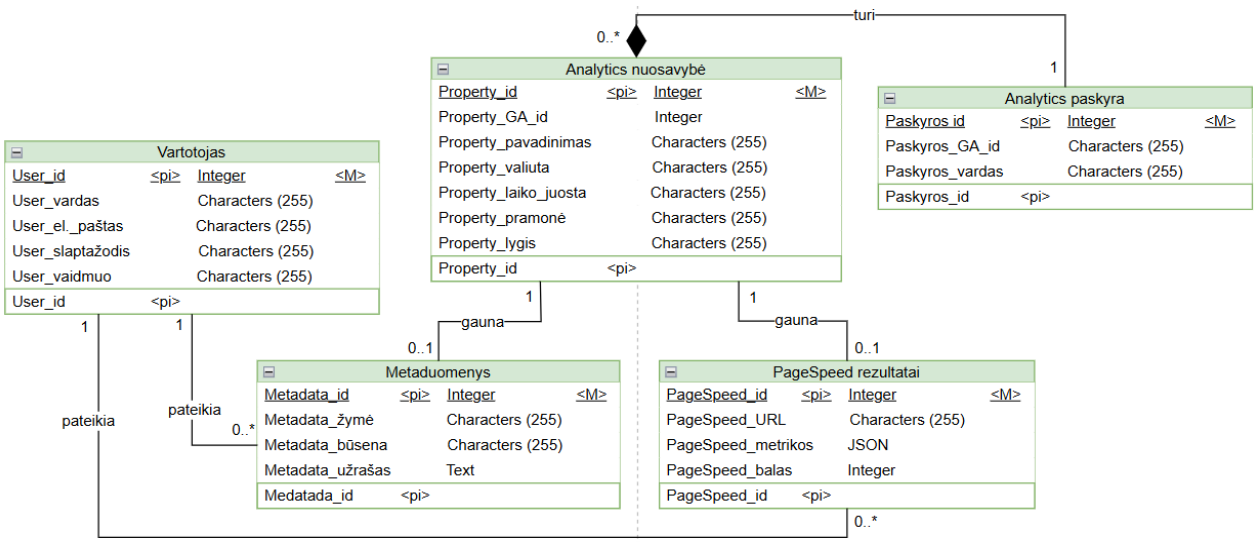
Kai vartotojas inicijuoja veiksmą (pvz., filtruoja duomenis ar išsaugo pastabą), užklausa keliauja iš vartotojo sąsajos į serverio sluoksnį. Aplikacijos sluoksnis susisiekia su duomenų saugykla ar išorine *API* ir grąžina apdorotus rezultatus, kurie vėliau rodomi vartotojo sąsajoje.

Apibendrinant, programa bus remiama sluoksniuota klientas-serveris architektūra, susidedančia iš vartotojo sąsajos sluoksnio, verslo logikos sluoksnio ir duomenų bei integracijos sluoksnio. Toks sprendimas užtikrina aiškų atsakomybių paskirstymą, supaprastina palaikymą ir leidžia lengvai plėsti programą ateityje.

Duomenų bazės loginis duomenų modelis, nusakantis lenteles ir ryšius tarp jų, pateiktas 4 paveiksle.

Visos esybės turi identifikatorių. Vartotojas turi vardą, elektroninį paštą, slaptažodį ir vaidmenį. Metaduomenys turi žymą, būseną ir pastabą. *PageSpeed* rezultatai turi *URL*, metrikas ir našumo balą. *Analytics* nuosavybė turi *Analytics* nuosavybės *ID*, pavadinimą, valiutos tipą, laiko juostą, pramonę ir paslaugos lygį. Galiausiai, *Analytics* paskyra turi paskyros *ID* iš *Analytics* ir vardą.

Vienas vartotojas, su administratoriaus vaidmeniu, gali pateikti nulį arba daugiau metaduomenų ir *PageSpeed* rezultatų. Viena *Analytics* nuosavybė gauna nuli arba vieną metaduomenis ir *PageSpeed* rezultatus. Viena *Analytics* paskyra gali turėti nulį arba daug nuosavybių, o *Analytics* nuosavybės egzistuoja, jei yra *Analytics* paskyra.

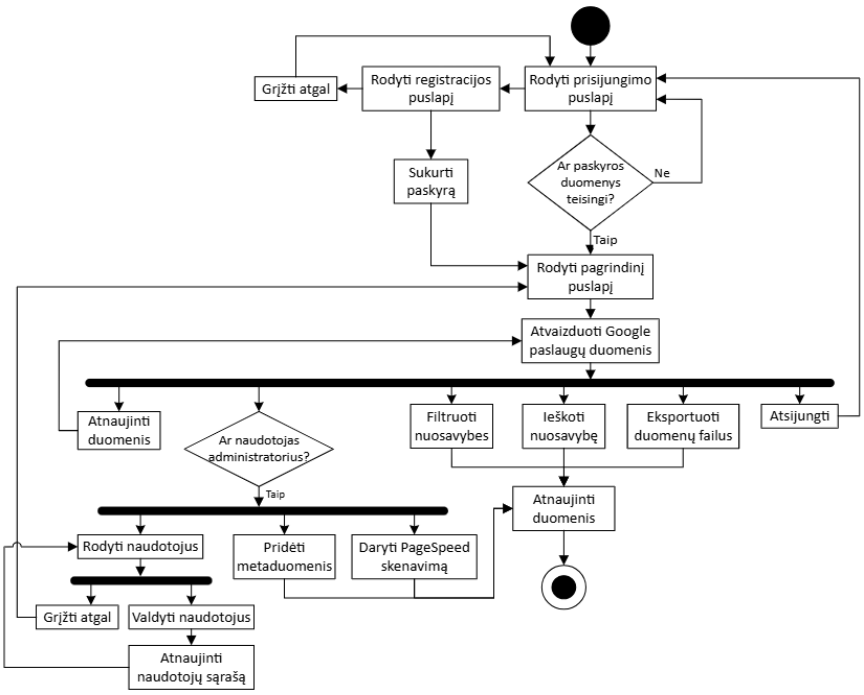


4 pav. Loginis duomenų modelis
Šaltinis: sudaryta autorių

Loginiame duomenų modelyje galima matyti detalesnę informaciją apie duomenis. Visuose esybėse pirminiai raktai yra jų identifikatoriai, ir jie visi privalo būti užpildyti.

Vartotojo sąsajos dizainas. Vartotojo sąsajos (*UI*) dizainas yra procesas, kurio metu kuriama vizualinė išvaizda ir interaktyvūs elementai skaitmeninėje sistemoje – svetainėje, mobilioje programėlėje ar programinėje įrangoje.

UI dizainui reikia sukurti vartotojo kelią, kuris parodytų, kokį procesą vartotojas pereina, norėdamas atlikti tam tikrą užduotį. Vartotojo kelias padeda komandoms analizuoti sąveikas tarp kiekvieno ekrano ir tai, kaip vartotojas juda per visą savo kelionę (Kreimer, 2021). Dinaminės *UML* diagramos aprašo sistemų elgseną. Dinaminė diagrama parodo veiksmus, operacijas ir pokyčius, kurie vyksta sistemoje laikui bėgant. Tuo tarpu statinė diagrama aprašo sistemos ar jos dalies savybes (Reselman, 2021).
Programos vartotojo kelias nuo prisijungimo puslapio rodymo iki duomenų optimizavimo yra pateiktas dinaminėje diagramoje (5 pav.).



5 pav. Programos dinaminė vartotojo veiklos diagrama
Šaltinis: sudaryta autorių

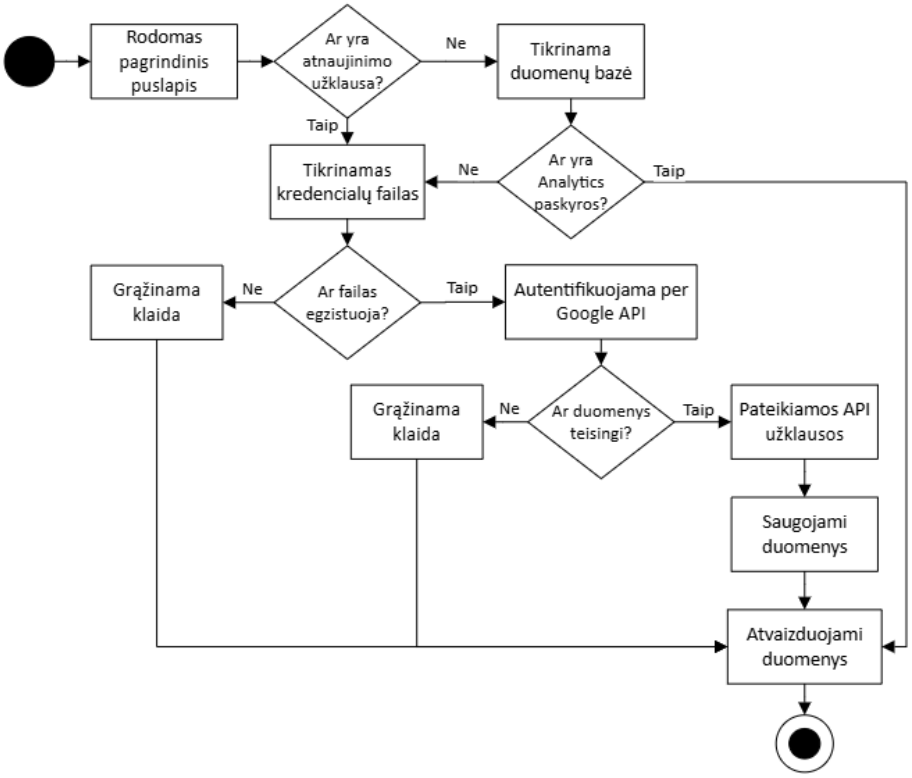
Dinaminis vartotojo veiklos diagrama vaizduoja veiksmų seką, kurią vartotojas atlieka sąveikaudamas su programine sistema. Skirtingai nei statiški ekrano maketai, šis grafas koncentruojasi į loginį perėjimą tarp skirtingų būsenų ar vaizdų, atsižvelgiant į vartotojo pasirinkimus, programos atsakymus ir duomenų prieinamumą. Šio grafo tikslas yra parodyti, kaip vartotojas pereina per funkcijas, kaip programa reaguoja į įvestį ir kokios vidinės sąlygos (pvz., prisijungimo būsena ar talpyklos duomenys) turi įtakos bendrai eigai. Šis grafas padeda vizualizuoti vartotojo kelią, išvengti nenumatytų situacijų ir anksti aptikti nereikalingus žingsnius projektavimo metu.

