VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Ilona Kulešo

ORLAIVIŲ SKRYDŽIŲ PLANAVIMO TAIKANT I4D TYRIMAS
RESEARCH OF AIRCRAFT FLIGHT PLANNING USING I4D

Baigiamasis magistro darbas

Skrydžių valdymo studijų programa, valstybinis kodas 601H41002
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos technologijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Vientisosios studijų **Skrydžių valdymo** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Orlaivių skrydžių planavimo taikant i4D tyrimas**
Autorius	**Ilona Kulešo**
Vadovas	**Darius Rudinskas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šiame baigiamajame magistro darbe yra nagrinėjamas orlaivių skrydžių planavimas. Daugiausia dėmesio skiriama skrydžio planų pasikeitimams bei veiksniams, kurie tam turi įtakos. Pagrindinės darbo kryptys: išanalizuoti vykdomus oro erdvės optimizavimo projektus bei I4D trajektorijos koncepcijos privalumus ir sudaryti sistemos kompiuterinį modelį, įvertinant meteorologines sąlygas ir kitas kliūtis, bei parinkti orlaivių atvykimo laiką. Išanalizavus modelio rezultatus padarytos išvados, kad orlaivių suvaržymas laike leidžia jiems sklandžiai nutūpti priartėjus prie oro uosto nesudarant papildomų orlaivių užlaikymų ore.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, I4D oro erdvės literatūros apžvalga, oro eismo srauto paskirstymo metodika, oro eismo srauto paskirstymo analizė ir rezultatai, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 48 p. teksto be priedų, 1 priedas, 8 iliustr., 18 lent., 38 literatūros šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: I4D trajektorija, I4D oro erdvė, skrydžių planavimas, genetinis algoritmas

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis' Aviation Institute
Department of Aviation Technologies

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Integrated Studies **Air Traffic Control** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Research of Aircraft Flight Planning Using i4D**
Author	**Ilona Kulešo**
Academic supervisor	**Darius Rudinskas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

This master thesis analize aircraft flight planning. The focus is on changes in flight plans and the factors that influence it. The main directions of the work were to analyze the ongoing airspace optimization projects and the advantages of the I4D trajectory concept and to create a system computer model for meteorological conditions and other obstacles, and to select the arrival time for aircraft. After analyzing the results of the model, it was concluded that restraining aircraft in time allows aircraft to land smoothly when the airport arrives without additional aircraft delays in the air.

Structure: introduction, I4D airspace literature review, air traffic distribution methodology, air traffic distribution analysis and results, conclusions and recommendations, conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 48 p. text without appendixes, 1 appendix, 8 pictures, 18 tables, 38 bibliographical entries.

Keywords: I4D Trajectory, I4D Airspace, Flight Planning, Genetic algorithm

TURINYS

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS 8
LENTELIŲ SĄRAŠAS 9
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS 10
ĮVADAS 11
1. I4D ORO ERDVĖS LITERATŪROS APŽVALGA 13
1.1. SESAR, „NextGen“ ir kiti oro eismo optimizavimo projektai 13
1.2. Nuotoliniu būdu valdomų bepiločių orlaivių skrydžių valdymo sistemos apžvalga 17
1.3. I4D trajektorijos koncepcijos taikymas planuojant skrydžius 19
1.4. Pirmojo skyriaus išvados 24
2. ORO EISMO SRAUTO PASKIRSTYMO TYRIMO METODIKA 25
2.1. Trajektorijos ir orlaivio parametrų įvertinimas 26
2.1.1. Atstumo tarp dviejų taškų skaičiavimas 26
2.1.2. Laiko nustatymas 27
2.1.3. Vėjo įtaka trajektorijai 28
2.2. Trajektorijos optimizavimas taikant genetinius algoritmus 30
2.3 Laisvųjų maršrutų oro erdvė 33
2.4. Antrojo skyriaus išvados 35
3. ORO EISMO SRAUTO PASKIRSTYMO ANALIZĖ IR REZULTATAI 36
3.1 Maršrutų sudarymas, atvaizdavimas ir skrydžio parametrų surinkimas 36
3.2 Rezultatų palyginimai ir išvados 43
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS 45
LITERATŪROS SĄRAŠAS 46
PRIEDAI 49

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 **pav.** Oro eismo srautas pasaulyje 2016 metais 13
1.2 **pav.** Kurso, greičio ir aukščio valdymo ciklai a) – kurso valdymas; b) – aukščio valdymas; c) – greičio valdymo ciklas 23
2.1 **pav.** Orlaivių eiliškumo seka oro uoste 26
2.2 pav. Trys skirtingos vėjo kryptys orlaivio atžvilgiu 28
2.3 **pav.** Genetinio algoritmo schema, naudojama optimizuojant skrydžio trajektorijas 31
2.4 **pav.** Lietuvos maršrutinis žemėlapis – laisvųjų maršrutų oro erdvė 34
3.1. **pav.** Maršrutai iš Rygos, Varšuvos ir Minsko į Vilnių 38
3.2. **pav.** Maršrutai iš Varšuvos ir Minsko į Vilnių apskrendant audros debesis 39

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 **lentelė.** 4D trajektorijos parametrų apibrėžimas 25
2.2 **lentelė**. Konstantos ir funkcijos, naudojamos Haversino lygtyje 27
2.3 **lentelė**. Vėjo įtakos skaičiavimams naudojami dėmenys 29
2.4 **lentelė.** Algoritmo parametrai (apatinis indeksas rodo elemento vietą matricoje) 32
2.5 **lentelė.** Naujų individų sukurimas 33
3.1 **lentelė.** „Dash 8 - Q400“ orlaivio techniniai duomenys 37
3.2 **lentelė.** Maršruto Varšuva-Vilnius taškų duomenys 37
3.3 **lentelė**. Maršruto Ryga-Vilnius taškų duomenys 37
3.4 **lentelė.** Maršruto Minskas-Vilnius taškų duomenys 38
3.5. **lentelė.** Trajektorijų iš EPWA, EVRA ir UMMS duomenys 40
3.6. **lentelė.** Trajektorijų, tarp kurių yra audra, duomenys. 40
3.7. **lentelė.** Orlaivių išvykimo ir atvykimo laikai 41
3.8. **lentelė.** Nustatytas atvykimo laikas į Vilnių 41
3.9. **lentelė**. Orlaivių išvykimo ir atvykimo laikai pagal eilės tvarką 42
3.10. **lentelė.** Orlaivių atvykimo laiko skirtumus tarp nustatyto laiko 42
3.11. **lentelė.** Naujas orlaivių greitis 43
3.12. **lentelė.** Orlaivių greičio pokytis. 43
3.13. **lentelė.** Duomenys apie 2019 m. kovo 15 d. skrydžius iš Varšuvos, Rygos ir Minsko 44

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

4Dco-GC – keturių matmenų sutarčių valdymas ir kontrolė (angl. *4 Dimensions Contracts – Guidance and Control*)

ADS-C – automatinė stebėjimo sistema (angl. *Automatic Dependent Durveillance - Contract*)

CASSIS – CTA-ATM sistemos integravimo studijos (angl. *CTA-ATM System Integration Studies*)

CFMU – Centrinis srauto valdymo skyrius (angl. *Central Flow Management Unit*)

CO_2 – anglies dioksidas (angl. *Carbon Dioxide*)

CPDLC – Duomenų su orlaiviais apsikeitimo sistema (angl. *Controller–Pilot Data Link Communications*)

CTA – kontroliuojamas atvykimo laikas (angl. *Controlled Time of Arrival*)

ETA – numatomas atvykimo laikas (angl. *Estimated Time of Arrival*)

FAA – federalinės aviacijos administracijos (angl. *Federal Aviation Administration*)

FAB – funkcinis oro erdvės blokas (angl. *Funtional Airspace Block*)

FMS – skrydžių valdymo sistema (angl. *Flight Management System*)

JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos (angl. *United States of America*)

JPDO – Jungtins planavimo ir plėtros biuras (angl. *Joint Planning and Development Office*)

NASA – Nacionalinės aeronautikos ir kosmoso administracija (angl. *National Aeronautics and Space Administration*)

NexGen – naujos kartos oro transporto sistema (angl. *The Next Generation Air Transportation System*)

OEV – oro eismo vadyba (angl. *Air Traffic Management*)

RPAS – nuotoliniu būdų valdomi bepiločių sistema (angl. *Remotely Piloted Aircraft Systems*)

RTA – nustatytas atvykimo laikas (angl. *Required Time of Arrival*)

SESAR – Bendro Europos dangaus oro eismo valdymo sistemos atnaujinimo projektas (angl. *Single European Sky new ATM system Research*)

SID – standartinis instrumentinis išvykimas (angl. *Standart Instrumental Departure*)

STAR – standartinis instrumentinis atvykimas (angl. *Standart Terminal Arrival*)

SWIM – platus informacijos valdymas (angl. System – *Wide Information Management*)

TBO – trajektorijos pagrindu veikiančios operacijos (angl. *Trajectory Based Operations*)

TOD – išvykimo laikas (angl. *Time of departure*)

UAS – bepilotis orlaivis (angl. *An unmanned aircraft system*)

UAV – bepiločiai orlaiviai (angl. *Unmanned aerial vehicle*)

ĮVADAS

Temos aktualumas. Aviacija – viena iš labiausiai pažengusių ir greičiausiai tobulėjančių transporto sričių. Aviacijos pramonė yra verslo sektorius, kuris gamina, prižiūri ir eksploatuoja orlaivius ir oro uostus. Aviacijos veikla labai įvairi ir apima pradinį pasiruošimą, kurį reikia atlikti prieš skrydį, skrydžio metu vykdomą veiklą ir po skrydžio vykdomą veiklą.

Skraidymas nėra toks paprastas, kaip važiavimas automobiliu. Reikia būti visiškai pasirengusiam ir žinoti visą maršrutą. Labai svarbu, kad visi skrydžiai būtų gerai suplanuoti ir vykdomi pagal skrydžio planą, kuris ne tik padidina ore esančių asmenų saugumą, bet ir, jei reikia, sumažina išlaidas. Skrydžio planavimo tikslas – sukurti saugų skrydį tam tikram orlaiviui, tam tikroje teritorijoje tam tikru laiku. Kadangi bet kokio skrydžio aplinkybės niekada nėra vienodos, apskaičiavimai visada turi būti pritaikyti prie atitinkamo skrydžio. Ypatingas dėmesys skiriamas aukščiui, kuriuo orlaivis turi skristi, kad būtų išvengta susidūrimo su kitais orlaiviais. Išsamios taisyklės, susijusios su skrydžio plano pateikimu, turiniu, pakeitimu ir uždarymu, yra ICAO Oro taisyklių 2 priede (*Annex 2 Rules of the Air*) ir nacionaliniuose informacijos apie skrydžius leidiniuose. Skrydžio planas gali būti pateiktas kaip rašytinis dokumentas, elektroninis dokumentas arba jis gali būti pateiktas žodžiu. Skrydžio plane pateikiama tokia informacija, kuri yra susijusi su skrydžiu (pvz.: orlaivio atpažinimo numeris, skrydžio taisyklės, orlaivio tipas, įranga, išvykimo aerodromas, numatomas skridimo laikas, kruizinis greitis ir aukštis, maršrutas, paskirties aerodromas ir numatytas atvykimo laikas, atsarginis aerodromas, žmonių ir degalų kiekis ir kita informacija).

Kompiuterinių technologijų plėtra buvo ypač svarbi skrydžių planavimui. Kai buvo planuojami pirmieji komerciniai skrydžiai, nebuvo jokio tikslumo; visi skaičiavimai buvo atlikti rankiniu būdu, o tai buvo labai daug laiko reikalaujantis procesas. Šiandien skrydžio planavimas yra kompiuterizuotas su naujomis technologijomis. Tačiau pasak (2003) Gibbs J. M et al., dabartinės kartos orlaivių skrydžio plano įvedimas, redagavimas ir peržiūra ir toliau vykdomas taikant sudėtingus metodus. Todėl skrydžio įgulos dažnai skundžiasi, kad esamos skrydžio valdymo sistemos nėra intuityvios, sunkiai interpretuojamos ir reikalaujančios pernelyg daug laiko. Autoriai teigia, kad nesugebėjimas aptikti aplinkos pokyčių, kurie kelia grėsmę skrydžių saugai, skrydžio planuose išliks netikslūs skaičiavimai (Gibbs *et al.* 2003).

Vienas iš svarbiausių veiksnių planuojant skrydį yra degalų sąnaudos. Orlaivio degalų sąnaudos yra itin didelės, ir išsiaiškinti, kiek degalų reikės, yra svarbi bet kokio plano dalis. Neprognozuojami orų pasikeitimai gali turėti žalos orlaiviams, dėl staigios audros ar didelių vėjų orlaivis gali būti priverstas kilti ar žemėti į kitą aukštį, o tai didins papildomas degalų sąnaudas, nei tikėtasi. Vėjo kryptis priešinga kryptimi orlaivio skrydžiui gali trukdyti įgulai atlikti skrydį su apskaičiuotu reikalingu degalų kiekiu.

Problema: Sparčiai vystantis oro transportui ir didėjant oro eismui, didėja oro erdvės užimtumas. Norint susidoroti su eismo padidėjimu reikia realiojo laiko skrydžių planavimo sistemos. Dabartinė skrydžių planavimo sistema remiasi skrydžiu oro erdve tam tikrais numatytais oro keliais. Apskaičiuotas atvykimo laikas dažnai skiriasi dėl meteorologinių sąlygų, avarinių situacijų ar kitų nenumatytų įvykių. Todėl norint padidinti skrydžių saugą ir skrydžių efektyvumą reikalinga reali orlaivio trukmė maršrute, ekonominis skrydžio parametrų keitimas bei atvykimo skaičiavimas atsižvelgiant į įvairius faktorius (vėjas, meteorologinai reiškiniai, ribotos zonos ir t. t.).

Tyrimo objektas: Orlaivių atvykimo į oro uostą laiko planavimas.

Darbo tikslas:

- Išanalizuoti orlaivių skrydžių planavimą taikant I4D trajektorijos koncepciją kompleksinėje sistemoje, kuri skaičiuotų orlaivių atvykimą į Vilniaus oro uostą efektyviai keičiant skrydžio parametrus ir atsižvelgiant į meteorologines sąlygas.

Darbo uždaviniai:

- Literatūros analizėje išanalizuoti vykdomus oro erdvės optimizavimo projektus bei I4D trajektorijos koncepcijos privalumus.
- Sukurti orlaivių maršrutus iš įvairių oro uostų į Vilniaus tarptautinį oro uostą.
- Sudaryti sistemos kompiuterinį modelį įvertinat meteorologines sąlygas bei kitas kliūtis bei parinkta tvykimo laiką orlaiviams.
- Atlikti gautų rezultatų analizę ir pateikti rekomendacijas tolesniam sukurto skrydžių planavimo metodo tobulinimui.

Taikoma metodika: Šio darbo tyrime bus naudojami aukšto lygio metaheuristiniai algoritmai.

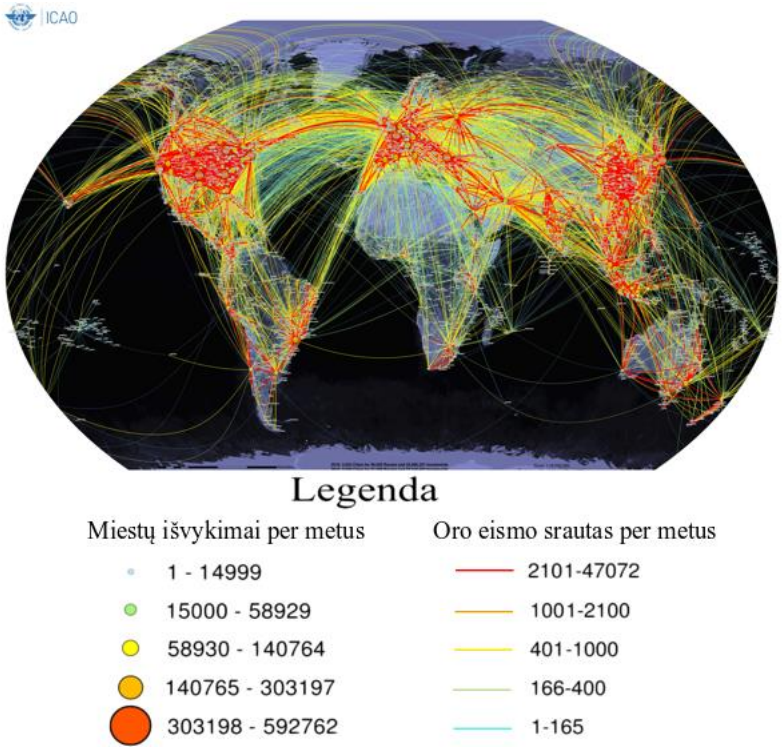
1. I4D ORO ERDVĖS LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje daugiausia dėmesio skiriama JAV ir Europos šalių organizacijos inicijuojamų projektų apžvalgai, pilotuojamų ir nepilotuojamų orlaivių skrydžių planavimui bei i4D trajektorijos koncepcijos literatūrinei analizei.

1.1. SESAR, „NextGen“ ir kiti oro eismo optimizavimo projektai

4D trajektorijų valdymas vyksta dviem etapais. Pirmasis vadinamas pradiniu 4D (I4D), o antrasis - „Full 4D“. Būtinybė suskirstyti procesą atsiranda dėl to, kad I4D nesukelia didelių techninių problemų. Tai reiškia, kad teigiamą poveikį galima pasiekti šiek tiek atnaujinant esamą įrangą. I4D operacijas sudaro laiko suvaržymas orlaiviams jų susikirtimo taške, kad būtų galima sudaryti eilę atvykimui. Tipinis susijungimo taškas gali būti pradinio artėjimo taškas (IAF).

Pasak Klooster ir Smedt (2011), tiek Amerikoje, tiek Europoje per artimiausius dvidešimt metų tikimasi oro eismo padidėjimo, o tai kelią susirūpinimą dėl didelių degalų sąnaudų, poveikio aplinkai, triukšmo ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų padidėjimo. Tarptautinė civilinės aviacijos organizacija prognozuoja, kad oro eismo srautas nuo 2016 metų (1.1. pav.) iki 2036 metų išaugs 4,8 % (ICAO Long Term Traffic Forecasts 2016). Ši problema pripažįstama JAV naujos kartos oro transporto programoje (NextGen) ir Europos bendro dangaus programoje (SESAR), kurių tikslai yra sumažinti aviacijos poveikį aplinkai didinant pajėgumus ir eismo saugumą. Viena iš pagrindinių naudojamų technologijų yra keturių dimensijų trajektorijos modelis (I4D).



1.1 pav. Oro eismo srautas pasaulyje 2016 metais (ICAO 2016)

Naujos technologijos yra labai svarbios aviacijos ateičiai. Kasdien iki 27 000 skrydžių trajektorijų kerta Europos oro erdvę, o keleivių skaičius iki 2020 metų bus dvigubai didesnis ir dabartinė infrastruktūra nebegalės užtikrinti paklausos augimo, nebent tobulėtų. Bendro Europos dangaus oro eismo valdymo tyrimų programa suteiks Europai aukšto lygio oro eismo valdymo infrastruktūrą, kuri leis saugią ir aplinką tausojančią oro transporto plėtrą (SESAR 2012).

Jau užimtame Europos danguje numatomas oro eismo apimties augimas skatina gerinti oro eismą valdymo (OEV) efektyvumą, kurį patvirtina Europos bendro dangaus programa SESAR. Dabartinis oro eismo valdymo optimizavimas, sumažinant sektorių ir atskyrimo atstumus, pasiekė ribas. Šiuo metu centrinis srauto valdymo skyrius (CFMU) Briuselyje yra atsakingas už eismo optimizavimą, bet labai apkrautuose sektoriuose vyksta vėlavimai. Todėl SESAR veiklos tikslas yra planuoti I4D trajektorijas ir taip optimizuoti ir paskirstyti srautus laike užkrautuose sektoriuose, išlaikant dabartinį saugos lygį (Barnier *et al.* 2009).

Oro transporto sistemos susiduria su didėjančiais poreikiais ir, pasak Federalinės aviacijos administracijos duomenimis (FAA), metinis oro eismo srautas kiekvienais metais vis didės. Dabartinė oro erdvės sistemos architektūra ir valdymas negalės veiksmingai valdyti šio padidėjimo dėl keleto ribojančių veiksnių, įskaitant neefektyvų oro erdvės panaudojimą, padidintą skrydžių valdymo darbuotojų darbo krūvį ir pasenusias technologijas. 2004 m. JAV kongresas leido sukurti Jungtinį planavimo ir plėtros biurą (JPDO), sudarytą iš penkių federalinių agentūrų, kad būtų sukurta ateities oro transporto sistemos vizija ir veiklos koncepcija. Šios sutelktos pastangos suderino FAA ir NASA tyrimus ir padėjo apibūdinti būsimus saugumo ir oro eismo pajėgumų optimizavimo iššūkius „NextGen“ projekte. „NextGen“ – koncepcija kardinali transformacija, kurioje pabrėžiamos operacinės sistemos, orientuotos į tinklus, I4D trajektorijos ir didesnis automatinės sistemos naudojimas, siekiant optimizuoti orlaivių seką ir skirstymą, plati ir tikslinė navigacija, itin tankūs skrydžiai jau perpildytuose oro uostose (Harrison 2006).

Platus informacijos valdymas (SWIM) yra tarptautinė koncepcija, sukurta FAA ir Europos pripažinus, kad reikia centralizuotų operacijų tinklo siekiant patenkinti būsimus eismo poreikius. Taip pat buvo pripažinta, kad esama infrastruktūros paradigma nepalaiko I4D trajektorijos valdymo operacijų, numatytų ateityje. Taigi buvo nustatyta, kad reikia modernios informacijos infrastruktūros, kuri palengvintų keitimąsi informacija ir valdymą su atitinkamais kokybės ir saugos lygiais, siekiant paremti pasaulio oro erdvės operacijas. Ši koncepcija reikalauja greitų ir patikimų duomenų mainų tarp orlaivių ir visų antžeminių įrenginių, kad būtų galima visapusiškai panaudoti bendrai naudojamos informacijos galią. Atsižvelgiant į SWIM, 4D trajektorijos taps pagrindu, kuriuo bus valdoma oro erdvė. Priešingai dabar naudojamoms 3D trajektorijoms, 4D trajektorijos tiksliai aprašys orlaivio būseną pagal savo fizinę padėtį (3D koordinates) ir laiką (Meserole *et al.* 2006).

Moksliniame straipsnyje „Next Generation Flight Management System for Real-Time Trajectory Based Operations“ nagrinėjama NextGen projekto pagrindines funkcijas bei etapus, I4D sistema bei jos nauda (Ramasamy *et al.* 2014). Straipsnyje buvo atliktas atvejo tyrimas, naudojant „Airbus A380“ orlaivį, kurio didžiausia kilimo masė siekė 480 000 kg, pakilimas iš Londono Heathrow oro uosto į Singapūre esantį Changi oro uostą. Orlaivio parametrai ir aerodinaminiai duomenys buvo gauti iš Eurokontrolės orlaivių duomenų bazės. Tyrimo rezultatuose galima pastebėti kaip priklausomai nuo skrydžio laiko ir kuro kito anglies dioksido (CO_2) ir kitų dujų išmetimas. Trajektorija, atitinkanti mažiausią degalų taupymą, leidžia sutaupyti 90 kg kuro per visą skrydį, palyginti su minimaliu laiko optimizavimu. Straipsnio autorius pabrėžė apie tokių sistemų naudą bei aktualumą, žmonių pilotuojamiems orlaiviams.

Skirtumai tarp šių projektų apžvelgti autorių Enea ir Porretta (2012) moksliniame straipsnyje, kuriame aprašomas ir įvertinimas i4D koncepcijos modelis, kartu ir skirtumai bei panašumai tarp SESAR bei NextGen vykdomų projektų. Autorius pabrėžia, jog šių programų pirminis tikslas yra vienodas, optimizuoti oro erdvę išlaikant tokį patį saugos lygį. Tačiau pagrindiniai projektų skirtumai susiję dėl skirtingų oro erdvių valdymo principų. Europoje oro erdvė labiau susiskaldžiusi, o JAV - vientisa. Kita vertus, didžiausi pajėgumų suvaržymai JAV dažniausiai būna svarbiausiuose oro uostuose ir jų apylinkėse, o Europoje didžiausi pajėgumų apribojimai yra oro erdvės keliai.

Apie skirtingų regionų – Jungtinių Amerikos valstijų ir Europos regiono šalių – OEV sistemų palyginimą rašoma disertacijoje „Regioninių oro erdvės blokų formavimo remiantis skrydžių srautais metodikos sukūrimas“. Pagal plotą labai panašiose teritorijose funkcionuojančių OEV sistemų efektyvumas labai skiriasi. Jeigu JAV oro erdvės organizavimas pirmiausia paremtas oro navigacijos paslaugų teikimo ir skrydžių efektyvumo užtikrinimu visos šalies arba regiono mastu, tai Europos regione oro erdvė yra organizuota pagal jį sudarančių valstybių sienas, ir yra pagrindinė egzistuojančios fragmentacijos priežastis, lemianti kelis kartus mažesnius OEV sistemos efektyvumo rodiklius – aptarnaujamą orlaivių skaičių ir teikiamų oro navigacijos paslaugų sąnaudas. Autorius pabrėžia, kad oro erdvės fragmentaciją galima būtų išskirti kaip pagrindinį ribojantį veiksnį skrydžių efektyvumo didinimo sąlygoms sudaryti. Šio ribojančio veiksnio eliminavimas organizuojant oro erdvę svarbus ne tik regionams, sudarytiems iš daugelio, palyginti nedidelių, valstybių, bet ir didelėms pagal plotą valstybėms, kurių oro erdvės struktūra negali sudaryti sąlygų efektyvesniems skrydžiams užtikrinti (Kondroška 2012).

Siekiant spręsti šią problemą pasaulyje vykdomas ne vienas oro erdvės stambinimo projektas. Vienas tokių projektų šiuo metu yra vykdomas Europos regione, įgyvendinant bendro Europos dangaus koncepciją, kurios tikslas yra Europos oro erdvėje sudaryti keletą funkcinių oro erdvės blokų (FAB), turinčių padėti įgyvendinti skrydžių efektyvumo didinimo priemones (Kondroška ir Stankūnas 2012).

Remiantis oficialiu tinklapiu *eurocontrol.int,* Funkcinis oro erdvės blokas yra oro erdvės blokas, pagrįstas operaciniais reikalavimais ir sukurtas nepriklausomai nuo valstybės ribų, kuriame oro navigacijos paslaugos ir susijusios papildomos funkcijos yra optimizuotos ir integruojamos.

FAB nuolat vystosi pagal tikslus, nustatytus siekiant pagerinti Europos oro eismo valdymo tinklo veiklą. Naujausi blokai yra šie:

• „UK-Ireland FAB“ (Jungtinė karalystė, Airija);

• „Danish-Swedish FAB“ (Danija, Švedija);

• "Baltic FAB" (Lietuva, Lenkija);

• „BLUE MED FAB“ (Albanija, Kipras, Graikija, Italija ir Malta);

• „Danube FAB“ (Bulgarija, Rumunija);

• „FAB CE“ (Austrija, Bosnija ir Hercegovina, Kroatija, Čekija, Vengrija, Slovakija, Slovėnija);

• „FABEC“ (Belgija, Prancūzija, Vokietija, Liuksemburgas, Nyderlandai ir Šveicarija);

• „North European FAB“ (Estija, Suomija, Latvija ir Norvegija);

• „South West FAB“ (Portugalija, Ispanija).

Europos projektas 4Dco-GC pradėtas 2010 metais. Šio projekto koncepcija: visiškai automatizuota oro transporto sistema naudojant i4D technologijas. Kiekvienas orlaivis gauna 4 dėmenų duomenų (x, y, z, t) rinkinį, kuris leidžia skirsti orlaiviui saugiai ir be vėlavimų. Projekte siūloma atsisakyti standartinių atvykimo schemų (angl. STAR) ir orlaivių atvykimui naudoti I4D trajektorijas (Joulia *et al.* 2011).

2007 m. lapkritį pradėtas CTA-ATM sistemos integravimo studijos (CASSIS) Eurokontrolės partnerystės projektas, kuris apima suinteresuotuosius subjektus iš pramonės, mokslinius tyrimus ir operacijas. Projektu siekiama ištirti orlaivio funkcijų naudojimą skristi pagal kontroliuojamą atvykimo laiką vidutinio ir didelio tankio eismo zonose. Šiam projektui buvo pavesta parengti operacijų, susijusių su atvykimo laiko valdymu (CTA), naudojimą atvykimo zonoje. 2008 m. rugsėjo mėn. projekte, buvo atliktas skrydis, kuriame buvo naudojamas orlaivio laiko valdymas. Šie skrydžio bandymai leido išnagrinėti veiksnius, turinčius įtakos laiko valdymo veikimui ir aerodromo laiko valdymo galimybėms atvykimo zonoje. Ši analizė rodo, kad dabartinės kartos aviacijos elektronikos naudojimas laiko požiūriu tenkinančiame taške yra įmanomas su mažiau nei 5 sekundžių tikslumu ir gali pasiekti 2 minučių nusileidimo intervalo atstumą tarp orlaivių. Taip pat aptariamos rekomendacijos dėl būsimų pokyčių ir svarstymų, susijusių su platesnio masto įgyvendinimu. (Klooster *et al.* 2009).