Apibendrinant, vartotojo kelias atlieka itin svarbų vaidmenį kuriant efektyvią ir vaidmenimis grįstą vartotojo patirtį. Dinaminėje diagramoje, modeliuojant vartotojo veiksmus ir sąlyginius programos atsakus, galima užtikrinti tiek intuityvią navigaciją, tiek vidinės logikos atitikimą. Tokia eiga garantuoja, kad vartotojai, nepriklausomai nuo jų techninio pasirengimo, būtų nuosekliai vedami per autentifikaciją, duomenų prieigą, optimizavimą ir ataskaitų generavimą be painiavos ar loginių spragų.

Pagrindiniai algoritmai. Algoritmas yra instrukcijų rinkinys, leidžiantis kompiuteriui atlikti konkrečias užduotis, skirtas problemai nustatyti, sprendimui sukurti ir pritaikyti šią alternatyvą problemai įveikti. Kiekvienas algoritmas atspindi loginę veiksmų seką, vykdomą automatiškai arba inicijuojamą vartotojo. Šių srautų supratimas yra būtinas norint suvokti, kaip duomenys juda programoje ir kaip vartotojų veiksmai aktyvuoja pagrindines funkcijas.

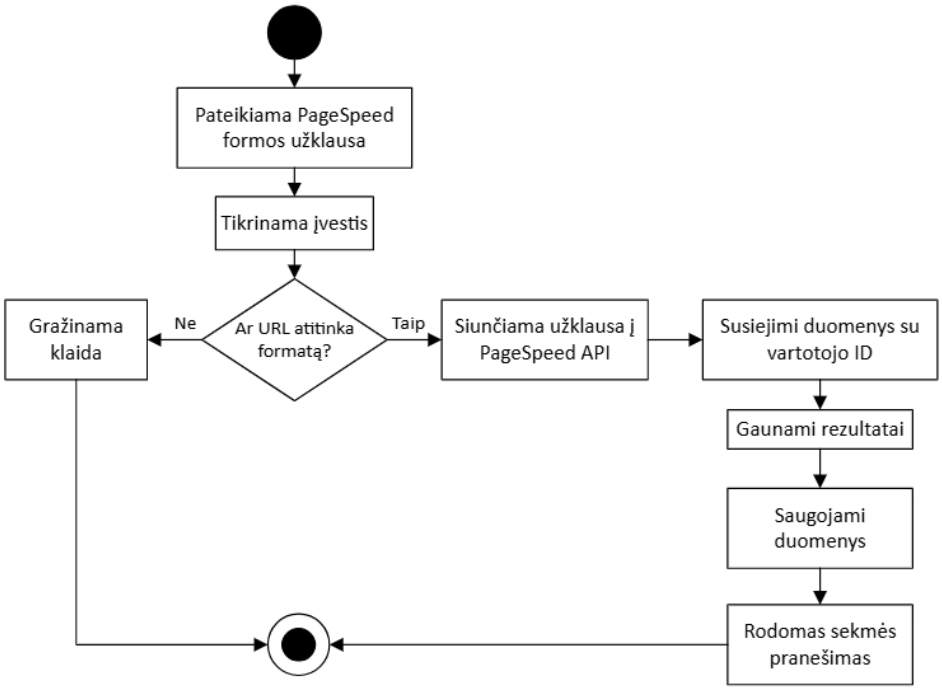
Pagrindiniai šios programos algoritmai apima vartotojų autentifikaciją, duomenų gavimą iš *Google Analytics*, metaduomenų tvarkymą, puslapio greičio analizę per *PageSpeed API*, duomenų filtravimą ir ieškojimą. Šie procesai yra esminiai, nes kiekvienas iš jų atlieka specifinę funkciją, be kurios programos optimizavimo galimybės būtų ribotos.

Google Analytics duomenų sinchronizavimo algoritmas. Šis algoritmas kontroliuoja, ar duomenys turi būti gaunami iš vietinės duomenų bazės ar iš *Google Analytics API*, taip užtikrindamas efektyvų veikimą ir sumažindamas bereikalingas *API* užklausas. *Google Analytics* duomenų sinchronizavimo algoritmas yra pateiktas dinaminėje diagramoje (6 pav.).



6 pav. *Google Analytics* duomenų sinchronizavimo algoritmo diagrama
Šaltinis: sudaryta autorių

PageSpeed analizė ir saugojimo algoritmas. Šis algoritmas leidžia administratoriams vertinti svetainių veikimą naudojant *Google PageSpeed Insights*, išsaugant rezultatus. *PageSpeed* nuskaitymo ir saugojimo algoritmas yra pateiktas dinaminėje diagramoje (7 pav.).



7 pav. PageSpeed nuskaitymo ir saugojimo algoritmo diagrama
Šaltinis: sudaryta autorių

Apibendrinant, pagrindiniai *Google* paslaugų duomenų optimizavimo programos algoritmai yra susieti su *Google API*: paslaugos paskyrų, nuosavybių ir kitokių duomenų gavimu, rodymu ir optimizavimu, kokios yra veiklos ir jų srautai.

***Google* paslaugų duomenų optimizavimo programos realizavimas ir testavimas**

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos realizacijos eiga:

1. Technologijų pasirinkimas ir naudojimas programos realizacijai, kurios užtikrintų lankstumą ir plėtrą.
2. *Google Analytics* ir *PageSpeed API* paslaugų integravimas duomenų gavimui.
3. Duomenų optimizavimo funkcijų programavimas.
4. Duomenų bazės realizavimas duomenų saugojimui.
5. Grafinės vartotojo sąsajos sukūrimas – tiek vartotojams, tiek administratoriams.

Technologijų naudojimas

Šioje dalyje apžvelgiamos technologijos, kurios buvo pasitelktos kuriant programą. Jų parinkimas buvo svarbus siekiant užtikrinti programos patikimumą, lankstumą, saugumą ir patogų naudojimą. Ši analizė leidžia suprasti, kaip technologiniai sprendimai buvo integruoti į realų programos kūrimo procesą. Programos realizacijoje buvo naudojamos šios technologijos:

- *Laravel*;
- *Docker*;
- *Visual Studio Code*.

Laravel – PHP kalbos karkasas su modelio-vaizdo-valdiklio (angl. *Model–View–Controller, MVC*) architektūros modeliu. Šis modelis atskiria verslo logiką, prieš pateikimo ir duomenų sluoksnius, taip palengvindamas švaraus ir struktūruoto kodo valdymą. Karkasas naudoja *Blade* variklį, kad sukurtų vaizdą, kuris naudoja *Blade* sintaksę, panašią į *PHP*. *Laravel* karkasas taip pat suteikia *Eloquent ORM* funkcijas, kurios padeda kurti objektus *Laravel* aplinkoje ir padaro duomenų užklausas patogesnes. Šios ir kitos *Laravel* savybės buvo naudojamos programos realizacijai.

Laravel naudojimas. Laravel atlieka pagrindinį vaidmenį programoje – tai sistema, kuri valdo beveik viską, kas vyksta, nuo maršruto parinkimo ir autentifikavimo iki aplikacijų *API* integravimo ir duomenų valdymo. Programos realizacijai buvo naudojami šie *Laravel* įrankiai ir funkcijos:

- svetainių adresų (*URL*) maršrutų valdymo funkcija, kuri yra naudojama vaizdų rodymui;
- programos logikos apdorojimo funkcija, kuri yra naudojama kurti valdiklius. Programoje yra kuriami *Laravel* valdikliai su funkcijomis, tokiomis kaip duomenų gavimas ir išsaugojimas, *Google* paslaugų nuskaitymų apdorojimas, filtravimo ir rūšiavimo atlikimas, failų eksportavimas ir t. t.;

- duomenų bazės darbo funkcija, kuri yra naudojama administratoriaus metaduomenų saugojimui, *Google PageSpeed* rezultatų saugojimui ir vartotojų valdymui. *Laravel* suteikia įrankius, leidžiančius prižiūrimai sąveikauti su duomenų bazėmis. Vienas iš šių įrankių, kuris yra naudojamas programoje, yra migracijos. Programoje, migracijos sukuria visas *DB* lenteles, nuo vartotojų iki *Google PageSpeed* rezultatų;
- prieigos valdymo funkcija, kuri įdiegia autentifikacijos sistemą su prisijungimu, registracija ir atsijungimu. Ši funkcija apriboja vartotojų prieigą prie puslapių per maršrutus, valdo prisijungimo ir registracijos srautus, ir užtikrina, kad tik administratoriai gali redaguoti metaduomenis ir daryti *PageSpeed* analizę. Prieigos kontrolės valdymui, prie kai kurių maršrutų yra pridėta autentifikacija *middleware*, kad prie jų gali prieiti tam tikri vartotojai: */register* maršrute – tik neprisijungę vartotojai, */services* ir */update-property-meta* maršrutuose – tik prisijungę vartotojai;
- *Blade* įrankis, kuris yra naudojamas kurti šablonus prisijungimo ir registracijos formoms, rodyti *Google Analytics* paskyras, nuosavybes ir kitus duomenis, rodyti turinį priklausomai nuo vartotojo vaidmens, ir naudoti bendrus šablonus antraštėms ir poraštėms, kad būtų išvengta pasikartojimo;
- Vite įrankis, kuris yra naudojimas *CSS* ir *JS* failų tvarkymui, tiesioginiu perkrovimui, *Blade* integravimui ir gamybos konstrukcijai.