Gate-to-Gate projekte pagal Jonge (2012) pateikiamas I4D skrydžio planavimo „nuo vartų iki vartų“ koncepcija, kuri manoma turės didelį aviakompanijų susidomėjimą, nes bus užtikrintas netrukdomas atvykimas į paskirties vietą. Pateiktos koncepcijos idėja yra skrydžių valdymo paslaugų

teikėjų galimybė suplanuoti nepertraukiamus atvykimus laiku, pasiekus kelių minučių tikslumą. Straipsnio autorius išskiria šiuos 4D trajektorijų operacinius privalumus:

- Oro erdvės eismo pagerėjimas, dėl patikimesnės informacijos apie konkrečią orlaivio buvimo vietą;
- Aviakompanijų bei operatorių resursų optimizavimas, dėl tiesesnių bei greitesnių maršrutų;
- Sumažėjusios išlaidos, dėl trumpesnio laiko maršrute bei mažesnio kuro sunaudojimo;
- Sumažėjęs išmetamųjų dujų kiekis;
- Padidėjęs oro erdvės laidumas;
- Sumažėjęs orlaivių trajektorijų susikirtimų, mažiau trajektorijos iškraipymų;
- Padidėjęs pajėgumas, skrydžių vadovai galėtų saugiai valdyti daugiau eismo;

Minėti projektai buvo sukurti siekiant pagerinti aviacijos veiklos efektyvumą, saugą ir aplinkos tvarumą. Kaip šių ir kitų nacionalinių ir tarptautinių iniciatyvų dalis, per kelis dešimtmečius buvo nustatyta keletas novatoriškų veiklos ir technologinių koncepcijų, skirtų civilinei aviacijai. Programose OEV evoliucija yra labai automatizuota bendradarbiavimo sistema, leidžianti geriau numatomą, lanksčią ir veiksmingą oro erdvės srauto valdymą užtikrinant aukštesnį automatizavimo, saugumo ir tikslesnės navigacijos lygį. Sistemos nuolat nustato sprendimus, atitinkančius reguliuojamus eismo atskyrimo kriterijus, veikiančius oro erdvės apribojimus ir orlaivio eksploatacinių savybių apribojimus. Visų pirma skaičiavimais sukurtas 4D trajektorijos modelio vertinamas atsižvelgiant į skersinio, vertikalaus ir išilginio eismo atskyrimo kriterijus, oro erdvės pajėgumus ir maršruto apribojimus, taip pat į pavojingą oro sąlygų vengimą. Atsižvelgiant į tai, keturių matmenų trajektorijos įvedimas, buvo nustatytas kaip pagrindinis žingsnis siekiant pagerinti orlaivių eksploatavimo efektyvumą, saugą ir aplinkos tvarumą (Gardi *et al.* 2015).

Nepilotuojamų ar nuotoliniu būdu pilotuojamų orlaivių integracija buvo tiriama jau keletą metų, ir buvo pasiūlytos įvairios skirtingų naudojimo atvejų ir scenarijų sąvokos. Modeliavimo rezultatai parodė, kad iš esmės galima integruoti bepilotį orlaivį į esamą oro eismo valdymo sistemą (Geister *et al.* 2013). Kitos koncepcijos siekia pakeisti oro erdvės struktūrą, skirtą mažų UAS integracijai, pavyzdžiui, įdiegiant specializuotą bepiločio orlaivio eismo valdymą (Kopardekar et al. 2014). 2017 m. birželio 16 d. Bendrosios Europos dangaus oro eismo valdymo mokslinių tyrimų bendroji įmonė paskelbė „U-space“ planą, kuriame išdėstyta eismo valdymo planas, skirtas mažiems bepiločiams oro erdvėje. Projekto kūrėjai siekia sukurti virtualų tinklą, kuriuo vadovaudamiesi, bepiločiai orlaiviai galės atlikti kasdienines misijas net ir labiausiai užimtose erdvėse.

1.2. Nuotoliniu būdu valdomų bepiločių orlaivių skrydžių valdymo sistemos apžvalga

Nepilotuojami orlaiviai šiuo metu naudojami daugybėje karinių ir civilinių operacijų. Bendrai šios transporto priemonės gali būti valdomos rankiniu būdu (per nuotolinio valdymo pultą) arba

autonomiškai, atsižvelgiant į iš anksto nustatytą skrydžio planą. Dauguma dabartinių skrydžių valdymo priemonių nepilotuojamiems orlaiviams reikalauja, kad operatorius rankiniu būdu nustatytų seriją erdvinių kelio taškų, kuri apibrėžia norimą skrydžio trajektoriją transporto priemonei.

Bepiločiams orlaiviams vis gausėjant, atsiranda jų automatinio valdymo poreikis. Pirmieji autopilotai buvo sukurti raketoms, o vėliau nuo 1910 m. pradėti diegti į lėktuvus ir laivus (Sullivan 2006). Autopiloto sistemos dabar plačiai naudojamos šiuolaikiniuose orlaiviuose ir laivuose. UAV autopilotinių sistemų tikslas yra nuosekliai vadovauti bepiločiams, kad jie sektų nuorodytu keliu arba keliais tarpiniais taškais. Galinga UAV autopiloto sistema gali valdyti UAV visais etapais, įskaitant kilimą, aukšėjimą, žemėjimą ir tūpimą. „Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles“ straipsnyje pristatomi pagrindiniai bepiločių orlaivių skrydžių valdymo principai (Chao *et al*. 2010). Radijo valdymo sistema ir autopiloto valdymo sistema paaiškinama tiek techninės, tiek programinės įrangos požiūriu. Palyginamos kelios tipiškos autopilotinių paketų atsarginės dalys atsižvelgiant į jutiklių paketus, stebėjimo metodus ir stiprumo reguliatorius.

Autorių Feigh et al. (2008) patente „Methods for generating a flight plan for an unmanned aerial vehicle based on a predicted camera path“ pateikiamas būdas kaip sugeneruoti oro transporto priemonės skrydžio planą, turinčią stebėjimo modulį, naudojant valdymo bloką, kuriame yra rodymo įrenginys. Šis metodas apima žemėlapį, kuris rodomas ekrano įrenginyje, grafinio atpažinimo stebėjimo modulio norimą tikslą ir skrydžio plano sudarymą taip, kad prognozuojamas kameros kelias tyrimo metu sutaptų su norimu tikslu. Kitame įgyvendinimo variante pateikiamas kitas būdas sukurti oro transporto priemonės su fotoaparatu skrydžio planą. Šis būdas apima keleto stebėjimo kameros nustatymą rodmenų įrenginyje, susijusių su oro transporto priemone, ir keleto taškų sukūrimą, kuris naudojamas kaip skrydžio planas, pagrįstas daugybe stebėjimo tikslų.

Nepilotuojamų orlaivių misijose, tokiose kaip stebėjimas, kartografavimas, žvalgyba, duomenų rinkimas, gaisro aptikimas ir stebėjimas, problema yra kiek įmanoma tiksliau išlaikyti planuojamas trajektorijas ir atitinka numatomą atvykimo laiką. Todėl I4D susidūrimų išvengimo sistema reikalinga norint užtikrinti saugumą misijos metu. Sistemos misija priversti bepilotį orlaivį sėkmingai bei savarankiškai išvengti susidūrimo atsiradus tam tikriems konfliktams. Pasiūlyta sistema pateikia sprendimą, pasiremdama 4D trajektorijų principu, ir gali būti naudinga, naudojant nedideliam skaičiavimų laikui. Straipsnyje nagrinėjama konfliktų aptikimo ir sprendimo problema. Vienas konfliktų sprendimo metodas yra pagrįstas greičio reguliavimu. Šiame metode visų susidūrimų metu naudojamų oro transporto priemonių greičio profilis yra centralizuotai apskaičiuojamas, siekiant išspręsti konfliktą, tačiau kai kurių konfliktų negalima išspręsti. Tikslas yra rasti 4D trajektorijas išvengimo susidūrimo, kurios sumažina susidūrimo tikimybę, tuo pačiu sumažinant kiekvieno UAV maršruto taškų nukrypimą ir greičio pokyčius. Be to, numatomas atvykimo laikas (angl. ETA) bus įvykdytas vykdant bepiločio misiją (Alejo *et al.* 2013).

Pasak Ravenscroft (2008) nepilotuojami orlaiviai vis plačiau naudojami įvairiausioms reikmėms - karinėms, privačioms ar komercinėms. Šiame straipsnyje pateikiami įrankiai ir metodai, skirti apskaičiuoti nepilotuojamų orlaivių skrydžio planus, nukreipiantys aplink kliūtis, turinčias erdvės ir laiko matmenis. Šio straipsnio metodai gali parodo duomenis, atspindinčius vietas, kurias turi aplankyti UAV, ir duomenis, atspindinčius erdvinių ir laiko matmenų kliūtis. Taip pat galima apskaičiuoti trajektorijas, turinčias erdvinius ir laiko matmenis, pagal kuriuos orlivis gali keliauti iš vienos paskirties vietos į kitą. Takant metodą galima nustatyti, ar šios trajektorijos susikerta su bet kokiomis kliūtimis, ir bent jau bandyti perskirstyti trajektorijas aplink kliūtis.

Specialių programinės įrangos modulių įdiegimas naujos kartos skrydžių valdymo sistemose, kurios yra pagrindiniai automatizuotų navigacijos ir orientavimo paslaugų įgulos valdomų orlaivių ir nuotoliniu būdu paleidžiamų orlaivių sistemų (RPAS) teikėjai, gali žymiai padidinti pažangą įvedamų pagal laiką pagrįstų operacijų (Ramasamy et a. 2015). Šių autorių straipsnyje pateikiami pagrindiniai NG-FMS architektūros elementai, leidžiantys integruoti keturių matmenų trajektorijos planavimą ir optimizavimą.

Nuotoliniu būdu valdomos orlaivių sistemos skiriasi nuo įprastų valdomų orlaivių, nes pilotas yra ne lėktuve, bet kažkur toli. Nepriklausomai nuo to, kaip nuotolinis pilotas sąveikauja su orlaiviu, naudojant komandų ir valdymo duomenų rinkimą ir bet kokį susijusi automatizavimo lygį, reikšmingi įvedimai yra atliekami kompiuteriuose. Deja, nuotoliniu būdu pilotuojamų orlaivių integracija į oro erdvę šiandien yra gana sudėtinga dėl techninių, operacinių, reguliavimo problemų. Orlaivis neturi gebėjimo „matyti ir išvengti“ kitų orlaivių (taip pat ir reljefo, kliūčių ir nepalankių oro reiškinių).

Daugelis nuotloniu būdų pilotuojamų orlaivių gali atlikti tam tikrą automatizuotų operacijų valdymą, nes orlaivį stabilizuojančios skrydžių valdymo sistemos, taip pat pasaulinės navigacijos palydovų sistemos imtuvai, leidžiantys kelio taškų navigaciją ir misijų ir skrydžių planavimą. Nuotoliniai pilotai palaiko operacinį valdymą nuo žemės ir tiesiogiai arba per skrydžio valdymo kompiuterius sąveikauja su orlaivio skrydžio valdymo sistema bevieliu ryšiu. Dabartinėse oro eismo valdymo sistemose orlaivių judėjimo atskyrimas valdomas stebint orlaivio padėtį ekrane per pirminį ir antrinį stebėjimo radarą. Jei, remiantis randaro informacija, tikimasi konflikto, skrydžių valdymo centrai įsikiša, susisiekus su atitinkamu nuotolinio orlaivio pilotu ir nurodydami skrydžio manevrą (vektorius ar aukščio pakeitimą), kurie išspręstų konfliktą. Šiandien tokie orlaiviai privalo turėti minimalią įrangą ir kiek galima labiau elgtis kaip įgulos orlaiviai skaidrumo sumetimais, palengvindami jų integraciją į dabartinę oro eismo sistemą (Thomas ir Bleeker 2015).

1.3. I4D trajektorijos koncepcijos taikymas planuojant skrydžius

Šiais laikais yra poreikis nustatyti kitos pilotuojamos ar nepilotuojamos transporto priemonės vietą bet kur ir bet kada. Dabartinė technologija naudoja stebėjimo centrą su kompiuteriais ir ryšių

kanalais. Orlaiviai siunčia savo pozicijos duomenis per ryšio nuorodą į stebėjimo ir valdymo centrus. Skrydžių stebėjimo ir valdymo centras realiu laiku gali matyti dabartines orlaivių vietas ekrano vienete. Autorių Lin ir Valley (2012) pristatytas išradimas yra susijęs su nuotolinio stebėjimo procesu balso ir vaizdo ryšiu per internetą. Kiekvienas įrenginys gali gauti ir sekti kiekvieno grupės asmeninę informaciją apie vietą ir stebėti ją realiuoju laiku. Kiekvienas įrenginys gali bendrauti vienas su kitu balsu. Įrengtos kameros gali perduoti vaizdą tiems žmonėms, kurie turi stebėjimo įrenginį.

Remiantis straipsniais, kuriuos galima pasiekti per oficialų projekto tinklalapį *sesarju.eu*, orlaivyje i4D technologija diegiama naudojant patobulintą duomenų perdavimo technologiją - ADS-C ir duomenų su orlaiviais apsikeitimo sistema (CPDLC) - ir patobulintos OEV galimybės. Šios technologijos leidžia orlaiviui keistis realaus laiko trajektorijos informacija su skrydžių vadovu, tokiu būdu sumažinant vėlavimą naudojant optimizuotus skrydžio profilius. Tiek skrydžio vadovai, tiek skrydžio įgula žino , kokia trajektorija bus skrendama. Dėl to I4D naudinga oro erdvės naudotojams, nes užtikrina geresnį skrydžio efektyvumą, mažesnį darbo krūvį skrydžių vadovams, didesnį nuspėjamumą ir didesnį saugumą. Be to, I4D leidžia optimizuoti skrydžio profilius, kad sumažėtų kuro deginimas ir išmetami teršalai.

Šiandienos naujos kartos FMS integracija būsimoje oro eismo valdymo aplinkoje reikalauja naujų pajėgumų kūrimo, o tarp jų realaus laiko 4D trajektorijos įdiegimas tapo privalomas. „A soft dynamic programming approach for on-line aircraft 4D-trajectory optimization“ straipsnyje pateikiamas metodas, pagrįstas dinaminiu programavimu, siekiant generuoti optimalias 4D trajektorijas esant keliems apribojimams. Šie apribojimai paprastai yra aukščio arba greičio apribojimai, taikomi tam tikruose skrydžio plano taškuose (Hagelauer *et al.* 2008).

Gebėjimas automatiškai aptikti ir išspręsti konfliktus laikomas esminiu naujos kartos oro eismo valdymo sistemos reikalavimu. Nors automatinio konflikto nustatymo sistemas jau daugiau kaip 20 metų naudojo skrydžių valdymo sistemos, automatizuotos sistemos iki šiol nepasiekė ribos, reikalingos operaciniam diegimui. Autoriaus Hainz (2005) aprašytas rezoliucijos algoritmas suformuluotas taip, kad atitiktų automatinės oro erdvės koncepcijos veiklos reikalavimus. Jos veiklos tikslai yra didinti saugą ir oro erdvės pajėgumus ir kuo labiau suderinti naudotojų pageidavimus skrydžio operacijose. Algoritmas generuojant trajektorijas turi atsižvelgti į orlaivio charakteristikas, maršruto struktūrą, kad išspręsti visų tipų konfliktus nereikalaujant, kad skrydžių vadovas jas prižiūrėtų ir patvirtintų. Be to, trajektorijos turėtų būti suderinamos su kliūčių ir skrydžio plano pakeitimais. Aprašytas srauto rezoliucijos algoritmas (angl. Flow Chart for Resolution Algorithm) yra bendras variklis sprendžiant konfliktus. Taigi, jis gali būti įtrauktas į bet kurią veiklos koncepciją, kuri reikalauja automatizuoto sprendimo metodo.

4D trajektorijos tiksliai apibūdina vietą (platuma, ilguma ir aukštis) ir orlaivio laiką, todėl tokių 4D trajektorijų principu valdomas orlaivio atvykimo laikas oro keliuose. Tokia technologija

leidžia sekti skrydį ir vykdyti jį kuo arčiau suplanuoto skrydžio profilio. Tai padeda geriau suplanuoti išankstinius maršrutus, kas sumažina vėlavimus, sutaupyti kuro dėl trumpesnio sudaryto maršruto ir padidina skrydžių saugą (Mutuel *et al.* 2013).

Atsižvelgiant į keitimąsi informacija tarp orlaivių ir skrydžių vadovų centrų per duomenų perdavimo liniją, trajektorija pagrįstas eismo valdymas gali atsižvelgti į pageidaujamas vartotojo trajektorijas, taip pat pasinaudoti labai tiksliomis orlaivių judėjimo prognozėmis. Be to, aprašytos funkcijos kompensuoti nukrypimus dėl klaidingai prognozuojamo vėjo. Korn ir Kuenz (2006) aprašo 4D koncepcijos sistema, kuri intensyviai išbandyta įvairiuose skrydžio bandymuose Airbus 330 skrydžio treniruoklyje Berlyne ir su bandomuoju orlaiviu ATTAS VFW 614: dviejų reaktyvinių variklių orlaiviu, modifikuotu atlikti įvairius mokslinius tyrimus.

Išankstinio skrydžio planavimo proceso metu yra sukuriamas skrydžio planas ir kurio yra vadovaujamasi nuo orlaivio skrydžio išvykimo vietos į paskirties vietą. Paprastai skrydžio planas yra daugelio skaičiavimų rezultatas, apimantys kitus pagrindinius įvestus duomenis. Šie pagrindiniai duomenys gali būti gauti iš paskelbtos informacijos apie oro uostus, navigacines pagalbines priemones, orlaivio charakteristikas, orų stebėjimo prognozes. Skrydžio plano aspektai apima kuro skaičiavimus ir oro eismo kontrolės reikalavimų laikymąsi. Kuro skaičiavimas užtikrina, kad orlaivis galėtų saugiai pasiekti paskirties vietą, net jei dėl meteorologinių reiškinių orlaivis bus nukreiptas į atsarginį aerodromą. Taip pat oro eismo kontrolės reikalavimų laikymasis sumažina orlaivių susidūrimų ore riziką. Automatinės programinės įrangos programos naudojamos skrydžio planams kurti, suteikiamos tik pilotui, skrydžių vadovui arba kitam ribota prieiga turinčiam vartotojui. Todėl vartotojai dažnai keičiasi lengvai redaguojamais duomenimis, kad sukurtų teisingą galutinį rezultatą. (Sylvester 2012). Todėl galima teigti, kad tikslesnis ir išsamesnis skrydžio planas leistų sumažinti išlaidas, pasirenkant optimalų kelią, aukštį, greitį ir minimalų reikalingą kuro kiekį.

Apie 4D panaudojimą, kuriant skrydžių planus yra rašoma straipsnyje „Method and apparatus for generating a four- plan“ išleisto 2011 metais, autoriai Bolt et al. (2007). Pasak jų, dabartinės skrydžių planavimo sistemos atsižvelgia į įvairius aukščius, apskaičiuodamos vėjo kryptį, stiprį, temperatūros kilimą, reikalingą kuro kiekį, ir parenka optimalų oro kelią. Tačiau šios sistemos neturi galimybės naudotis realaus laiko informacija. Kadangi vėjo, temperatūros prognozės ir oro erdvės apribojimai keičiasi kelis kartus per dieną, laiku neatnaujintas skrydžio planas tampa netikslus. Įdiegus 4D modelį, skrydžių planavimo sistema automatiškai tiesioginiu laiku gautų informaciją apie meteorologinius reiškinius, oro erdvės apribojimus, aerodromų užimtumą, bei naudotojo pageidavimus, sukurdama 4D skrydžio planą.

Klooster ir Wichman (2008) pastebi, kad pritaikius 4D modelį skrydžių planavime sutrumpėtų orlaivių atvykimo laikas. Taikant 4D modelį skrydžio metu būtų kontroliuojamas orlaivio greitis, žemėjimo ir aukštėjimo sparta priklausomai nuo atstumo. Apie greičio mažinimo maršrutuose

privalumus tokius kaip kuro taupymas ir vėlavimų mažinimas taip pat rašo Delgado ir Prats (2012). Tokia orlaivio kontrolė leistų tiksliau vykdyti išankstinį skrydžio planą ir taip panaikinant vėlavimus dėl oro erdvės užimtumo.

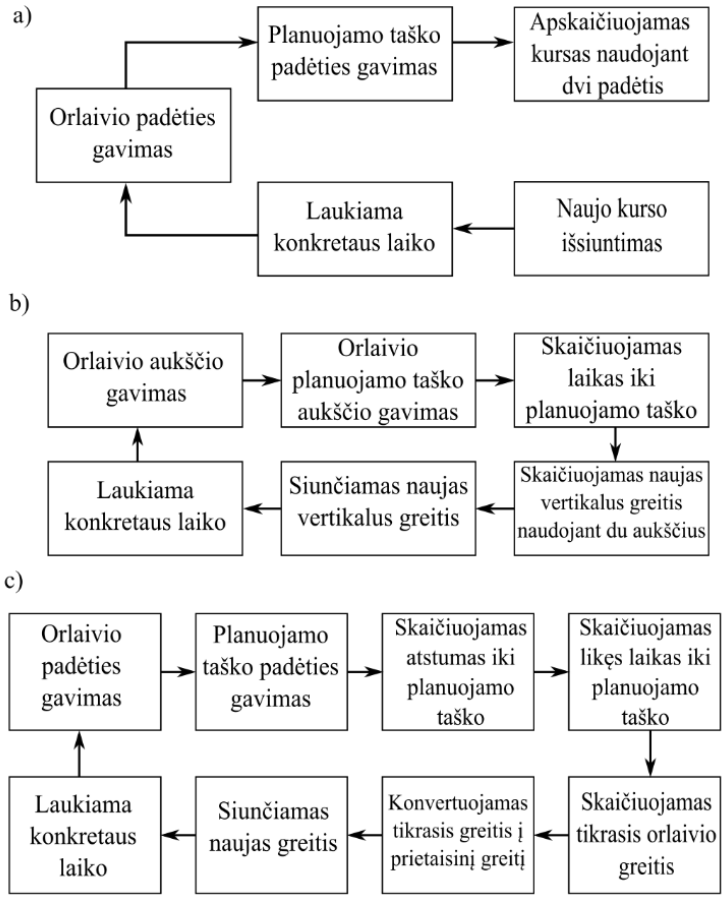
Honzík ir Herodes (2012) apibūdinamas orlaivio skrydžio valdymo sistemos (FMS) prototipas, kuriuo remiantis buvo įvykdytas I4D skrydis. I4D koncepcija yra pagrįsta ore apskaičiuotomis prognozėmis, kurios siunčiamos ir naudojamos antžeminėms sistemoms. Tikslas yra iš anksto nustatyti visų orlaivių, besiribojančių su susijungiančiu tašku perpildytoje zonoje, seką. Po koordinavimo tarp antžeminių sistemų ir orlaivių kiekvienam orlaiviui priskiriamas laiko suvaržymas susijungimo taške. Prototipas pagrįstas „Airbus A320 FMS“ programine įranga, kurią papildė i4D funkcijos, tokios kaip reikalaujamas atvykimo laikas (RTA) skrydžio etape ir duomenų perdavimo patobulinimai. Prototipas buvo išbandytas su faktine aparatūra, „Airbus“ kabinos simuliatoriumi skrydžio metu. Straipsnyje išsamiai aprašomas pirmasis 2012 metais vykęs bandomasis i4D skrydis. Šio skrydžio metu sėkmingai veikė automatinė i4D duomenų perdavimas tarp orlaivių skrydžių valdymo sistemų ir antžeminių sistemų

Buvo parodyta, kad orlaivis sugeba laikytis laiko apribojimus, kurie yra labai tikslūs. i4D skrydžių koncepcija yra pirmasis žingsnis siekiant 4D operacijų, kurios yra pagrindinis Europoje naudojamos skrydžių valdymo įrangos modernizavimo programos tikslas.

Lėktuvų keliamas triukšmas ir išmetamieji teršalai greitai tampa apribojimais, didinant oro erdvės pajėgumus visame pasaulyje. Klooster *et al.* (2008) straipsnyje „4D Trajectory and Time-of-Arrival Control to Enable Continuous Descent Arrivals“ rašo apie trajektorijos pagrindu veikiančios operacijas (TBO) yra siūlomas kaip pagrindines priemones padidinti oro erdvės pajėgumus. Šiame dokumente aprašytas specialus trajektorijos įvertinimo skrydžio bandymų rinkinys, kuris įvyko 2007 m. rugsėjo mėn. Švedijoje. Aprašyti procedūros nustatymo ir tyrimų tikslai. Taip pat autorių Wichman et al. (2007) pateikiami ir analizuojami laiko valdymo ir trajektorijos stabilumas, nurodant, kad dabartinės kartos technika gali patikimai numatyti ir kontroliuoti 4D trajektoriją, o atvykimo laiko tikslumas yra mažesnis nei 15 sekundžių. Pateikiamas trajektorijos tikslumo ir stabilumo palyginimas įvairiose skrydžio stadijose su laiko valdymu ir be jo, kartu su alternatyviais 4D TBO metodais. Taip pat pateikiamos išvados ir rekomendacijos dėl šių tipų TBO išplėtimo ir naujos kartos aviacijos elektronikos modifikacijų.

Apie skrydžio valdymo sistemos funkcijų projektavimą ir modeliavimą, siekiant automatiškai sekti keturių matmenų trajektorijas, yra rašoma Amaro Carmona et al. (2015) autorių straipsnyje. Tai pasiekiama valdant orlaivio tikrojo greičio, aukščio, vietos ir vertikalaus greičio parametrus, kad būtų pasiektas sujungimo taškas nurodytu laiku. Sistema gauna duomenis iš orlaivio ir apskaičiuoja naujus valdymo parametrus, pagrįstus matematinėmis lygtimis ir prognozavimo trajektorijų algoritmais. Pagrindinė idėja yra suteikti kiekvienam orlaiviui laiko apribojimą, kuriuo būtų pasiektas nustatytas

taškas, o tam tikru laiko tarpu orlaivis galėtų skrydį atlikti savarankiškai. Kurso, greičio ir aukščio valdymo ciklai, atliekami orlaivyje per FMS-4D, parodyti 1.2 pav. Jei susijungimo taškas nepasiekiamas nurodytu laiku, orlaivis turi atlikti laukimo procedūrą. Tai sukelia daugiau problemų, nes orlaivis sunaudoja daugiau degalų, o dar blogiau, yra išmetamas didesnis CO_2 kiekis. Taip pat antžeminės sistemos turi apskaičiuoti naują sujungimo taškų seką, o dėl to kyla vėlavimų oro uostuose. Keturių matmenų navigacija yra pagrįsta trijų matmenų maršruto taškais pasiekimu reikiamu atvykimo laiku, keičiant orlaivio skrydžio profilį. Autoriai atliko bandymą, siekdami sužinoti bendrą FMS-4D algoritmų elgseną. Atsižvelgiant į bandymo reikalavimus, buvo pasirinktas maršrutas iš Frankfurto oro uosto (EDDF) į Amsterdamo Schipcholo oro uostą (EHAM). FMS-4D atliktas automatinis skrydis buvo išanalizuotas tarp MARUN (pradinis kilimo fazės pradžios etapas) iki REKKEN (artėjimo tūpti pradžios etapas) taškų. Gauti rezultatai parodė kad, gauta maksimali paklaida yra 3 sekundės, o minimali – 2 sekundės. Orlaivio tikrasis greitis neviršijo ± 15 mazgų nustatyto kruizinio orlaivio greičio (350 mazgų).



1.2 pav. Kurso, greičio ir aukščio valdymo ciklai a) – kurso valdymas; b) – aukščio valdymas; c) – greičio valdymo ciklas *(*išversta pagal Amaro Carmona M. A., Rudinskas D., Barrado C. 2015*)*

Analizė buvo atlikta ir jos rezultatai pavaizduoti su MATLAB programa. Apibendrindami straipsnio autoriai teigia, kad svarbu naudoti tikslesnes elektronines sistemas, galinčias sekti tikslias

trajektorijas, o nepertraukiamas oro greičio pokytis yra pagrindinis veiksnys, leidžiantis orlaiviui pasiekti prognozuojamo atvykimo laiką su labai mažomis klaidomis.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados

Šiame darbe kuriama kompleksinė, realiojo laiko skrydžių planavimo sistema. Orlaivių simuliuojamo skrydžio metu skaičiuojamas naujas orlaivio greitis ir atvykimo laikas atsižvelgiant į meteorologinius reiškinius bei oro erdvės apribojimus.

Iš atliktos literatūrinės analizės galima teigti:

1. Siekiant patenkinti numatytą pajėgumų paklausos padidėjimą, kurį dabartinės oro eismo paslaugos negali užtikrinti, SESAR ir „NextGen“ atliktos mokslinių tyrimų iniciatyvos parodė trajektorijos pagrindu veikiančių operacijų (TBO) naudą, leidžiančią skrydžių vadovams valdyti didesnį eismą nemažinant reikalaujamo saugos lygio. Nors dviejų programų požiūris yra šiek tiek kitoks, abu projektai įrodo, kad įgyvendinant ir naudojant 4 dimensijų informaciją, kuria dalijasi visi, galima konfliktus nustatyti ir išspręsti. Todėl apžvelgus JAV ir Europos projektus, tokius kaip SESAR, „NextGen“, „4Dco-GC“, „Gate-to-Gate“ ir kt., padarytos išvados, kad keturių matmenų trajektorijos įvedimas yra pagrindinis žingsnis siekiant pagerinti orlaivių eksploatavimo efektyvumą, saugumą, sumažinti degalų naudojimą bei išmetamus teršalus.
2. Tobulėjant bepiločių orlaivių panaudojimui civilinėje, karinėje ir komercinėje srityse, yra planuojamas spartus tokių orlaivių pagausėjimas. Todėl naujos kartos skrydžių valdymo sistemų įdiegimas į bepiločius orlaivius palengvins skrydžių planavimą bei padidins skrydžių saugą. Pateiktos technologijos ir koncepcijos galėtų būti naudingos ir nuotoliniu būdų valdomiems orlaiviams. Tai palengvintų ir paspartintų jų integravimą į kontroliuojamą-valdomą oro erdvę ateityje.
3. i4D trajektorijos tiksliai apibūdina vietą (platuma, ilguma ir aukštis) ir orlaivio laiką, todėl tokių i4D trajektorijų principu valdomas orlaivio atvykimo laikas oro keliuose yra labai efektyvus. Tokia technologija leidžia orlaiviui keistis realiojo laiko trajektorijos informacija su antžeminėmis sistemomis, tokiu būdu sumažinant vėlavimą naudojant optimizuotus skrydžio profilius. Tai padeda geriau suplanuoti išankstinius maršrutus, sumažina vėlavimus, sutaupo degalų dėl trumpesnio sudaryto maršruto ir padidina skrydžių saugą.
4. Atlikus literatūros analizę, nuspręsta sukurti sistemą, kuri skaičiuotų efektyvų nenutrūkstamą orlaivių atvykimą į Vilniaus oro uostą atsižvelgiant į meteorologines sąlygas ar oro erdvės apribojimus.