Docker – tai yra atvirojo kodo platforma, leidžianti kūrėjams kurti, diegti, paleisti, atnaujinti ir valdyti talpyklas. *Docker* talpyklos (angl. *containers*) – tai standartizuoti vykdomieji komponentai, sujungiantys programos šaltinio kodą su operacinės sistemos bibliotekomis ir priklausomybėmis, reikalingomis tam kodui paleisti bet kurioje aplinkoje. *Docker* vaizdas (angl. *image*) – tai atskiras vykdomasis failas, kuriame yra tam tikros bibliotekos, priklausomybės ir failai, kuriuos konteineris turi paleisti. *Docker* vaizdas yra viena iš pagrindinių objektų *Docker* architektūroje. Norint sukurti arba paleisti *Docker* konteinerį, reikalingi pagrindiniai *Docker* vaizdai.

Docker naudojimas. Docker yra naudojamas kaip priemonė konteinerizuoti ir valdyti kūrimo aplinką. Programa suskaidyta į kelias paslaugas, kurios kiekviena paleidžiama atskirame konteineryje: PHP (*Laravel* serverio pusei), *MySQL* (duomenų bazei), *NGINX* (svetainės serveriui), *Node* (*Vite* ir *frontend* failų kompiliavimui), *Redis* (talpykloms) ir *phpMyAdmin* (duomenų bazės valdymui).

Programoje naudojami *Docker* vaizdai – paslaugos atskiruose konteineriuose:

- *PHP* – serverio pusės (angl. *backend*) programavimo kalba, skirta žiniatinklio kūrimui, tačiau ji taip pat gali būti naudojama kaip bendrosios paskirties programavimo kalba. Tai yra pagrindinė programos programavimo kalba, paleidžianti *Laravel* karkasą ir sąveikauja su duomenų baze;
- *Nginx* – atvirojo kodo atvirkštinis tarpinis serveris, skirtas *HTTP*, *HTTPS* ir kitokiems protokolams, taip pat apkrovos balansavimo priemonė, *HTTP* talpykla ir žiniatinklio serveris. *Nginx* užtikrina žiniatinklių pateikimą tarp vartotojų ir *PHP*;
- *MySQL* – populiariausia atvirojo kodo duomenų bazė pasaulyje, dėl savo įrodyto našumo, patikimumo ir naudojimo paprastumo. Šioje duomenų bazėje yra saugojami visi nuolatiniai duomenys, programos paskyrų duomenys ir administratoriaus pridėti metaduomenys;
- *phpMyAdmin* – nemokama programinės įrangos priemonė, parašyta *PHP*, skirta valdyti *MySQL* žiniatinklyje. Ši priemonė supaprastina duomenų bazės valdymą, leidžia lengvai stebėti ir rankiniu būdu koreguoti duomenis;
- *Node.js* – programinės įrangos platforma, skirta keičiamo dydžio serverio ir tinklo programoms. *Node.js* programos yra skirtos maksimaliai padidinti pralaidumą ir efektyvumą. *Node.js* kompiliuoja ir pateikia išorinį programavimą (angl. *frontend*), ir užtikrina dinamišką vartotojo sąsają sąveikai su vidiniu programavimu;
- *Redis* – greičiausia duomenų platforma pasaulyje. Tai teikia debesų ir vietinius sprendimus talpykloje ir vektorių paieškai. Redis gerina programos našumą talpinant dažnai pasiekiamus duomenis ir valdant užduočių eiles, kad darbas būtų sklandesnis.

Docker Compose koordinuoja šių konteinerių veikimą ir leidžia jiems bendrauti per bendrą tinklą. Tokia architektūra užtikrina programos perkėlimą, atkuriamumą ir lengvą paleidimą bet kuriame kompiuteryje, kuriame įdiegtas *Docker*.

Visual Studio Code (*VS Code*) – integruota kūrimo aplinka (angl. *Integrated Development Environment*, *IDE*), skirta operacinėms sistemoms ir žiniatinklio naršyklėms. *VS Code* yra nemokama, turi didelę ir aktyvią bendruomenę, siūlo stabilius atnaujinimus ir gali veikti kartu su *GitHub* – žiniatinklio sąsaja, leidžianti keliams žmonėms pasiekti tinklapio kodą ir padaryti pakeitimus.

Nesvarbu, ar rašoma *JavaScript*, *Python*, *C++* ar kita programavimo kalba, *VS Code* suteikia sklandžią programavimo patirtį. Su įrankiais derinimui (angl. *debugging*), versijų valdymui naudojant *Git* ir plačiomis pritaikymo galimybėmis, ši aplinka sukurta tam, kad programavimas būtų efektyvus ir malonus.

Pradedantiesiems tai puikus atspirties taškas dėl savo paprastumo, draugiškos bendruomenės ir gausybės internetinių išteklių (Kramer, 2024).

VS Code naudojimas. VS Code buvo naudotas programos kodavimui ir *Laravel* šablonų modifikavimui. *VS Code* veikia kaip pagrindinė kūrimo aplinka, suteikianti galimybę redaguoti kodą, naudoti *Git* ir terminalą vienoje vietoje.

Apibendrinant, programos realizacijai buvo naudojamos šiuolaikinės technologijos – *Laravel*, *Docker* ir *VS Code* – užtikrinančios efektyvų kūrimo procesą. Šių technologijų derinys padeda pasiekti efektyvesnį kūrimą ir lengvesnį programos palaikymą bei plėtrą.

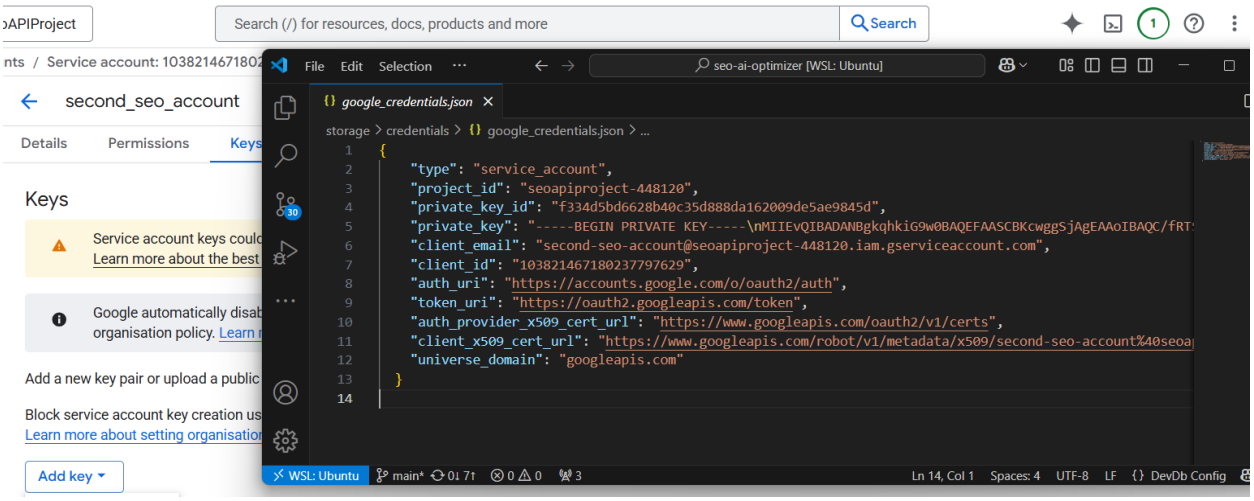
Google paslaugų duomenų gavimas. Google paslaugų duomenų gavimas yra svarbiausia šios programos dalis. Kad ši programa galėtų optimizuoti duomenis, reikia iš tam tikrų *Google* paslaugų gauti duomenis optimizavimui.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programoje yra naudojamos šios *Google* paslaugos:

- *Google Cloud*;
- *Google Analytics*;
- *Google PageSpeed*.

Google Cloud – tai debesų kompiuterijos paslaugos, kurias teikia *Google*. Tai leidžia žmonėms ir įmonėms naudotis *Google* technologijomis internete be savo fizinių serverių ar kompiuterių. Ši paslauga gali saugoti failus, palaikyti svetaines ir programas serveriuose, analizuoti didelius duomenų kiekius, saugoti duomenis, sujungti kitas *Google* paslaugas ir t. t.

Naudojant *Google Cloud* yra sukuriamas projektas ir bent viena paslaugos paskyra. Paslaugos paskyra yra reikalinga, nes programa autentifikuojasi naudodama tą paslaugos paskyrą, kad įgalintu *Google Analytics API* ir *Google PageSpeed API*. Autentifikavimas yra daromas per paslaugos paskyros raktą, kurį negalima viešai skelbti arba Google automatiškai jį išjungs. Sukuriant raktą yra atsiunčiamas *JSON* kredencialų failas į kompiuterį, kurį reikia įdėti į programą (8 pav.). Šio failo vietovę reikia nusakyti programos *.env* faile per *GOOGLE_CREDENTIALS_PATH* ir *SERVICE_ACCOUNT_FILE*.



8 pav. *Google Cloud* paslaugos paskyros raktas *JSON* pavidalu
Šaltinis: sudaryta autorių

Google Analytics (*Analytics*) – tai nemokamas *Google* įrankis, kuris stebi ir analizuoja svetainės ar programėlės lankytojus. Jis rodo, kas lankosi, ką jie daro, iš kur ateina ir kiek laiko būna. *Analytics Admin* yra *Analytics* nustatymų skiltis, kurioje valdoma paskyra, nuosavybės, vartotojai ir leidimai.

***Analytics* naudojimas.** Su *Analytics Admin API*, programa gauna paskyrų ir nuosavybių duomenis: paskyrų vardus ir *ID*, nuosavybių pavadinimus, pramonių kategorijas, laiko juostas, valiutas ir aptarnavimo lygius. Šių duomenų gavimui yra naudojamas valdiklio funkcija, su kodu:

```
$client = new Client();
$client->setAuthConfig(storage_path('credentials/google_credentials.json'));
$client->addScope('https://www.googleapis.com/auth/analytics.readonly');
$adminService = new GoogleAnalyticsAdmin($client);
```

Ši kodo dalis autentifikuojama sistemoje *Google*, naudodama *JSON* kredencialų failą, o tada inicijuoja *Analytics Admin API* paslaugą, kad būtų galima nuskaityti Analytics duomenis arba nustatymus.

Google PageSpeed (*PageSpeed*) – tai Google įrankių rinkinys, skirtas analizuoti svetainės greitį ir našumą. *PageSpeed Insights* gali matuoti, kiek greitai kraunasi puslapis, vertinti mobiliesiems ir kompiuteriams iš 100 balų, pateikti patarimus ir pasiūlyti optimizacijas.

***PageSpeed* naudojimas.** Programoje, administratoriaus prašymu galima siusti nuosavybių *URL* į *PageSpeed API*, o tai grąžina našumo balą (nuo 0 iki 100) ir pagrindinius žiniatinklio elementų matavimus. *PageSpeed* programos veikimas yra patikrinamas per valdiklio kodą:

```
$request->validate(['url' => 'required|url', 'property_id' => 'required']);
$url = $request->url;
$response = Http::get("https://www.googleapis.com/pagespeedonline/v5/runPagespeed", [
    'url' => $url, 'strategy' => 'mobile', 'key' => env('PAGESPEED_API_KEY')
]);
```

Ši kodo dalis patvirtina gaunamos užklausos duomenis, įrašo patikrintą *URL*, išsiunčia *GET* užklausą į *PageSpeed API*, kad būtų analizuojamas pateiktas puslapis mobiliajame režime, ir išsaugo gautą atsakymą. Jei tikrinimas nepraeina, *Laravel* automatiškai grąžins klaidą.

Apibendrinant, duomenys yra gaunami iš šių *Google* paslaugų: *Google Cloud*, kurioje yra kuriamos paslaugų paskyros ir generuojami raktai kitų paslaugų *API* įgalinimui, *Analytics*, kurioje yra gaunami duomenys apie paskyras, nuosavybes ir jų atributai, ir *PageSpeed*, kurioje yra gaunami duomenys apie svetainių greitį ir našumą.

Duomenų optimizacijų programavimas

Duomenų optimizavimo programavimas yra esminė programos dalis, skirta ne tik duomenims atvaizduoti, bet ir efektyviai juos analizuoti, filtruoti, pažymėti bei interpretuoti. Optimizavimo funkcijos leidžia vartotojams valdyti didelį kiekį informacijos, atrinkti tik aktualius duomenis ir priimti pagrįstus sprendimus remiantis sistemingai pateikta informacija. Šiame poskyryje apžvelgiamos visos su duomenų optimizavimu susijusios funkcijos, jų veikimo principai ir programinis įgyvendinimas.

Programos duomenų optimizavimo funkcijos:

Paieška pagal nuosavybės pavadinimą.

Filtravimas pagal žymą ir būseną.

Duomenų eksportavimas į *PDF* failą.

Duomenų eksportavimas į *CSV* failą.

Duomenų sinchronizavimas.

Metaduomenų redagavimas.

PageSpeed analizė.

Paieška pagal nuosavybės pavadinimą. Paieškos funkcija leidžia vartotojui greitai surasti specifines *Analytics* nuosavybes, įvedus pavadinimo fragmentą arba pilną pavadinimą. Tai ypač naudinga, kai duomenų kiekis didelis, o vartotojas nori greitai pasiekti aktualią informaciją. Paieška atliekama pagal lauką display_name, kuris saugo kiekvienos savybės pavadinimą. Paieškos kodo dalis:

```
if ($search) {
    $query->where('display_name', 'like', '%' . $search . '%');
}
```

Ši kodo dalis tikrina, ar paieškos užklausa yra pateikta. Jei taip, *Laravel* užklausa papildoma *where* sąlyga filtruoja duomenis pagal savybės pavadinimą. Naudojama *SQL LIKE* funkcija su *%* simboliais prieš ir po paieškos reikšmės leidžia atlikti dalinę atitiktį, t. y. bus grąžinamos visos savybės, kurių pavadinime yra nurodytas fragmentas.

Filtravimas pagal žymą ir būseną. Žymų filtravimo funkcija suteikia galimybę vartotojui susiaurinti rodomus rezultatus pagal pasirinktą žymą (angl. *tag*). Kiekvienai Analytics nuosavybei gali būti priskirta žyma, kurią administratoriaus vaidmenį turintys vartotojai gali nurodyti metaduomenų laukelyje. Tokia funkcija leidžia suskirstyti savybes į kategorijas ar projektus bei lengviau jas valdyti. Būsenos (angl. *status*) filtravimas leidžia vartotojams atvaizduoti tik tas nuosavybes, kurios atitinka konkretų optimizacijos etapą. Šis filtras padeda susikoncentruoti į prioritetines nuosavybes arba stebėti pažangą. Žymų ir būsenos filtravimo kodo dalis:

```
if ($status || $tag) {
    $query->whereHas('meta', function ($metaQuery) use ($status, $tag) {
        if ($status) {
            $metaQuery->where('status', $status);
        }
        if ($tag) {
            $metaQuery->where('tag', $tag);
        }
    });
}
```

Šis kodas apdoroja filtravimą pagal nuosavybės metaduomenis. Metodas *whereHas('meta', ...)* užtikrina, kad būtų tikrinamos tik tos nuosavybės, kurios turi susijusį įrašą metaduomenų lentelėje (*property_metadata*), o *metaQuery* apibrėžia, kokios sąlygos taikomos – jeigu yra pateikta būsena, atliekamas *where('status', ...)*, o jei nurodyta žyma, taikomas *where('tag', ...)*. Abu filtrai gali būti naudojami atskirai arba kartu – tokiu būdu galima detaliai išfiltruoti tik norimus duomenis.

Duomenų eksportavimas į PDF failą. Duomenų eksportavimas į *PDF* formatą leidžia vartotojams išsaugoti, peržiūrėti ar pasidalyti aktualia *Analytics* informacija neprisijungus prie programos. Eksportuojami tik tie duomenys, kurie atitinka vartotojo pasirinktus filtrus. *PDF* eksportavimo funkcijos kodas:

```
public function exportPDF(Request $request) {
$properties = $this->getFilteredProperties($request);
$pdf = Pdf::loadView('exports.analytics_pdf', compact('properties'));
return $pdf->download('analytics_export.pdf');
}
```

Ši funkcija vykdo *PDF* failo kūrimo ir atsisiuntimo procesą. Pirmiausia gaunami filtravimo rezultatai naudojant *getFilteredProperties($request)* – tai grąžina tik tuos duomenis, kurie atitinka vartotojo pasirinktus filtrus. Tada naudojama *Pdf::loadView(...)* iš *Laravel DomPDF* bibliotekos, kuri paima *Blade* šabloną ir paverčia jį *PDF* dokumentu, perduodant jam nuosavybių duomenis. Galiausiai *download(...)* metodas nurodo, kad sugeneruotas failas turi būti automatiškai atsiųstas vartotojui pavadinimu „*analytics_export.pdf*“.

Duomenų eksportavimas į CSV failą. CSV formatas leidžia lengvai eksportuoti struktūrizuotus duomenis į lentelinį vaizdą, kuris gali būti atidarytas įvairiomis programomis, tokiomis kaip *Microsoft Excel*, *Google Sheets* ar duomenų analizės įrankiais. Programoje vartotojas gali išfiltruoti norimus *Google Analytics* duomenis ir juos eksportuoti kaip *CSV* failą vienu mygtuko paspaudimu. Tai naudinga, kai norima atlikti papildomą analizę arba išsaugoti ataskaitos kopiją. *CSV* failo kūrimo kodo dalis:

```
$callback = function () use ($properties) {
$handle = fopen('php://output', 'w');
fputcsv($handle, ['Property Name', 'Time Zone', 'Currency', 'Industry', 'Tag',
'Status', 'Note', 'URL', 'PageSpeed Score', 'LCP', 'FID', 'CLS']);

foreach ($properties as $prop) {
        fputcsv($handle, [$prop['name'], $prop['timeZone'], $prop['currency'],
$prop['industry'], $prop['tag'], $prop['status'], $prop['note'],]);
}
fclose($handle);
};
```

Šis kodas naudoja php://output, kuris veikia kaip tiesioginis srautas į vartotojo naršyklę, *fopen()* atveria šį srautą, o *fputcsv()* funkcija naudoja jį rašyti *CSV* formato eilutes. Pirmoji eilutė apibrėžia antraštes (stulpelių pavadinimus), o vėlesnės *foreach* cikle apdorojamos eilutės yra faktiniai duomenys. Tokiu būdu sukuriamas *CSV* dokumentas, kuris nedelsiant perduodamas vartotojui per *HTTP* atsaką.