2. ORO EISMO SRAUTO PASKIRSTYMO TYRIMO METODIKA

Šiame skyriuje pateikiama informacija, susijusi su visa tyrimui taikoma teorija, programomis, jų aprašymai ir naudojimo būdai. Trumpai pateikiamas keturių dėmenų trajektorijos koncepcijos įvadas, taip pat matematinis trajektorijos parametrų įvertinimas, pagrindinės formulės reikalingos matematiniams skaičiavimams atlikti.

4D trajektorijos koncepcija pagrįsta laiko integravimu į 3D erdvės orlaivio trajektoriją. Juo siekiama užtikrinti, kad lėktuvas būtų praktiškai nevaržomas, o optimali trajektorija išlaikoma kuo ilgiau, kad orlaivis galėtų pasiekti nurodytą vietą kuo tikslesniu atvykimo laiku.

Remiantis prieš tai pateikta informacija, kelio taškas apibrėžiamas 1.1 lentelėje pateiktais komponentais.

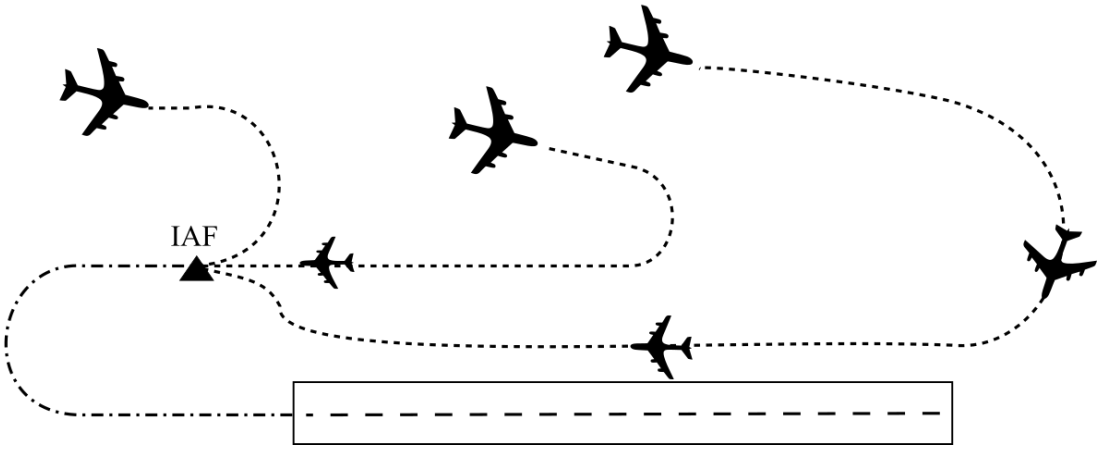
2.1 lentelė. 4D trajektorijos parametrų apibrėžimas

Parametras	**Apibrėžimas**
Platuma	Dydis, kuris apibrėžia, kiek taškas yra nutolęs Žemėje į šiaurinę arba pietinę pusę nuo pusiaujo.
Ilguma	Dydis, kuris apibrėžia, kiek taškas yra nutolęs Žemėje į rytinę arba vakarinę pusę nuo pradinio dienovidinio.
Aukštis	Aukštis virš jūros lygio.
Laikas	Orlaivio laikas konkrečiame taške.

i4D trajektorijų operacijų privalumai:

- Oro eismo operacijų tobulinimas didinant bendrą prognozuojamą eismą.
- Optimalios oro linijų operacijos (orlaiviai, naudojantys pageidaujamus maršrutus ir lygius).
- Geresnė teikiama paslauga (dėl antžeminės ir oro – žemės sąveikos) – mažiau trajektorijų iškraipymų.
- Sumažintos išlaidos (pvz., degalai ir (arba) laikas).
- Mažesnis oro užterštumas.
- Didesnis pajėgumas (lengviau valdyti srautą skrydžių vadovams).

Oro eismo valdymo sistemos kontroliuoja ir valdo oro erdvę, kad sukurtų orlaivių seką, kuria tikimasi, orlaiviai atvykų į susijungimo tašką. Todėl orlaiviams yra priskirsti laikai pagal sąrašą, kurio orlaivis turi laikytis ir atvykti į susijungimo tašką nustatytu laiku. 2.1 paveiksle parodyta tipinė daugelio orlaivių, esančių prieigų zonoje seka, kurią valdo eismo valdymo sistemos.



2.1 pav. Orlaivių eiliškumo seka oro uoste (Autorius 2019)

Kaip parodyta 2.1 paveiksle, lėktuvas atvyksta į skirtingus susijungimo taškus (pvz., pradinio artėjimo taškas (IAF)) prieš atlikdamas posūkį į kilimo ir tūpimo taką. Kiekvienas orlaivis yra įtrauktas į seką, priskiriant laiko ribas, skirtas atvykti į nurodytą tašką. Todėl kiekvienas orlaivis turi atlikti atitinkamus orlaivio valdymo parametrų pakeitimus, kad atvyktų reikiamu laiku.

2.1. Trajektorijos ir orlaivio parametrų įvertinimas

Nuo pakilimo iki nutūpimo orlaivis skrenda trajektorija, keisdamas aukštį, skrydžio kryptį ir greitį. Kai orlaivis seka trajektoriją, galima gauti kai kuriuos parametrus, kurie apibrėžia šį veiksmą. Pavyzdžiui, galima išmatuoti atstumą tarp dviejų taškų, vidutinį orlaivio skridimo greitį, orlaivio kursą, kad pasiektų galutinį tašką, taip pat apskaičiuojant laiką, kada orlaivis atsidurs tam tikrame taške.

Tokiu būdu galima ne tik stebėti šią informaciją, tačiau ir pasikeitus trajektorijai apskaičiuoti naujus parametrus. I4D trajektorijos tikslas viso skrydžio metu – atnaujinti skrydžio duomenis perskaičiuojant ir stebint kaip keičiasi atvykimo laikas. Tai pasiekiama naudojant matematines lygtis, aprašytomis toliau pateiktuose poskyriuose.

2.1.1. Atstumo tarp dviejų taškų skaičiavimas

Atstumo vertinimas laikomas vienu iš svarbiausių navigacijos ir trajektorijos prognozavimo parametrų. Haversino formulė suteikia skaičiavimams paprastumą ir yra naudojama navigacijos tikslais. Lygtis užtikrina trumpiausią atstumą tarp dviejų taškų, esančių sferoje, ir dažnai naudojama navigacijos tikslais dėl pakankamai didelio tikslumo esant mažiems atstumams. Dėl to ji tampa naudinga keturių matmenų tikslumo trajektorijoms įvertinti. Konstantos ir funkcijos, naudojamos Haversino lygtyje, pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Konstantos ir funkcijos, naudojamos Haversino lygtyje

Elementai	**Apibrėžimas**
$atan2$	Arktangentiškos funkcijos su dviem argumentais (skaičiavimo funkcija).
$R = 6371\ kms$	Žemės spindulys.

Haversino formulė skaičiuoja atstumą tarp dviejų taškų sferoje, atsižvelgiant į jų ilgumą ir platumą. Norint lengviau suprasti, ši lygtis gali būti suskirstyta į tris pagrindinius elementus, nurodytus toliau. Šią formulę dažnai naudoja navigacijoje, dėl jos tikslumo mažiems atstumams (Sinnott, 1984).

Pusės stygos ilgio, tarp dviejų taškų kvadratas, išreikštas:

$$a = sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) + cos\Phi_1 \cdot cos\Phi_2 \cdot sin^2\left(\frac{\Delta\Lambda}{2}\right) \tag{2.1}$$

čia: Φ − taško ilguma radianais;

Λ – taško platuma radianais;

$\Delta\Phi$ − kampinis atstumas tarp dviejų taškų radianais;

$\Delta\Lambda$ − skirtumas tarp dviejų taškų platumų radianais.

Kampinis atstumas, išreikštas (radianais):

$$c = 2atan2\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \tag{2.2}$$

Ortodrominis atstumas, išreikštas (kilometrais):

$$d = R \cdot c \tag{2.3}$$

2.1.2. Laiko nustatymas

Laikas, kurį orlaivis praleidžia judėdamas iš pradinio taško išreikšto ilguma, platuma į galutinį tašką, išreikštą ilguma, platuma, gali būti apskaičiuojamas žemiau pateikta formule:

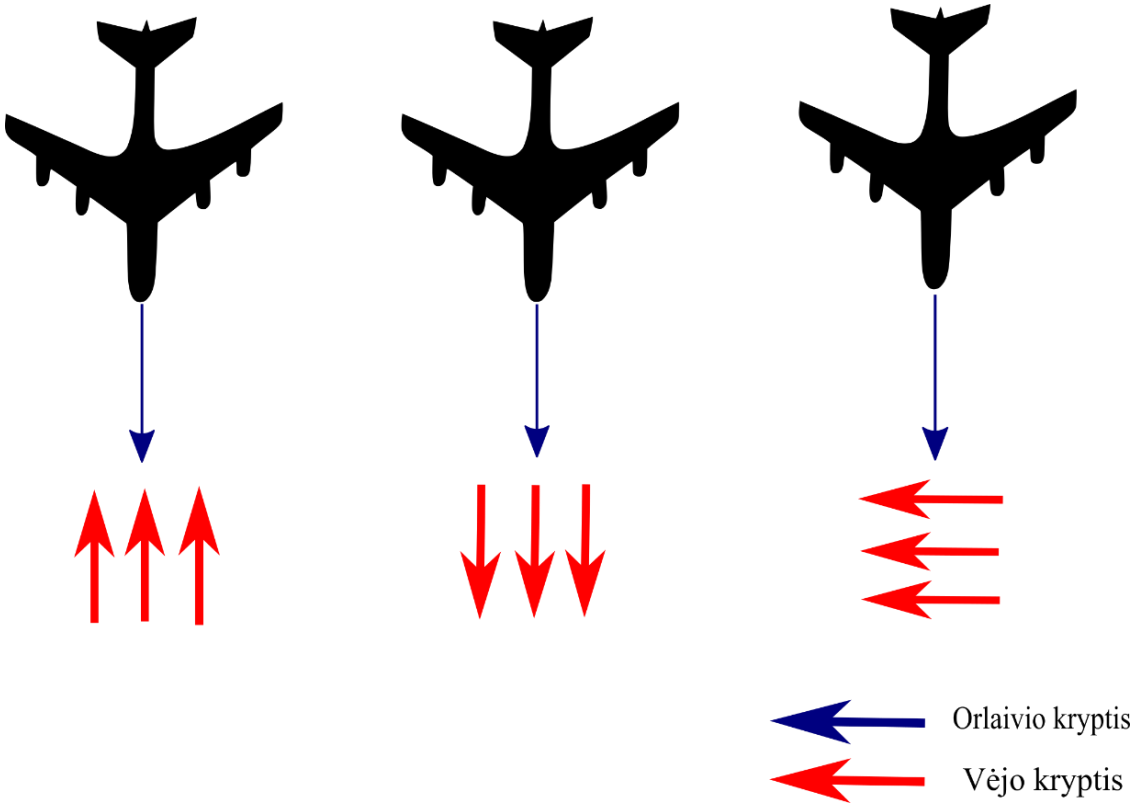
$$t = \frac{1}{\beta} \int_{x1}^{x2} \frac{\partial x}{V_a} \tag{2.4}$$

čia: β – mazgų į pėdas per sekundę keitimo faktorius;

V_a – orlaivio tikrasis greitis (angl. *True airspeed*) tam tikrame aukštyje.

2.1.3. Vėjo įtaka trajektorijai

Labai svarbus elementas, į kurį vertėtų atsižvelgti apskaičiuojant laiką, yra maršruto kelyje vyraujantis vėjas. Vėjas sukelia žymų orlaivio skridimo greičio pasikeitimą ir tai, gali turėti įtakos, atvykimo laiko įvertinimui. Dažnai skirtinguose maršruto taškuose vėjo stiprumas bei kryptis gali skirtis, dėl šios priežasties įmanomas variantas kai vėjas bendrai skridai neturi didelės įtakos. Priklausomai nuo orlaivio skrydžio krypties ir vėjo krypties, orlaivis gali skristi prieš vėją arba pavėjui. Šoninis vėjas taip pat turi įtakos orlaivio skridimo trajektorijai. Stiprus šoninis vėjas gali iškreipti orlaivio skrydžio trajektoriją, prailginant jos distanciją. Toks procesas vadinamas vėjo poslinkiu.



2.2 pav. Trys skirtingos vėjo kryptys orlaivio atžvilgiu (Autorius 2019)

Vėjo poslinkis tai vėjo greičio ir skridimo krypties pasikeitimas per nedidelį laiko tarpą arba atstumą. Lėktuvui toks poslinkis yra žalingas ar net galimai pavojingas pakilimo ir nusileidimo metu, kai lėktuvo manevravimas yra labai apribotas mažo greičio. Dėl vėjo poslinkio, orlaivis sunaudoja daugiau nei įprasta resursų norint, išlaikant užduotą skrydžio trajektoriją. Tai neigiamai gali paveikti bepiločio orlaivio atvykimo laiką i tašką, netgi sutrumpinti įprastinį orlaivio iškybojimo ore laiką. Trys pagrindinės vėjo kryptys orlaivio atžvilgiu pavaizduotos 2.2 paveiksle. Nugarinis vėjas gali turėti teigiamo poveikio, dėl jo orlaivio skridimo laikas sutrumpėja dėl padidėjusio tikrojo greičio (angl. TAS). Taipogi galimai pagerėja orlaivio efektyvumas ar sunaudojamas kuras. Skridimas prieš vėją, padidina orlaivio atvykimo į tam tikrą tašką, laiką dėl mažesnio greičio. Taip pat toks vėjas

padidina sąnaudas, kurios skrendant ilgą maršrutą, tampa labai aktualios. Todėl planuojant ilgesnius maršrutus būtina atsižvelgti į pakeliui vyraujančius vėjus, kad būtų galima numatyti skrydžio laiko paklaidas.

Vėjo įtakos skaičiavimams naudojamos formulės pateikiamos žemiau. Kad lengviau suprasti 2.3 lentelėje, su paaiškinimais pateikiamos konstantos ir dėmenys naudojami šioms formulėms.

2.3 lentelė. Vėjo įtakos skaičiavimams naudojami dėmenys

Konstantos ir dėmenys	**Aprašymas**
V_W	Vėjo greitis nurodytame aukštyje.
H_W	Vėjo kryptis nurodytame aukštyje.
δ	Magnetinės šiaurės į tikrąją šiaurę keitimo faktorius.
B	Orlaivio nuokrypis nuo tiesaus maršruto.