Duomenų sinchronizavimas. Duomenų sinchronizavimo funkcija užtikrina, kad programa galėtų atnaujinti Analytics paskyrų ir nuosavybių informaciją tiesiogiai iš *Google API*, kai to reikia. Kad nebūtų nereikalingai siunčiamos užklausos kiekvieną kartą atidarant puslapį, programa naudoja talpyklą (angl. *cache*) – tai reiškia, kad duomenys paimami iš vietinės duomenų bazės, jeigu nėra nurodyta kitaip. Vartotojas turi galimybę inicijuoti duomenų atnaujinimą rankiniu būdu naudodamas *Refresh* mygtuką. Ši funkcija leidžia išlaikyti programos efektyvumą ir kartu užtikrinti duomenų aktualumą. Duomenų naudojimas iš talpyklos arba *API* kodo dalis:

```
$useCache = !$request->has('refresh');
if ($useCache && GoogleAccount::count() > 0) {
    // Naudojama duomenų bazėje esanti informacija
    ...
} else {
    $apiAccounts = $this->fetchAccountsFromAPI();
    $this->storeAccountsAndProperties($apiAccounts);
    // Naudojama naujai gauta informacija
    ...
}
```

Šis kodo dalis nusprendžia, ar naudoti esamus duomenis iš duomenų bazės, ar sinchronizuoti juos iš *Google API*. Jei užklausoje *refresh* parametro nėra ir duomenų bazėje jau yra paskyrų, programa naudoja vietinę informaciją. Priešingu atveju, jei vartotojas spustelėjo atnaujinimo mygtuką arba duomenų bazėje nėra Analytics paskyrų, duomenys paimami iš Google per *fetchAccountsFromAPI()* funkciją ir saugomi per *storeAccountsAndProperties()* funkciją. Toks sprendimas leidžia efektyviai valdyti resursus ir išvengti bereikalingų *API* kvietimų.

Metaduomenų redagavimas. Metaduomenų redagavimo funkcija leidžia administratoriams priskirti papildomą informaciją kiekvienai *Analytics* nuosavybei, įskaitant žymas, būsenas ir pastabas. Šie metaduomenys suteikia galimybę pažymėti, suskirstyti ar dokumentuoti konkrečias savybes, kas palengvina jų analizę ir optimizavimą. Be to, kiekvienam redagavimui yra priskiriamas vartotojo *ID*, taip užtikrinant, kad galima būtų atsekti, kuris administratorius atliko pakeitimus. Metaduomenų išsaugojimo kodas:

```
$updated = PropertyMetadata::updateOrCreate(
    ['google_property_id' => $property->id],
    [
        'tag' => $request->tag,
        'status' => $request->status,
        'note' => $request->note,
        'user_id' => Auth::id(),
    ]
);
```

Ši kodo dalis atnaujina arba sukuria naują metaduomenų įrašą duomenų bazėje, naudodamas *updateOrCreate()* metodą. Pirmas argumentas – paieškos kriterijus: čia tikrinama, ar jau egzistuoja įrašas su tokiu pačiu *google_property_id*. Antras argumentas – reikšmės, kurias reikia įrašyti ar atnaujinti: žyma, būsena, pastaba bei vartotojo *ID*, kuris paimamas su *Auth::id()*. Tai užtikrina, kad kiekviena nuosavybė turės tik vieną susijusį metaduomenų įrašą, o atnaujinimai nepakeis kitų nuosavybių duomenų.

PageSpeed analizė. PageSpeed analizės funkcija leidžia administratoriams įvertinti, kaip greitai įkeliamas tam tikros svetainės puslapis, susijęs su Analytics nuosavybe. Tai suteikia galimybę identifikuoti našumo problemas, tokias kaip lėtas įkėlimas, vizualinis nestabilumas ar interaktyvumo vėlavimas. Naudojant *PageSpeed Insights API*, programa gauna tokius pagrindinius našumo rodiklius kaip įkėlimo greitį (angl. *Largest Contentful Paint*, *LCP*), interaktyvumą (angl. *First Input Delay*, *FID*) ir vizualinį stabilumą (angl. *Cumulative Layout Shift*, *CLS*). Tokia analizė padeda optimizuoti ne tik duomenų matavimą, bet ir realų vartotojų patyrimą.

Užklausa į *PageSpeed API* kodas:

```
$url = $request->url;
$response = Http::get("https://www.googleapis.com/pagespeedonline/v5/runPagespeed", [
    'url' => $url,
    'strategy' => 'mobile',
    'key' => env('PAGESPEED_API_KEY')
]);
```

Ši kodo dalis vykdo *HTTP GET* užklausą į *PageSpeed Insights API*. Naudojamas vartotojo įvestas *URL*, kuris yra analizuojamas mobiliuoju režimu. *API* raktas paimamas iš *.env* failo, naudojant, kas leidžia saugiai laikyti slapčiausią informaciją. Rezultatas išsaugomas į *$response*, kuriame yra visa reikalinga *JSON* struktūra su puslapio našumo duomenimis.

Našumo rezultatų išgavimo kodas:

```
$data = $response->json();
$score = $data['lighthouseResult']['categories']['performance']['score'] * 100;
$metrics = [
    'LCP'         =>         $data['lighthouseResult']['audits']['largest-contentful-
paint']['displayValue'] ?? null,
    'FID' => $data['lighthouseResult']['audits']['max-potential-fid']['displayValue']
?? null,
    'CLS'          =>          $data['lighthouseResult']['audits']['cumulative-layout-
shift']['displayValue'] ?? null,
];
```

Čia *JSON* atsakymas yra dekoduojamas su *$response->json()* į *PHP* masyvą. Bendra puslapio našumo įvertinimo reikšmė ištraukiama ir padauginama iš 100, kad būtų gautas procentas. Trys pagrindiniai našumo rodikliai – *LCP*, *FID* ir *CLS* – išgaunami iš atitinkamų analizės ir peržiūros laukų. Kiekvienam jų naudojama *?? null*, kad būtų užtikrintas saugus grąžinimas net jei reikšmės trūksta. Šie rodikliai vėliau saugomi duomenų bazėje kartu su *URL*.

Apibendrinant, šioje dalyje apžvelgtos pagrindinės programos funkcijos, skirtos pagerinti *Analytics* duomenų valdymą ir analizę. Kiekviena optimizavimo funkcija buvo įgyvendinta tikslingai, užtikrinant techninį tikslumą ir vartotojo patogumą.

Duomenų bazės kūrimas

Duomenų bazės realizavimas yra vienas svarbiausių programos komponentų, užtikrinantis efektyvų duomenų saugojimą, tvarkymą ir pasiekiamumą. Šiame poskyryje aprašoma, kaip buvo sukurtos lentelės naudojant *Laravel* migracijas, kokie duomenys jose saugomi, per kur jos galima valdyti it kaip jos tarpusavyje susijusios.

Dėl *Laravel* karkaso, programa naudoja *MySQL* duomenų bazę. *MySQL* yra atvirojo kodo reliacinė duomenų bazių valdymo sistema, kuri naudoja *SQL* kalbą duomenų bazių kūrimui ir valdymui.

Kadangi *MySQL* yra atvirojo kodo, joje yra daugybė funkcijų, sukurtų glaudžiai bendradarbiaujant su naudotojų bendruomene per beveik 30 metų. Dvi ypač svarbios savybės, kuriomis pasikliauja kūrėjai, yra *ACID* sandorių palaikymas ir sistemos mastelio keitimas (angl. *scalability*). *ACID* reiškia atomiškumą, nuoseklumą, izoliaciją ir patvarumą – keturias savybes, kurios užtikrina, kad duomenų bazės sandoriai būtų vykdomi patikimai ir tiksliai. *ACID* sandorių dėka *MySQL* garantuoja, kad visi duomenų pakeitimai būtų įgyvendinti nuosekliai ir patikimai – net sistemos gedimo atveju. *MySQL* taip pat gali būti plečiama, kad palaikytų labai dideles duomenų bazes ir apdorotų didelį kiekį vienalaikių prisijungimų.

Lentelių kūrimas (migracijos)

Laravel migracijos naudojamos *MySQL* duomenų bazės lentelėms kurti ir tvarkyti. Kiekviena lentelė turi savo migracijos failą, kuriame aprašoma jos struktūra. Viena iš šių migracijų sukuria vartotojų lentelę:

```
return new class extends Migration {
public function up() {
    Schema::create('users', function (Blueprint $table) {
        $table->id();
        $table->string('name');
        $table->string('email')->unique();
        $table->string('role')->default('viewer');
        $table->string('password');
        $table->timestamps();
    });
}
public function down(): void {
    Schema::dropIfExists('users');
}
};
```

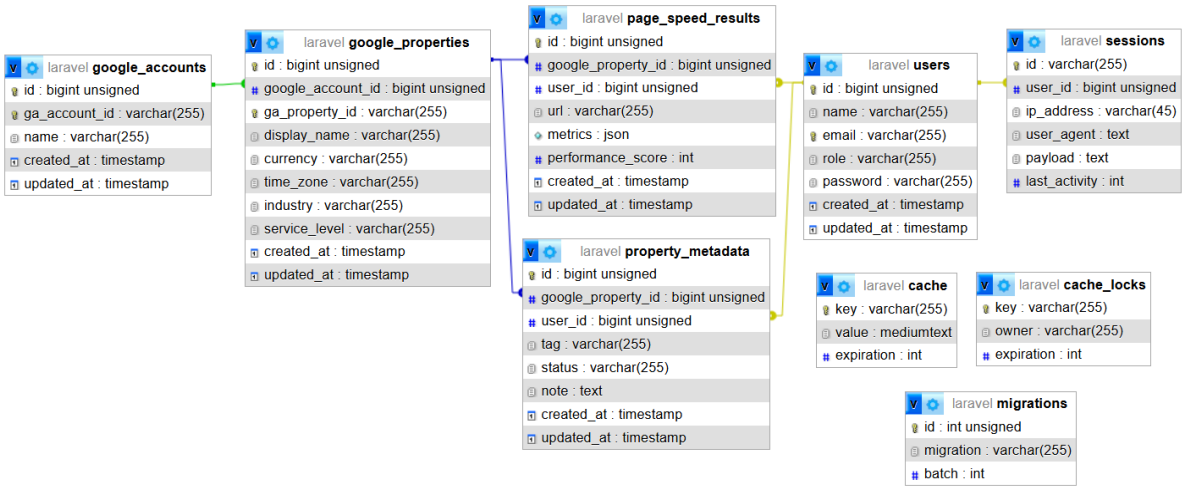
Ši vartotojų lentelės migracija sukuria vartotojų lentelę, prideda prie lentelės stulpelius: identifikatorius, vardas, elektroninis paštas, vaidmuo, slaptažodis ir laiko žymos, ir užtikrina, kad el. paštas yra unikalus, nustato numatytą vartotojo vaidmenį kaip žiūrovas – įprastas vartotojas, ir pateikia būdą ištrinti lentelę.

Duomenų bazės tvarkymas

MySQL duomenų bazės tvarkymui yra naudojamas *phpMyAdmin*.

Iš visų lentelių, vartotojų lentelė, *Google Analytics* paskyrų lentelė, *Google Analytics* nuosavybių lentelė, *PageSpeed* rezultatų lentelė ir nuosavybių metaduomenų lentelė yra esminiai, o visos kitos lentelės yra *Laravel* valdomos.

Lentelių struktūrą ir jų santykius taip pat galima matyti per *phpMyAdmin* (9 pav.).

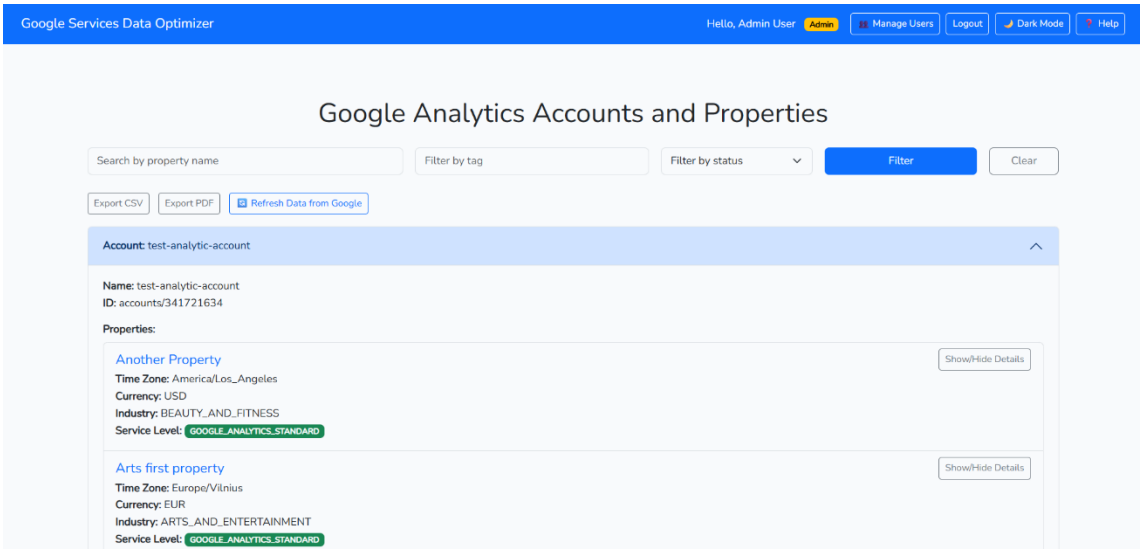


9 pav. Duomenų bazės lentelės ir jų santykiai per *phpMyAdmin*
Šaltinis: sudaryta autorių

Apibendrinant, programa naudoja *MySQL* duomenų bazę, o joje yra sukuriamos visos esminės lentelės, kartu ir *Laravel* valdomos lentelės, per migracijų klases ir funkcijas, kurios yra tvarkomos per *phpMyAdmin*.

Grafinė vartotojo sąsaja. Google paslaugų duomenų optimizavimo programos *GUI* kūrimui buvo naudotas *Laravel* įrankis *Blade*, kuris leidžia generuoti dinaminius *HTML* vaizdus ir padeda atskirti šabloną nuo turinio.

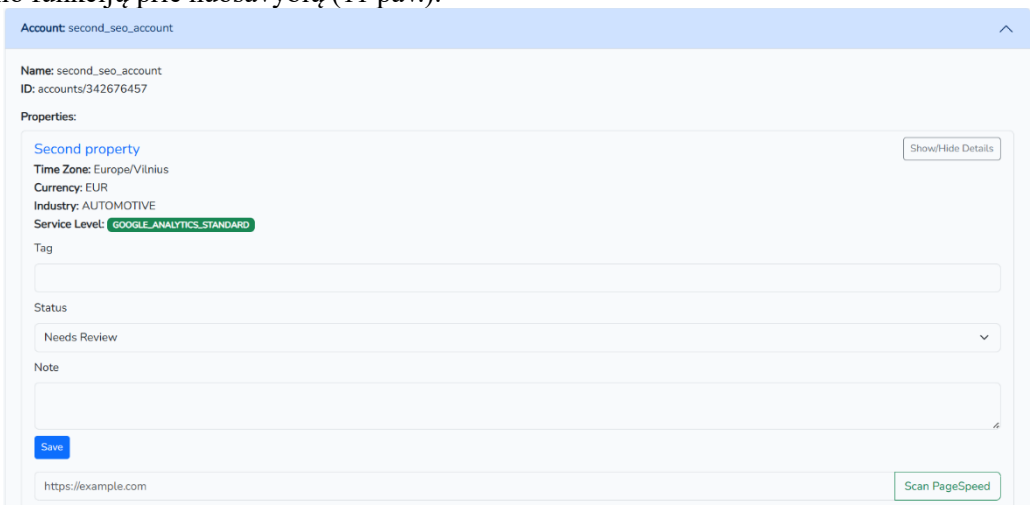
Prieš pasiekiant pagrindinį programos puslapį, vartotojas turi prisijungti prie programos arba užsiregistruoti. Registracijos forma leidžia sukurti naują paskyrą nurodant vardą, el. pašto adresą ir slaptažodį. Prisijungus, vartotojas yra nukreipiamas į pagrindinį puslapį, kur jam pateikiama informacija apie Analytics paskyras ir nuosavybes. Be autentifikacijos, vartotojas neturi galimybės pasiekti jokios informacijos ar funkcionalumo, užtikrinant programos saugumą. Po prisijungimo ar registracijos, programa nuveda vartotoją tiesiai į pagrindinį programos puslapį (10 pav.).



10 pav. Pagrindinis programos puslapis
Šaltinis: sudaryta autorių

Pagrindiniame puslapyje yra atvaizduojami visi *Analytics* paskyrų duomenys ir jų nuosavybės. Sąsajoje yra įdiegtos paieškos ir filtravimo priemonės pagal žymą ir statusą, taip pat galimybė eksportuoti duomenis į *CSV* arba *PDF* formatus. Kiekvienai paskyrai yra sukurtas atskiras blokas su savybėmis, kurios gali būti išskleidžiamos arba paslepiamos. Kiekviena nuosavybė turi metaduomenis ir *PageSpeed* analizės, jei jos yra išsaugotos duomenų bazėje.

Jei vartotojo paskyra turi administratoriaus vaidmenį, tai pagrindiniame puslapyje jis mato keletą redagavimo funkcijų prie nuosavybių (11 pav.).

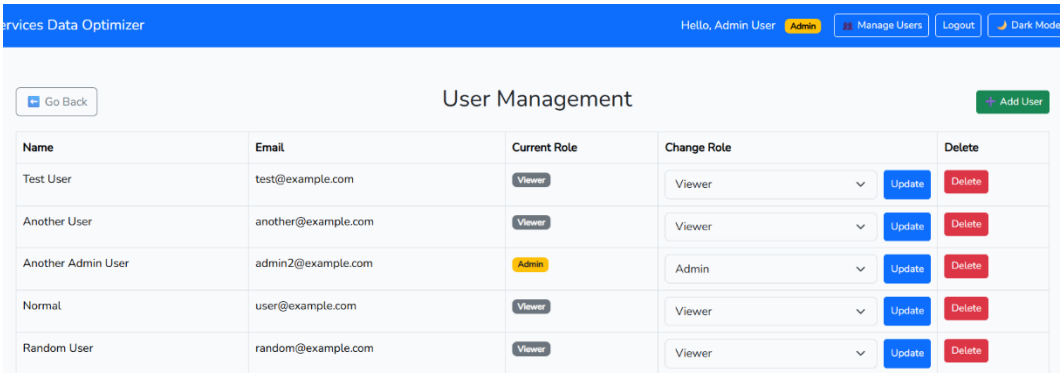


11 pav. Administratoriaus nuosavybių redagavimas
Šaltinis: sudaryta autorių

Administratoriai pagrindiniame puslapyje gali matyti papildomas funkcijas prie kiekvienos nuosavybės. Administratorius gali įvesti žymą, pasirinkti optimizacijos būseną ir pridėti pastabų laisvo formato teksto pavidalu. Be to, jis gali inicijuoti *Google PageSpeed* analizę įvesdamas nuosavybės arba kitos

svetainės *URL*. Analizės rezultatai (našumo įvertinimas, *LCP*, *FID* ir *CLS*) yra rodomi toje pačioje nuosavybės kortelėje ir išsaugomi vėlesnei peržiūrai ar eksportavimui.

Administratorius taip pat turi galimybę pasiekti visų programos vartotojų sąrašą (12 pav.) per atskirą meniu punktą.



12 pav. Vartotojų paskyrų sąrašas
Šaltinis: sudaryta autorių

Šiame sąraše pateikiama kiekvieno vartotojo informacija: vardas, el. paštas ir vaidmuo. Administratorius gali keisti vartotojo vaidmenį tarp žiūrovo (įprasto vartotojo) ir administratoriaus. Tai leidžia valdyti prieigos teises ir užtikrinti, kad tik patikimi vartotojai turėtų administravimo galimybes. Taip pat administratorius gali ištrinti egzistuojančias vartotojų paskyras arba sukurti ir išsaugoti naujas paskyras.

Apibendrinant, realizacijos eiga parodė, kaip sistemingai, žingsnis po žingsnio, buvo įgyvendinta idėja: nuo technologinių sprendimų iki pilnai veikiančios, vartotojui draugiškos optimizavimo platformos.

Google paslaugų duomenų optimizavimo programos testavimas

Šioje dalyje aprašytas sukurtos programos testavimas. Tai apima rankinį programos funkcijų testavimą, *API* testavimą per *Postman* ir programos įvertinimą.