Vėjo įtaka horizontalioje plokštumoje gali būti apskaičiuojama taip:

$$W = V_w(z_c) \cdot \cos(|B(z_c) - H_w(z_c) \pm \delta|) \tag{2.5}$$

Naudojant ankščiau pateiktas lygtis 2.5 į 2.6, gauta lygtis apskaičiuoti, orlaivio skrydžio tarp pradinio taško ir galutinio taško su nuolatiniu greičiu, laiką:

$$t = \frac{1}{\beta} \int_{x1}^{x2} \frac{\partial x}{V_a(z_c) + \{V_w(z_c) \cdot \cos(|B(z_c) - H_w(z_c) \pm \delta|)} \tag{2.6}$$

Integruojant 2.7 formulę gaunama išraiška, pagal kurią galima apskaičiuoti skrydžio laiką su vėjo efektu:

$$t = \frac{1}{\beta} \frac{[x_2 - x_1]}{V_a(z_c) + \{V_w(z_c) \cdot \cos(|B(z_c) - H_w(z_c) \pm \delta|)} \tag{2.7}$$

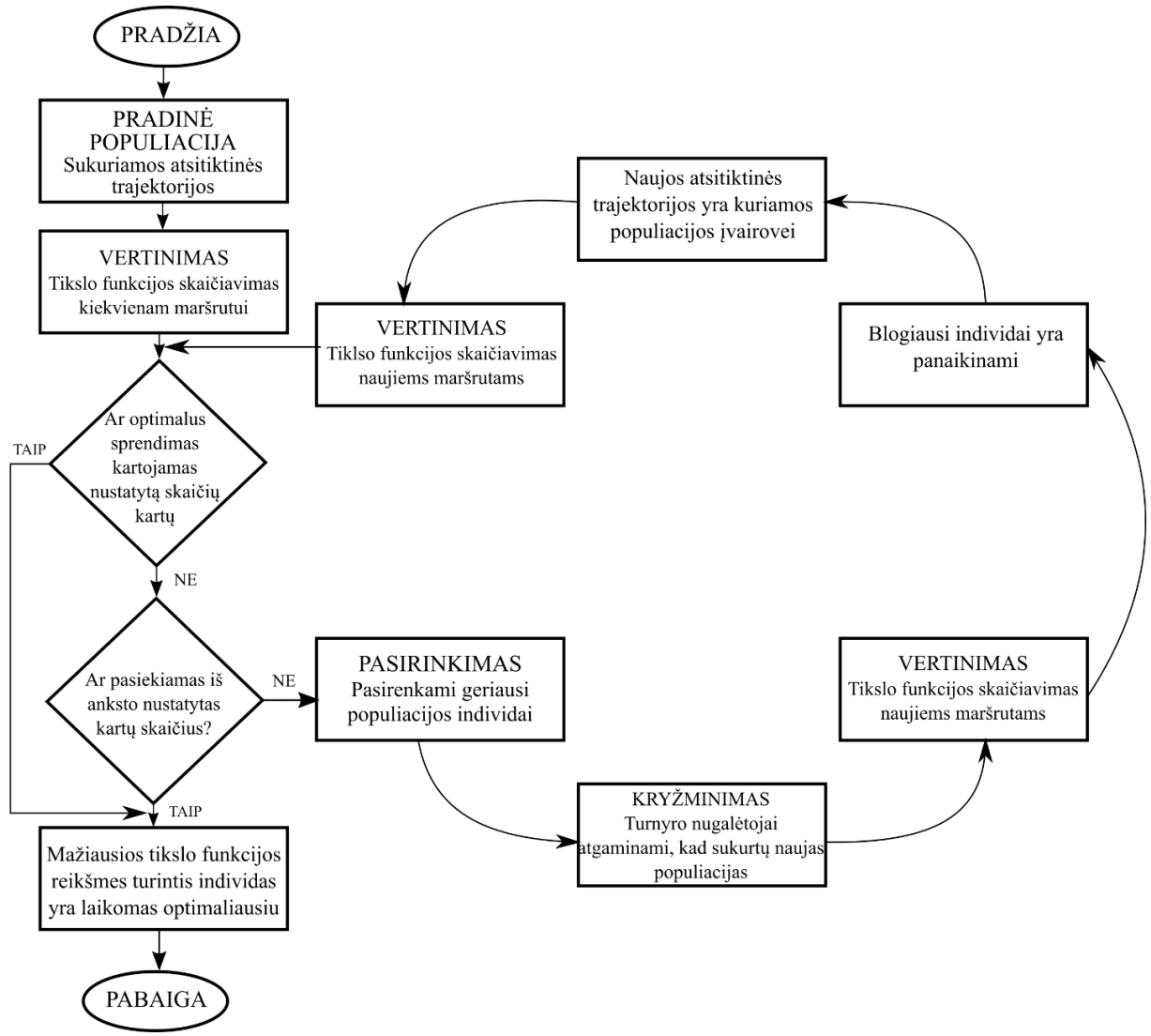
Vertėtų paminėti, kad ši lygtis gali būti naudojama norint įvertinti minimalų laiką, per kurį orlaivis gali skristi nuo pradinio taško iki galutinio taško kruiziniame greityje. Taip pat iš šios lygties galima išsireikšti ir kitus dydžius, tokius kaip orlaivio greitis reikalingas pasiekti galutinį tašką nustatytu laiku, ar net gi išėmus iš lygties išraišką [$x_2 - x_1$], apskaičiuoti nuskrietą atstumą tam tikru laiko momentu.

Tai yra svarbi lygtis, kurią vertėtų įsiminti, kad suprasti 4D trajektorijų parametrų skaičiavimus.

2.2. Trajektorijos optimizavimas taikant genetinius algoritmus

Siekiant sumažinti skrydžio kainą, siūlomas trajektorijų optimizavimo algoritmas analizuojant alternatyvias trajektorijas, kuriose atsižvelgiama į meteorologines sąlygas ir orlaivio skrydžio parametrus. Paprastai prieš kiekvieną skrydį skrydžio trajektorijas planuoja dideli antžeminiai kompiuteriai, kuriuose atsižvelgiama į skrydžių valdymo centrų nustatytus apribojimus. Į šias trajektorijas įeina dabartinis eismas, oro sąlygos, orlaivio svoris ir oro linijų veiklos sąnaudos. Tačiau dėl besikeičiančių oro sąlygų ir eismo sąlygų skrydžio metu šios trajektorijos gali nebūti optimalios skrydžio išlaidoms. Šiame darbe pateiktas optimizavimo algoritmas gali būti naudojamas kaip skaičiavimo metodas, nes jis apima informaciją apie orą ir apribojimus galima nustatyti rankiniu būdu. Šiame darbe pateiktas algoritmas sukurtas naudojant genetinius-evoliucinius algoritmus Python programinėje aplinkoje.

Trajektorijų optimizavimo algoritmas naudojamas skaičiavimų skaičiui sumažinti, kad jį būtų galima įdiegti faktinėje skrydžių valdymo sistemoje. Skrydžių valdymo sistema neturi tokių pačių duomenų apdorojimo galimybių kaip ir antžeminiai kompiuteriai, kurie planuoja trajektorijas prieš skrydį. Tai reiškia, kad skaičiavimo laikas turi būti kuo labiau sumažintas. Tinklo viduje galimų alternatyvių trajektorijų skaičius didėja geometrine progresija, didėjant pasirinkimų skaičiui. Apskaičiuojant visas galimas alternatyvias trajektorijas yra ne tik nepraktiška, bet ir užima labai daug laiko. Todėl, siekiant sumažinti skaičiavimo laiką, buvo naudojamas genetinis algoritmas. Genetiniai algoritmai buvo atrinkti, nes jie įrodė savo gebėjimą išspręsti problemas, kai netiesiniai duomenys analizuojami per trumpą skaičiavimo laiką. Šie algoritmai grindžiami geriausių sugeneruotoje populiacijoje esančių individų atrinkimu ir kryžminimu. Genetiniai algoritmai imituoja natūralų evoliucijos procesą: pradedant nuo pradinės populiacijos, grupė individų, atrinktų pagal jų tinkamumą, sudarys antrąją individų kartą. Šis procesas kartojamas iš anksto numatytą skaičių arba tol, kol randamas optimalus sprendimas. Genetiniai algoritmai apima šiuos veiksmus: individų apibrėžimą, pradinės populiacijos kūrimą, individų vertinimo tikslo funkciją, geriausių individų populiacijoje atranką ir atrankos procesų nutraukimo sąlygas. Visas individų atrankos ir vertinimo procesas paaiškinamas 2.3 paveikslėlyje.



2.3 pav. Genetinio algoritmo schema, naudojama optimizuojant skrydžio trajektorijas (išversta pagal Patrón R. S. F., Botez R. M. 2015)

- **Individai ir pradinė populiacija**

Kiekvienas individas yra apibrėžiamas kaip atsitiktinai sukurta skrydžio maršruto trajektorija. Šias trajektorijas sudaro kelio taškų rinkinys, apibrėžtas pagal platumą, ilgumą, aukštį ir oro sąlygas. Šios alternatyvios trajektorijos sukuriamos, atsižvelgiant į anksčiau apibrėžtą tinklelį, o visos platumos, ilgumos, aukščiai bei oro sąlygos turi būti tinklelyje. 2.4 lentelėje aprašomi sukurti individai. Priklausomai nuo tinklo dydžio gali būti tūkstančiai ar milijonai galimų trajektorijų. Pradinė populiacija turėtų sudaryti nedidelę visų galimų sprendimų dalį. Pradinės populiacijos dydis nustatomas, atsižvelgiant į visą galimų sprendimų skaičių.

2.4 lentelė. Algoritmo parametrai (apatinis indeksas rodo elemento vietą matricoje)

Individas	Taškas 1	Taškas 2	Taškas 3	Taškas 4	...	Taškas n
	Platuma $_{1,1}$	Platuma $_{1,2}$	Platuma $_{1,3}$	Platuma $_{1,4}$		Platuma $_{1,n}$
1	Ilguma $_{1,1}$	Ilguma $_{1,2}$	Ilguma $_{1,3}$	Ilguma $_{1,4}$	...	Ilguma $_{1,n}$
	Aukštis $_{1,1}$	Aukštis $_{1,2}$	Aukštis $_{1,3}$	Aukštis $_{1,4}$		Aukštis $_{1,n}$
	Platuma $_{2,1}$	Platuma $_{2,2}$	Platuma $_{2,3}$	Platuma $_{2,4}$		Platuma $_{2,n}$
2	Ilguma $_{2,1}$	Ilguma $_{2,2}$	Ilguma $_{2,3}$	Ilguma $_{2,4}$	...	Ilguma $_{2,n}$
	Aukštis $_{2,1}$	Aukštis $_{2,2}$	Aukštis $_{2,3}$	Aukštis $_{2,4}$		Aukštis $_{2,n}$
...	...	...	...	...	...	...
	Platuma $_{m,1}$	Platuma $_{m,2}$	Platuma $_{m,3}$	Platuma $_{m,4}$		Platuma $_{m,n}$
m	Ilguma $_{m,1}$	Ilguma $_{m,2}$	Ilguma $_{m,3}$	Ilguma $_{m,4}$	...	Ilguma $_{m,n}$
	Aukštis $_{m,1}$	Aukštis $_{m,2}$	Aukštis $_{m,3}$	Aukštis $_{m,4}$		Aukštis $_{m,n}$

- **Vertinimas**

Vertinimo procesas apima kiekvieno trajektorijos skrydžio tikslo funkcijos apskaičiavimą. Tikslo funkciją sudaro šie parametrai: 1) koordinatės (platumos ir ilgumos); 2) aukštis kiekviename maršruto taške; 3) orlaivio greitis; 4) dalinė skrydžio kaina, sudegintas kuras ir skrydžio laikas (kiekviename maršruto taške); 5) vėjo greitis, kryptis; Geriausias individas apibrėžiamas kaip skrydžio trajektorija, su kuria tikslo funkcija yra maksimali.

- **Pasirinkimas**

Remiantis Darvino evoliucijos teorija, geriausi individai yra tie, kurie ilgiausiai išgyvena ir turi daugiau galimybių atgaminti ir išsaugoti savo genetinį kodą. Tai nereiškia, kad individai, kurių tikslo funkcija mažesnė negali būti būsimų kartų dalimi; jie didina variaciją populiacijoje. Šis aspektas leidžia efektyviau išvengti lokalaus minimumo ir pasiekti globalų tikslo funkcijos optimumą.

Individų atranka vykdoma turnyro metodu leidžia individams konkuruoti tarpusavyje ir išsaugoti tą, kurio tikslo funkcija yra didžiausia, tačiau asmenys, kurių tikslo funkcija mažesnė, turi mažesnę tikimybę būti atrinkti, o tai leidžia greičiau konverguoti į globalų optimumą.