Rankinis testavimas. Aprašomas rankinis programos testavimas, kurio tikslas – patikrinti, ar programos funkcijos veikia tinkamai, ar sąsaja yra patogi vartotojui ir ar nėra esminių klaidų. Testavimas atliekamas be automatinių įrankių – imituojant realaus vartotojo veiksmus ir stebint programos reakcijas. Tokiu būdu galima nustatyti galimas problemas dar prieš pateikiant programą vertinimui ar naudojimui.

Rankiniai programos testavimo atvejai, tikėtini rezultatai ir būsenos yra pateikti apačioje (2 lentelė).

2 lentelė

Rankinio testavimo atvejai

Testavimo atvejis	**Tikėtinas rezultatas**	**Būsena**
Prisijungimo ir registracijos veikimas	Sėkmingas prisijungimas prie egzistuojančios paskyros su teisingais duomenimis ir paskyros registracija.	Veikia
Duomenų gavimas iš Google Analytics API	Sėkmingai yra gaunami paskyrų ir jų nuosavybių duomenys iš Google Analytics API.	Veikia
Duomenų atvaizdavimas pagrindiniame puslapyje	Duomenys yra atvaizduojami pagrindiniame puslapyje: Analytics paskyros ir jų nuosavybės su metaduomenimis ir PageSpeed rezultatais (jei yra).	Veikia
Metaduomenų redagavimas ir PageSpeed analizė	Administratoriai gali sėkmingai pridėti metaduomenis prie nuosavybių ir sėkmingai daryti įvestos svetainės PageSpeed analizę.	Veikia
Paieškos ir filtravimo funkcijos	Programa sėkmingai atvaizduoja duomenis pagal paiešką ir filtrus.	Veikia
Duomenų eksportavimas į CSV ir PDF	Sėkmingai yra eksportuojami CSV ir PDF failai su filtruotais duomenimis.	Veikia
Vartotojų valdymas	Administratoriai gali valdyti paskyras vartotojų paskyras: keisti vartotojų vaidmenis, ištrinti paskyras arba pridėti naujas paskyras.	Veikia
Duomenų atnaujinimo mygtukas	Sėkmingai veikia duomenų atnaujinimo mygtukas, kuris tiesiogiai gauna duomenis iš Google API ir neišvalo neatnaujintus duomenis.	Veikia

Šaltinis: sudaryta autorių

Apibendrinant, rankinis testavimas užtikrino, kad programos funkcionalumas yra stabilus ir veikia pagal numatytą elgseną. Vartotojų sąveika, duomenų atvaizdavimas, eksportavimas ir administratoriaus valdymo ir kitos funkcijos buvo išbandytos ir įvertintos. Šis procesas leido anksti pastebėti ir ištaisyti galimas problemas, todėl programa tapo patikimesnė ir paruošta vartotojams.

API testavimas. Aprašomas programos *API* sluoksnio testavimas – tai sistema, atsakinga už duomenų perdavimą tarp vartotojo sąsajos ir programos logikos, taip pat tarp programos ir išorinių paslaugų, tokių kaip *Google API*. *API* testavimas leidžia įsitikinti, kad maršrutai (angl. *routes*), duomenų apdorojimas ir saugumo mechanizmai (pvz., autentifikacija ir autorizacija) veikia taip, kaip tikėtasi.

Postman – programinė įranga, leidžianti programuotojams testuoti, dokumentuoti ir bendrinti *API* (programų programavimo sąsajas). Ji plačiai naudojama siekiant supaprastinti *API* testavimo procesą – pateikiant patogią naudotojo sąsają užklausų siuntimui, atsakymų peržiūrai ir klaidų paieškai.

Postman leidžia kūrėjams siųsti *HTTP* užklausas į savo sistemos ar programos maršrutus ir matyti atsakymus. Jis palaiko įvairius *HTTP* metodus, tokius kaip *GET*, *POST*, *PUT*, *DELETE*. *Postman* ypač naudingas testuojant *Laravel* projektus, nes leidžia greitai ir patogiai patikrinti *API* veikimą.

Naudojus *Postman* įrankį, buvo atliktas programos *API* testavimas. Testavimo atvejus, metodus, maršrutus, tikėtinus rezultatus, rezultatus ir būseną galima matyti apačioje (3 lentelė).

3 lentelė

***API* testavimai ir jų rezultatai**

Testavimo atvejis	Metodas	Maršrutas	Tikėtinas rezultatas	Rezultatas	Būsena
Eksportas į CSV	GET	/export/csv	Grąžina CSV failą.	CSV atsiųstas	Praėjo
Eksportas į PDF	GET	/export/pdf	Grąžina PDF failą.	PDF atsiųstas	Praėjo
Prisijungimas	GET	/login	Grąžina prisijungimo puslapį.	Prisijungimo langas	Praėjo
Registracija	GET	/register	Grąžina registracijos puslapį.	Registracijos langas	Praėjo
Google Analytics paskyrų duomenys	GET	/service-accounts	Grąžina Analytics paskyras JSON pavidalu.	JSON su duomenimis	Praėjo
Analytics paskyros nuosavybių duomenis	GET	/service-accounts/{accountId}	Grąžina Analytics paskyros nuosavybes JSON pavidalu.	JSON su paskyros duomenimis	Praėjo

Šaltinis: sudaryta autorių

Apibendrinant, *API* testavimas patvirtino, kad visi *GET* maršrutai – registracija, prisijungimas, duomenų gavimas ir failų eksportas – veikia teisingai. Naudojant *Postman* įrankį, buvo galima imituoti realius užklausų scenarijus be vartotojo sąsajos, todėl buvo lengviau nustatyti ir ištaisyti galimas klaidas. Visi maršrutai veikė teisingai tiek su prisijungusiu vartotojų, tiek esant ribojimams, kas padeda užtikrinti programos patikimumą ir saugumą.

Programos įvertinimas

Pateikiamas programos įvertinimas tiek lyginamuoju, tiek funkciniu požiūriu. Tikslas – nustatyti, kaip gerai programa atlieka numatytą funkciją lyginant su kitais įrankiais, bei įvertinti, ar ji atitinka iškeltus funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus. Įvertinimas atliekamas naudojant palyginimo lentelę su egzistuojančiomis alternatyvomis bei reikalavimų tikrinimo sąrašą.

Programos palyginimą su egzistuojančiomis alternatyvomis pagal funkcijas galima matyti apačioje (4 lentelė).

4 lentelė

Programos ir alternatyvų palyginimas

Funkcija / Programa	Google paslaugų duomenų optimizavimo programa	Looker Studio	SEMrush	Supermetrics
Google Analytics integracija	Pilna GA4 integracija	Taip	Taip	Taip
Google PageSpeed integracija	Integruota	Ne	Ne	Ne
Metaduomenų pridėjimas	Galima pridėti administratoriui	Ne	Ne	Ne
Eksportas į PDF / CSV	Integruotas	Taip	Taip	Taip
Duomenų filtravimas ir paieška	Pagal žymą, būseną ir raktinį žodį	Ribotas	Išplėstinis	Ribotas
Vartotojų vaidmenų valdymas	Administratorius ir žiūrėtojas	Ne	Ribotas	Ne
Nemokamas naudojimas	Taip	Nemokama versija	Mokamas	Mokamas
Veikia Docker aplinkoje	Taip	Tik debesyje	Tik debesyje	Tik debesyje

Šaltinis: sudaryta autorių

Google paslaugų duomenų optimizavimo programa nėra skirta konkuruoti su įmonės lygio platformomis, tokiomis kaip „*Looker Studio*“ ir „*SEMrush*“, tačiau ji siūlo aiškių pranašumų, tokių kaip greitas ir privatus diegimas naudojant *Docker*, kelių paslaugų integracija su *Google API* ir aiškus vaidmenų

atskyrimas valdant vartotojus, todėl tai yra praktiška programa mažesnėms komandoms, akademiniam naudojimui ar vidinėms *SEO* operacijoms.

Programos funkcinių ir nefunkcinių reikalavimų įgyvendinimų rezultatus galima matyti apačioje (5 lentelė).

5 lentelė

Programos reikalavimų įgyvendinimai

Reikalavimas	Tipas	Būsena	Pastaba
Filtravimas	Funkcinis	Įgyvendinta	Vartotojai gali filtruoti nuosavybes pagal žymą ir būseną.
Ieškojimas	Funkcinis	Įgyvendinta	Vartotojai gali ieškoti nuosavybes pagal pavadinimo fragmentą.
Eksportavimas	Funkcinis	Įgyvendinta	Vartotojai gali eksportuoti duomenis CSV ir PDF failuose.
Duomenų atnaujinimas	Funkcinis	Įgyvendinta	Vartotojai gali atnaujinti duomenis tiesiai iš Google API paspaudus atnaujinimo mygtuką (neištrina neatnaujintus duomenis).
Metaduomenų pridėjimas	Funkcinis	Įgyvendinta	Administratoriai gali pridėti arba metaduomenis prie nuosavybių: žymą, būseną ir pastabą.
PageSpeed analizė	Funkcinis	Įgyvendinta	Administratoriai gali svetainės daryti PageSpeed analizę.
Valdyti vartotojus	Funkcinis	Įgyvendinta	Administratoriai gali ištrinti vartotojus, keisti jų vaidmenis ir pridėti naujas paskyras.
Laravel karkasas	Nefunkcinis	Įgyvendinta	Programa naudoja Laravel karkasą, jo funkcijas (DB valdymas, maršrutai ir t.t.) ir įrankius (Blade ir Vite).
Saugomi duomenys	Nefunkcinis	Įgyvendinta	Duomenys yra saugojami MySQL duomenų bazėje.
Integruota Analytics API	Nefunkcinis	Įgyvendinta	Yra integruota Google Analytics API naudojant Google Cloud Console paslaugos paskyros kredencialus.
Integruota PageSpeed API	Nefunkcinis	Įgyvendinta	Yra integruota Google PageSpeed Insights API naudojant Google Cloud Console paslaugos paskyros kredencialus.

Šaltinis: sudaryta autorių

Lentelėje yra matoma, kad kiekvienas funkcinis ir nefunkcinis reikalavimas yra įgyvendintas. Todėl, pagal funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus, programa yra įgyvendinta ir įvertinta 100%.

Apibendrinant, programos įvertinimas parodė, kad sukurta programa visiškai atitinka keliamus funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus. Ji pasižymi pranašumais prieš kitus įrankius, tokiais kaip *Google PageSpeed* integracija, administratoriaus vartotojų valdymas ir metaduomenų redagavimas. Nors tokie įrankiai kaip „*SEMrush*“ ar „*Supermetrics*“ yra pritaikyti rinkodaros analizei, ši programa yra skirta konkrečiai *Analytics* duomenų valdymui ir optimizavimui, suteikiant galimybę visiškai valdyti procesus vietiniu lygmeniu.

Išvados

Programos samprata atskleidė, kad vartotojams trūksta vieningos sistemos *Google Analytics* ir *PageSpeed* duomenų stebėjimui bei optimizavimui. Sudarytas dalykinės srities raiškusis paveikslėlis ir egzistuojančių alternatyvų analizė parodė poreikį integruoti anotacijas, *PageSpeed* duomenis ir naudotojų valdymą.

Programos projektavimas parodė, kad programai buvo pasirinkta trijų sluoksnių architektūra, leidžianti lengvai plėsti programos funkcionalumą ateityje. Nustatyti funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai užtikrina, kad programa atitiks vartotojų lūkesčius.

Programos realizacijos metu įgyvendinti visi pagrindiniai realizacijos etapai. Duomenų gavimas iš *Analytics* ir *PageSpeed API* buvo įgyvendintas per *Google Cloud* paslaugą, naudojant autentifikaciją per paslaugų paskyrą, o duomenų optimizavimas buvo įgyvendintas per paieškos, filtravimo, eksportavimo, metaduomenų pridėjimo ir *PageSpeed* rezultatų nuskaitymo funkcijas.

Atlikus rankinį programos testavimą, buvo patvirtinta, kad pagrindinės funkcijos, tokios kaip duomenų gavimas ir filtravimas, veikia teisingai ir atitinka vartotojo poreikius. *API* testavimas su *Postman* įrankiu parodė, kad visos užklausos į programą yra apdorojamos korektiškai, o duomenys grąžinami tinkamu formatu.

Programos įvertinimas lyginant su analizuotais įrankiais parodė, kad sukurta programa išsiskiria pritaikomumu, metaduomenų valdymu, *PageSpeed* integracija ir vartotojų vaidmenų administravimu. Taip pat pagal funkcinius ir nefunkcinius reikalavimus buvo įvertinta, kad programa atitinka visus reikalavimus.

Integruota sistema, apjungianti svetainės našumo (*PageSpeed*) ir vartotojų elgsenos (*Analytics*) duomenis, leidžia tiksliau identifikuoti veiksnius ir efektyviau optimizuoti svetainės veikimą nei atskirų įrankių naudojimas.

Šis straipsnis prisideda prie Klaipėdos valstybinėje kolegijoje vykdomo taikomojo mokslinio tyrimo „Dalykinės srities domeno turinio atnaujinimo valdymo informacinių sąveikų pagrindu modelis“ (MTEP

prioritetas (-ai): Informacinės ir ryšių technologijos; MTEP tematika (-os): Procesų ir sistemų modeliavimas, TMV-240).

Literatūra

1. Alaskar, T. H., 2025. *Integrated AI and Business Analytics for Sustaining Data-Driven and Technological Innovation:* The Mediating Role of Integration Capabilities and Digital Platform. Sustainability, 17(19), 8749. https://doi.org/10.3390/su17198749.
2. Khaled, A. A., Samer, A. A., Nurulizwa, R., ir Muhammad, I. Q., 2025. *Systematic review of factors influencing adoption of business intelligence systems.* Discover Sustainability, 6, 936. https://doi:10.1007/s43621-025-01876-5.
3. Abdelrahman, Mahmoud, M., Zhan, S., Chong, A., 2020. *A Three-Tier Architecture Visual-Programming Platform for Building-Lifecycle Data Management.* Society for Modeling & Simulation International, 445-452. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.26013.74724.
4. Egbert, S., Ulbricht, L., 2024. *Data Integration and Analysis Platforms as Digital Platforms:* a conceptual proposal. Information Technology & People, 1-22. https://doi.org/10.1080/1369118X.2024.2442394.
5. Gisby, A., Ross, C., Smythe, J., F. ir Anderson, K., 2023. *The 'Rich Pictures' Method: Its Use and Value, and the Implications for HRD Research and Practice.* Human Resource Development Review, 22(2), 204-228. https://doi.org/10.1177/15344843221148044.
6. Google Cloud, 2025. *Looker Studio* [interaktyvus], [žiūrėta 2026 m. sausio 8 d.]. Prieiga per internetą: https://cloud.google.com/looker-studio.
7. Google Workspace Marketplace, 2025. *Supermetrics* [interaktyvus], [žiūrėta 2026 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: https://workspace.google.com/marketplace/app/supermetrics/523876908005.
8. Gondal, M., Qureshi, N., Mukhtar, H. ir Ahmed, H., 2020. *An Engineering Approach to Integrate Non-Functional Requirements (NFR) to Achieve High Quality Software Process.* In Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems, 2, 377-384. https://doi.org/10.5220/0009568503770384.
9. Kithulwatta, W.M.C.J.T., Jayasena, K.P.N., Kumara, Banage T.G.S., ir Rathnayaka, R.M. Kapila Tharanga, 2022. *Integration With Docker Container Technologies for Distributed and Microservices Applications: A State-of-the-Art Review.* International Journal of Systems and Service-Oriented Engineering, 12(1), 1-22. http://doi.org/10.4018/IJSSOE.297136.
10. Kramer, N., 2024. *Visual Studio Code: Read this before you get started.* Daily. https://daily.dev/blog/visual-studio-code-read-this-before-you-get-started.
11. Kreimer, I., 2021. *User interface design: Definition, guidelines, and process.* Maze. https://maze.co/collections/ux-ui-design/ui-design/.
12. Morales-Arevalo, J. C., Rodríguez, C., 2025. *A Systematic Review of the Benefits and Challenges of Data Analytics in Organizational Decision Making.* International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 16(2). https://doi:10.14569/IJACSA.2025.0160221.
13. Reselman, B. 2021. *How to create dynamic diagrams in Unified Modeling Language.* Red Hat. https://www.redhat.com/en/blog/dynamic-UML-diagramming.
14. Rosenthal, K., Strecker, S. & Snoeck, M., 2022. *Modeling difficulties in creating conceptual data models.* Multimodal studies on individual modeling processes, 22, 1005–1030. https://doi.org/10.1007/s10270-022-01051-8.
15. Sasmoko, Indrianti, Y., Manalu, S., R., ir Danaristo, J., 2024. *Analyzing Database Optimization Strategies in Laravel for an Enhanced Learning Management.* Procedia Computer Science, 245, 799-804. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.306.
16. Semrush, 2026. *Semrush One* [interaktyvus], [žiūrėta 2026 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: https://www.semrush.com/.
17. Vysotska, I., Berko, A., Burov, Y., Uhryn, D., Hu, Z. & Dvorzhak, V., 2024. *Information Technology for the Data Integration in Intelligent Systems of Business Analytics.* International Journal of Information Engineering and Electronic Business, 16(4). https://doi.org/10.5815/ijieeb.2024.04.05.
18. Vranić, V., Lang, J., Nores, M., L., Arias, J., J., P., Solano, J., ir Laseca, G., 2023. *Use case modeling in a research setting of developing an innovative pilgrimage support system.* Universal Access in the Information Society, 23, 1543–1560. https://doi.org/10.1007/s10209-023-01047-1.

GOOGLE SERVICES DATA OPTIMIZATION PROGRAM

Summary

The concept of the program revealed that users lack a unified system for monitoring and optimizing Google Analytics and PageSpeed data. The rich picture and analysis of existing alternatives showed the need to integrate annotations, PageSpeed data, and user management. The analyzed literature will help understand the essential stages of program implementation. In the future, it is recommended to integrate more Google services. The program design showed that a three-tier architecture was chosen, allowing easy expansion of the program's functionality in the future.

Defined functional and non-functional requirements ensure that the program meets users' expectations. The created database models are based on clear relationships between entities. Dynamic user journey and algorithm diagrams illustrated the main internal program activities and their flow. During program implementation, all key development stages were completed. The technologies ensured a containerized environment and facilitated code structuring. Data retrieval from Analytics and PageSpeed APIs was implemented through the Google Cloud service using authentication via a service account. Data optimization was realized through search, filtering, exporting, metadata addition, and PageSpeed results parsing functions. Manual program testing confirmed that key features such as data retrieval and filtering work correctly and meet user needs. API testing with the Postman tool showed that all requests to the program are processed properly and data is returned in the correct format. The program evaluation compared to analysed tools showed that the developed program stands out for its adaptability, metadata management, PageSpeed integration, and user role administration. Furthermore, based on functional and non-functional requirements, the program was assessed to meet all the specified criteria.

Key words: Google, Google services, Google Analytics, Google PageSpeed, data optimization, program interface.

ISSN 2029-9303
ISSN 2783-6215

INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS TECHNOLOGIJOS

2026 Nr. 1

Lietuvių kalbos redaktorė **Sonata Paulauskienė**
Užsienio kalbos redaktorė **Judita Štreimikienė**

Tiražas 70 egz. 190 psl. Parengimo spaudai data 2026-06-30

Išleido: Lietuvos inžinerijos kolegija, Tvirtovės al. 35, LT-50155 Kaunas
www.lik.tech
el.p. redaktorius@lik.tech