- **Kryžminimas**

Kiekvienai kryžminimo operacijai atrenkami du individai. Jeigu po kryžminimo sukurto naujo individo tikslo funkcija yra geresnė nei blogiausio populaicijos individo, jis jį pakeičia. Kadangi stipriausi individai kryžminasi vienas su kitu, kiekvieno raundo metu tikimasi, kad bus sukurtas geresnis individas nei prieš kryžminimą. Kiekviena trajektorija, kaip minėta anksčiau, nurodoma kelio taškų rinkiniu, apibrėžtu pagal platumą, ilgumą, aukštį ir oro sąlygas. Kryžminimo metodas buvo naudojamas naujam asmeniui sukurti. Naujų individų sukūrimas parodytas 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Naujų individų sukurimas

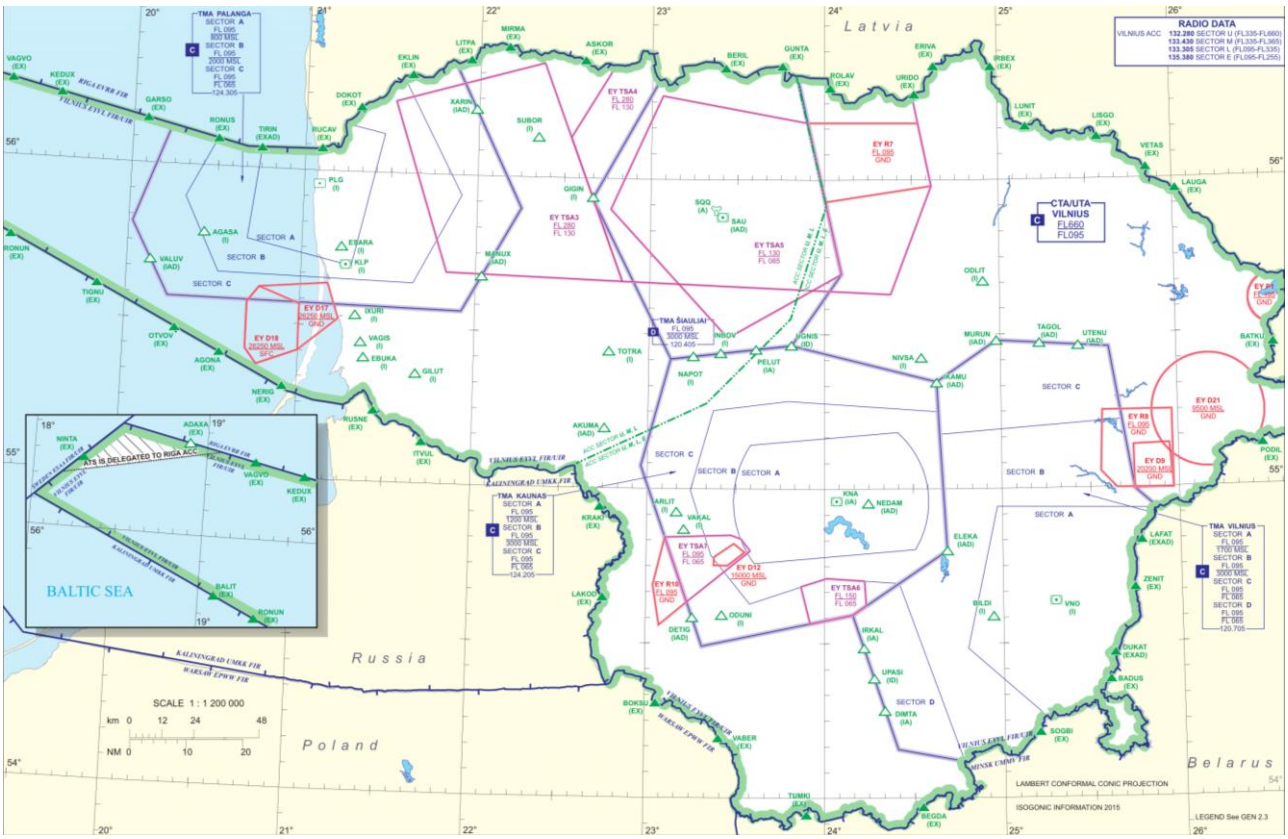
	Pradinė individų populiacija					
1 individas	Platuma $_{1,1}$ Ilguma $_{1,1}$ Aukštis $_{1,1}$	Platuma $_{1,2}$ Ilguma $_{1,2}$ Aukštis $_{1,2}$	Platuma $_{1,3}$ Ilguma $_{1,3}$ Aukštis $_{1,3}$	Platuma $_{1,4}$ Ilguma $_{1,4}$ Aukštis $_{1,4}$	Platuma $_{1,5}$ Ilguma $_{1,5}$ Aukštis $_{1,5}$	Platuma $_{1,6}$ Ilguma $_{1,6}$ Aukštis $_{1,6}$
2 individas	Platuma $_{2,1}$ Ilguma $_{2,1}$ Aukštis $_{2,1}$	Platuma $_{2,2}$ Ilguma $_{2,2}$ Aukštis $_{2,2}$	Platuma $_{2,3}$ Ilguma $_{2,3}$ Aukštis $_{2,3}$	Platuma $_{2,4}$ Ilguma $_{2,4}$ Aukštis $_{2,4}$	Platuma $_{2,5}$ Ilguma $_{2,5}$ Aukštis $_{2,5}$	Platuma $_{2,6}$ Ilguma $_{2,6}$ Aukštis $_{2,6}$
Naujas individas	Platuma $_{1,1}$ Ilguma $_{1,1}$ Aukštis $_{1,1}$	Platuma $_{1,2}$ Ilguma $_{1,2}$ Aukštis $_{1,2}$	Platuma $_{1,3}$ Ilguma $_{1,3}$ Aukštis $_{1,3}$	Platuma $_{2,4}$ Ilguma $_{2,4}$ Aukštis $_{2,4}$	Platuma $_{2,5}$ Ilguma $_{2,5}$ Aukštis $_{2,5}$	Platuma $_{2,6}$ Ilguma $_{2,6}$ Aukštis $_{2,6}$

Procesas kartojamas tol, kol pasiekiamas iš anksto nustatytas kartų skaičius, arba tol, kol optimalus sprendimas pasikartoja keletis kartus .Genetinis algoritmas baigiamas kai pasiekiamas sustabdymo kriterijus.

2.3 Laisvųjų maršrutų oro erdvė

Laisvų maršrutų oro erdvė – tai apibrėžta oro erdvė, kurioje naudotojai gali laisvai planuoti savo maršrutus nuo apibrėžto pakilimo iki nusileidimo punktų ir, jei yra galimybių, jiems nereikia dėl to kreiptis į oro eismo paslaugų maršrutų tinklą. Šioje oro erdvėje skrydžiams taip pat taikomi skrydžių valdymo reikalavimai.

Lietuvos laisvų maršrutų oro erdve (EYSFRA) galima naudotis 24 valandas per parą, 7 dienas per savaitę. Vilniaus ACC atsakomybės zoną sudaro oro erdvė, į kurią įeina Vilniaus FIR/UIR šoninės ribos. Vertikalios EYSFRA ribos yra nuo FL 095 iki FL 660. Šiuo metu Lietuvos teritorijoje orlaiviai turi galimybę skristi nustatytomis trasomis arba laisvaisiais maršrutais oro erdvėje, kurioje turi įskristi per atitinkamą įskridimo tašką FRA(E) ir išskristi iš erdvės per atitinkamą išskridimo tašką FRA(X). Naujas oro erdvės modelis, pavaizduotas 2.4 pav., suteikia galimybę kelis kartus naudingiau išnaudoti oro erdvę, sumažina skrydžių vadovų bei pilotų darbo krūvį, padidina saugumo lygį visame regione. Šioje schemoje pavaizduota Lietuvos rajono skrydžių valdymo centro valdoma oro erdvė nuo 95 iki 660 skrydžių lygio. Esant intensyviam oro eismui, atsiranda galimybė išnaudoti laisvus skrydžių lygius, suteikti pilotui leidimą trumpinti savo kelionės maršrutą, taip ne tik išsprendžiant galimą konfliktinę situaciją, bet ir padedant sutaupyti skrydžio laiką, degalus bei sumažinti gamtos taršą. Šis naujas modelis leidžia skrydžių vadovui improvizuoti ne tik galimo konflikto atveju, tačiau ir suderinus su kaimyniniais sektoriais, pasiūlyti pilotams galimus maršruto sutrumpinimus, taip efektyvinant skrydžių valdymo paslaugas.



2.4 pav. Lietuvos maršrutinis žemėlapis – laisvųjų maršrutų oro erdvė (AIP 2019)

Skrydžiai į oro uostus, esančius VILNIAUS FIR/UIR, ir skrydžiai iš tų oro uostų yra tinkami laisvų maršrutų operacijoms vykdyti ir yra planuojami, remiantis toliau nurodytais punktais:

- Jeigu išskrendama iš oro uosto, kuriame yra paskelbtos standartinės išskridimo pagal prietaisus (SID) procedūros, išskrendančių orlaivių skrydžiai planuojami tiesiai nuo SID galutinio maršruto taško iki horizontaliojo išėjimo iš EYSFRA taško.
- Jeigu atskrendama į oro uostą, kuriame yra paskelbtos atskridimo pagal prietaisus (STARs) procedūros arba pereinamosios procedūros, atskrendančių orlaivių skrydžiai planuojami tiesiai nuo horizontaliojo patekimo į EYSFRA taško iki STAR pradinio maršruto taško arba aerodromo radijo navigacinės priemonės.
- SID/STAR procedūros arba pereinamosios procedūros skrydžių maršruto lauke gali būti nežymimos.
- Jeigu nėra paskelbtų STARs procedūrų, skrydžiai planuojami tiesiai nuo horizontaliojo patekimo į EYSFRA taško iki aerodromo radijo navigacinės priemonės.
- Jeigu nėra paskelbtų SIDs procedūrų, skrydžiai planuojami tiesiai nuo aerodromo radijo navigacinės priemonės iki horizontaliojo išskridimo iš EYSFRA taško.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Atlikus teorinę apžvalgą yra išskirtos orlaivių parametrų įvertinimo formulės, kurios padės atlikti orlaivių planavimo analizę kitame skyriuje.
2. Optimalaus orlaivio maršruto pairinkimui analizėje bus naudojamas genetinis algortimas.
3. Dėl plataus pasirinkimo ir laisvės sudarant maršrutus orlaivių maršruto sudarymui bus naudojama laisvųjų maršrutų koncepcija.

3. ORO EISMO SRAUTO PASKIRSTYMO ANALIZĖ IR REZULTATAI

Tyrimo tikslas. Šiuo tiriamuoju darbu siekiama ištirti olaivių atvykimus į Vilniaus tarptautinį oro uostą įprastais maršrutais ir įvedus laiko apribojimus. Šiam tikslui trys maršrutai bus sudaromi panaudojant interneto svetainę *SkyVector.com,* „Phyton“ programavimo kalbą ir naudojant genetinius algortimus surandant optimalią trajektoriją tarp taškų. Tiriamojo darbo rezultatai labiau orientuojami į lyginamąją analizę, kuria siekiama atrasti esminius 4D trajektorijų ir įprastinių maršrutų skirtumus.

Tyrimo sąlygos. Atvykimai vykdomi iš Varšuvos, Rygos ir Minsko oro uostų į Vilniaus oro uostą. Maršrutas prasideda aerodromo navigaciniu tašku iš kurio išskrendama ir laikoma, kad jame orlaivis yra savo kruziniame aukštyje ir tęsia kilimą laisvųjų maršrutų oro erdvėje į kitą tašką. Atskrendančių orlaivių skrydžiai Lietuvoje planuojami tiesiai nuo horizontaliojo patekimo į EYSFRA tašką iki STAR pradinio maršruto taško laikantis aukščio ir greičio apribojimų. Toliau bus vykdomi standartiniai ILS užėjimai tūpti 19 taku.

Tyrimo metodika. Simuliacijos metodu atliekami orlaivių skrydžiai iš Varšuvos, Rygos, Talino ir Minsko oro uostų. Skaičiavimams naudojami ilgumos, platumos, aukščio ir laiko duomenys.

Tyrimo eigą galima suskirstyti į šiuos etapus:

a) maršrutų duomenų (ilguma, platuma, aukštis ir laikas) paruošimas ir surinkimas;
b) skrydžių maršrutų duomenų įvedimas į programą;
c) optimalaus maršruto ir atvykimo laiko skaičiavimas;
d) kliūčių orlaivių maršrutuose sudarymas;
e) atvykimo laiko priskyrimas orlaiviams;
f) surenkami ir analizuojami maršrutų simuliacijos duomenys;
g) pateikiamos išvados ir pasiūlymai.

3.1 Maršrutų sudarymas, atvaizdavimas ir skrydžio parametrų surinkimas

Šiems maršrutams pasirinktas *Bombardier Dash 8 (DHC-8) Q400* serijos orlaivis – tai dviejų turbosraigtinių variklių vidutinio nuotolio orlaivis. 76-ių vietų orlaivis gali nuskristi iki 2 000 kilometrų su vienu kuro baku. Orlaivis dažniausiai naudojamas trumpiems regioniniams maršrutams. 3.1 lentelėje pateikti orlaivio techniniai duomenys.

3.1 lentelė. „Dash 8 - Q400“ orlaivio techniniai duomenys

Gamintojas	**Bombardier**
Modelis	**Dash 8 - Q400**
Spanrų ilgis	28,4 m
Ilgis	32,8 m
Aukštis	8,4 m
Maksimalus kilimo svoris	30481 kg
Kuro talpa	6525 litrai
Maksimalus kruizinis greitis	360 mazgai
Maksimalus atstumas	1100 jūrmylių
Maksimalus skridimo aukštis	Skrydžio lygis 270
Maksimali kilimo sparta	2500 pėdų/min

SkyVector.com svetainėje yra sukurti maršrutai iš Rygos, Varšuvos ir Minsko pagal nustatytas tyrimo sąlygas. Toliau esančiuose 3.2, 3.3, 3.4 lentelėse pateikti maršrutų taškų duomenys.

3.2 lentelė. Maršruto Varšuva-Vilnius taškų duomenys

Taškas	Platuma, º	Ilguma, º
EPWA	N 52°09.95'	E 020°58.03'
VABER	N 54°11.67'	E 023°24.42'
IRKAL	N 54°29.03'	E 024°13.20'
VI401	N 54°36.83'	E 024°50.97'
KOTOV	N 54°48.82'	E 025°03.42'
VI414	N 54°50.26'	E 025°14.47'
VI412	N 54°48.63'	E 025°24.51'
EYVI	N 54°38.22'	E 025°17.27'

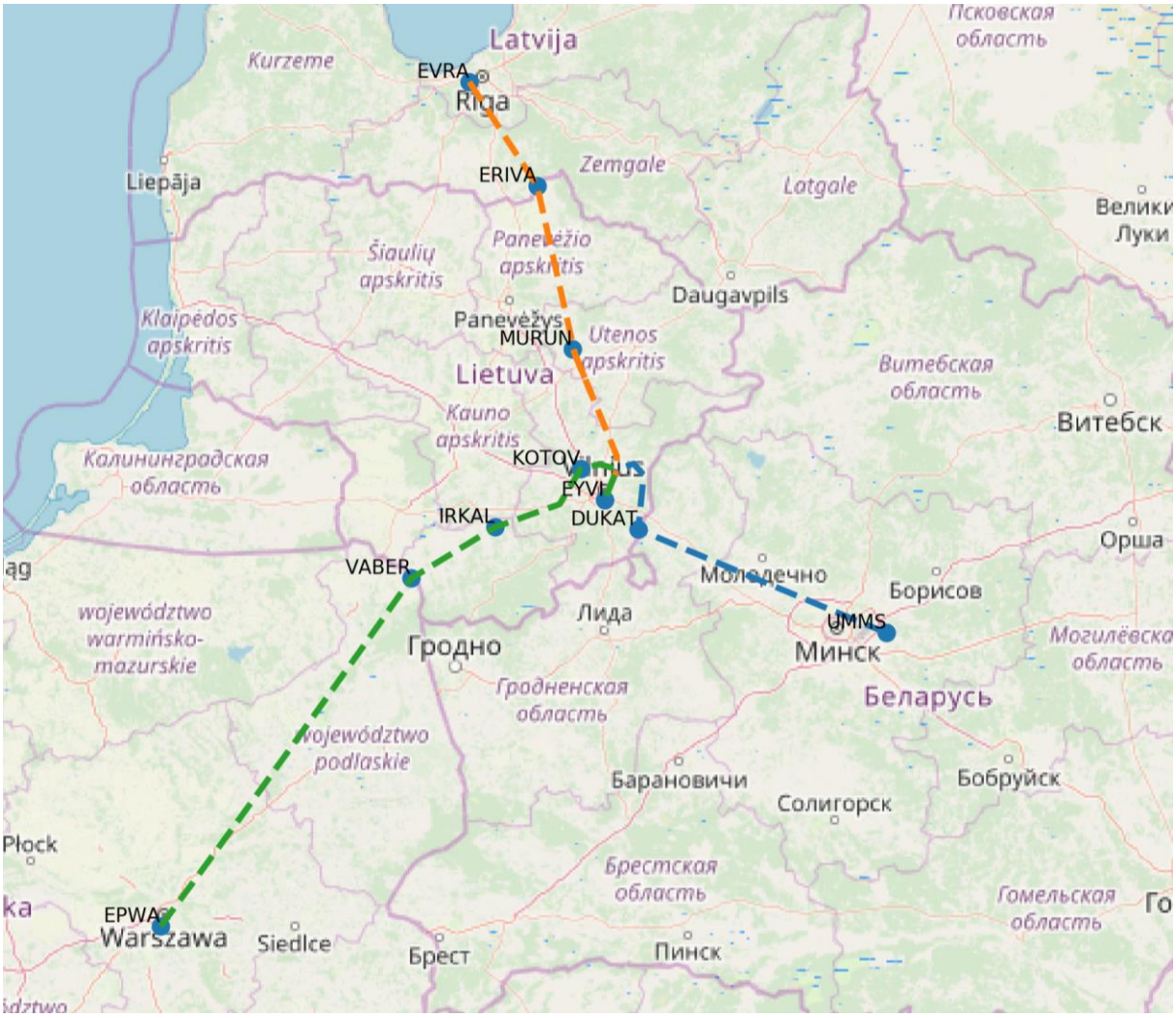
3.3 lentelė. Maršruto Ryga-Vilnius taškų duomenys

Taškas	Platuma, º	Ilguma, º
EVRA	N 56°55.42'	E 023°58.27'
ERIVA	N 56°22.13'	E 024°37.82'
MURUN	N 55°28.78'	E 024°58.67'
VI403	N 55°12.01'	E 025°10.84'
GEKBI	N 54°53.02'	E 025°24.42'
VI412	N 54°48.63'	E 025°24.51'
EYVI	N 54°38.22'	E 025°17.27'

3.4 lentelė. Maršruto Minskas-Vilnius taškų duomenys

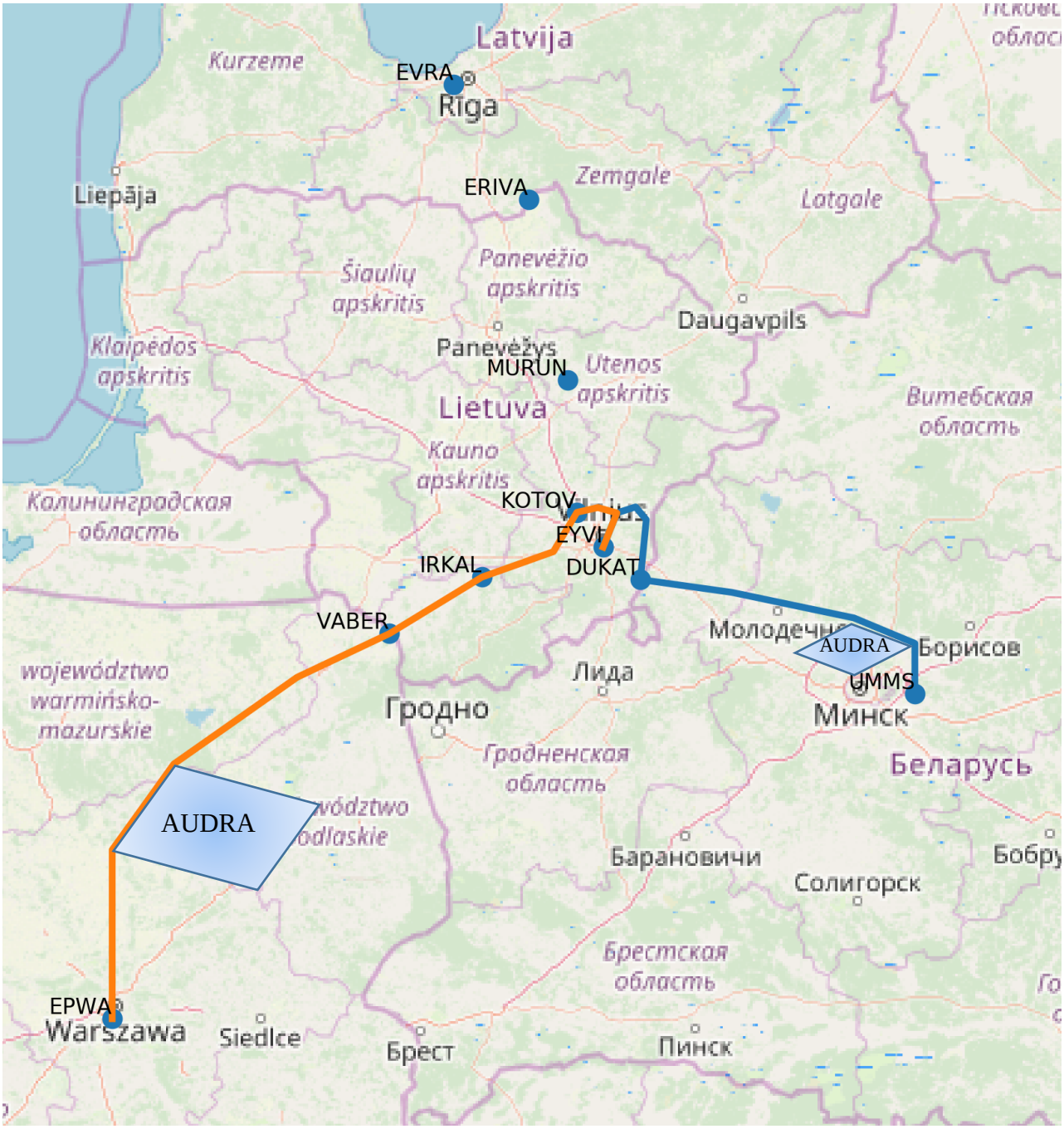
Taškas	Platuma, º	Ilguma, º
UMMS	N 53°52.95'	E 028°01.85'
DUKAT	N 54°28.29'	E 025°36.92'
VI408	N 54°34.27'	E 025°37.93'
VI407	N 54°46.57'	E 025°40.04'
EKSAM	N 54°50.47'	E 025°34.38'
VI412	N 54°48.63'	E 025°24.51'
EYVI	N 54°38.22'	E 025°17.27'

Naudojant genetinį algoritmą sugeneruotas trumpiausias kelias tarp maršruto taškų koordinačių ir parodytas 3.1 paveiksle. Punktyrinė geltona linija rodo skrydžio trajektoriją iš Rygos į Vilnių, mėlyna – iš Minsko į Vilnių, žalia – iš Varšuvos į Vilnių.



3.1. pav. Maršrutai iš Rygos, Varšuvos ir Minsko į Vilnių (Autorius 2019)

Tarp taškų EPWA – VABER ir UMMS – DUKAT yra rankiniu būdu įvesti duomenys ir sugeneruota audra. Programa parodo naują optimalų maršrutą orlaiviams, susidūrusiems su audra (3.2 pav.). Geltona ištisinė linija parodo, kaip audrą apskris orlaiviai iš Varšuvos, mėlyna – iš Minsko.



3.2. pav. Maršrutai iš Varšuvos ir Minsko į Vilnių apskrendant audros debesis (Autorius 2019)

Genetiniu algoritmu sukūrus trys maršrutus apskaičiuotas jų ilgis ir skridimo laikas tarp taškų. Duomenys parodyti 3.5 lentelėje.

3.5. lentelė. Trajektorijų iš EPWA, EVRA ir UMMS duomenys

Taškai	Greitis, kt	Kelio atstumas, km	Kelio laikas, min
EPWA–EYVI			
EPWA–VABER	280	277,783	32,14
VABER–IRKAL	280	61,679	7,14
IRKAL–VI401	280	43,048	4,98
VI401–KOTOV	250	25,883	3,35
KOTOV–VI414	200	12,082	1,96
VI414–VI412	180	11,124	2,00
VI412–EYVI	120	20,767	5,61
EVRA–EYVI			
EVRA–ERIVA	280	234,334	27,11
ERIVA–MURUN	280	33,583	4,35
MURUN–VI403	250	37,990	6,15
VI403–GEKBI	200	8,127	1,46
GEKBI–VI412	180	20,767	5,61
VI412–EYVI	120	33,583	4,35
UMMS–EYVI			
UMMS–DUKAT	280	170,115	19,68
DUKAT–VI408	250	11,123	1,44
VI408–VI407	250	22,882	2,97
VI407–EKSAM	200	9,412	1,52
EKSAM–VI412	180	11,063	1,99
VI412–EYVI	120	20,767	5,61

Skrydžiams iš Varšuvos ir Minsko tam tikriems orlaiviams bus įvedama kliūtis – audra. 3.6 lentelėje pateikti trajetorijos duomenys tarp taškų, kur orlaiviai apskridinės audrą.

3.6. lentelė. Trajektorijų, tarp kurių yra audra, duomenys.

Taškai	Greitis, kt	Kelio atstumas, km	Kelio laikas, min
EPWA–EYVI			
EPWA–VABER	280	307,515	35,58
UMMS–EYVI			
UMMS–DUKAT	280	190,391	22,03

Simuliuojama situacija, kad iš oro uostų orlaiviai pakyla nurodytais laikais. 3.7 lentelėje jie išdėstyti pagal pakilimo laiko seką. Rygos lėktuvai pateikiami su registracija YL, Varšuvos – SP, Minsko – EW. Orlaiviams, kurių maršrutuose bus audros debesys, lentelės stulpelyje „Audra“ pažymėti žvaigždute (*).

3.7. lentelė. Orlaivių išvykimo ir atvykimo laikai

Nr.	Išvykimo aerodromas	Orlaivis	Išvykimo laikas	Atvykimo laikas	Audra
1	Lenkija	SP-001	12:48:00	13:48:37	*
2		SP-002	12:53:00	13:53:37	*
3		SP-003	12:55:00	13:52:11	
4		SP-004	12:59:00	13:56:11	
5		SP-005	13:03:00	14:00:11	
6	Riga	YL-003	13:08:00	13:52:41	
7		YL-004	13:20:00	14:04:41	
8		YL-005	13:24:00	14:08:41	
9	Minskas	EW-001	13:06:30	13:42:03	*
10		EW-002	13:09:30	13:45:03	*
11		EW-003	13:38:00	14:11:43	
12		EW-004	13:42:30	14:15:13	
13		EW-005	13:44:30	14:17:43	

Vilniaus oro uoste yra sukurti nustatyti atvykimo laikai (kas dvi minutes).Toks laikas yra parinktas minimalaus Vilniaus oro uosto pralaidumo ir tarp orlaivitakoyra parodyti 3.8 lentelėje.

3.8. lentelė. Nustatytas atvykimo laikas į Vilnių

Nr.	Nustatytas atvykimo laikas
1	13:42:00
2	13:45:00
3	13:48:00
4	13:51:00
5	13:54:00
6	13:57:00
7	14:00:00
8	14:03:00
9	14:06:00
10	14:09:00
11	14:12:00
12	14:15:00
13	14:18:00
14	14:21:00

Orlaiviai turi keisti savo atvykimo eilę ir greitį, siekiant užtikrinti nepertraukiamą orlaivių priėmimą ir išvengti atvykimo delsos. Pirmas žingsnis – kadangi dalis orlaivių apskrenda audros debesį, tai orlaiviai išrikiuojami pagal atvykimo laiką eilės tvarka (3.9 lentelė).

3.9. lentelė. Orlaivių išvykimo ir atvykimo laikai pagal eilės tvarką

Nr.	Orlaivis	Išvykimo laikas	Atvykimo laikas	Audra
9	EW-001	13:06:30	13:42:03	*
10	EW-002	13:09:30	13:45:03	*
1	SP-001	12:48:00	13:48:37	*
3	SP-003	12:55:00	13:52:11	
6	YL-003	13:08:00	13:52:41	
2	SP-002	12:53:00	13:53:37	*
4	SP-004	12:59:00	13:56:11	
5	SP-005	13:03:00	14:00:11	
7	YL-004	13:20:00	14:04:41	
8	YL-005	13:24:00	14:08:41	
11	EW-003	13:38:00	14:11:43	
12	EW-004	13:42:30	14:15:13	
13	EW-005	13:44:30	14:17:43	

Toliau (3.10 lentelė) apskaičiuojamas laiko skirtumas sekundėmis tarp apskaičiuojamo atvykimo laiko ir nustatyto atvykimo laiko (RTA). Jeigu skirtumas, neigiamas, tai reikia didinti greitį, jeigu teigiamas – mažinti.

3.10. lentelė. Orlaivių atvykimo laiko skirtumus tarp nustatyto laiko

Nr.	Orlaiviai	Skaičiuojamas atvykimo laikas	Nustatytas atvykimo laikas	Skirtumas, s
9	EW-001	13:42:03	13:42:00	- 4
10	EW-002	13:45:03	13:45:00	- 4
1	SP-001	13:48:37	13:48:00	- 38
3	SP-003	13:52:11	13:51:00	- 71
6	YL-003	13:52:41	13:54:00	78
2	SP-002	13:53:37	13:57:00	202
4	SP-004	13:56:11	14:00:00	229
5	SP-005	14:00:11	14:03:00	169
7	YL-004	14:04:41	14:06:00	78
8	YL-005	14:08:41	14:09:00	18
11	EW-003	14:11:43	14:12:00	17
12	EW-004	14:15:13	14:15:00	-13
13	EW-005	14:17:43	14:18:00	17

Apskaičiuojamas greitis, kuriuo orlaivis turi skristi iki Lietuvos teritorijos, kad spėtų laiku į nustatytą atvykimo laiką ir parodomas 3.11 lentelėje.

3.11. lentelė. Naujas orlaivių greitis

Nr.	Orlaivis	Kruizinis greitis	Skirtumas, s	Naujas greitis, kt
9	EW-001	280	- 4	285
10	EW-002	280	- 4	285
1	EW-003	280	- 38	285
3	EW-004	280	- 71	291
6	SP-001	280	78	263
2	YL-003	280	202	256
4	YL-004	280	229	250
5	EW-005	280	169	257
7	SP-003	280	78	263
8	SP-002	280	18	276
11	YL-005	280	17	261
12	SP-004	280	-13	297
13	SP-005	280	17	261

3.11 lentelėje matyti, kad greičio pokytis yra nedidelis, daugiausiai vienam iš orlaivių reikia sumažinti greitį 30 mazgų, tai yra 10 % mažiau jo kruizinio greičio. Orlaiviai iki Lietuvos oro erdvės laikantis naujų greičių atvyks tiksliai į nustatytą atvykimo laiką Vilniuje ir be papildomų užlaikymų galės sėkmingai nutūpti.

3.2 Rezultatų palyginimai ir išvados

Orlaiviams priskyrus jiems nustatytą laiką, kiekvienas orlaivis padidina arba sumažina greitį. Naujųjų greičių pokytis lyginant su nustatytu kruziniu greičiu parodoma procentais 3.12 lentelėje

3.12. lentelė. Orlaivių greičio pokytis.

Nr.	Orlaivis	Kruizinis greitis	Naujas greitis, kt	Skirtumas, kt	Pokytis, %
9	EW-001	280	285	5	1,8
10	EW-002	280	285	5	1,8
1	EW-003	280	285	5	1,8
3	EW-004	280	291	11	3,9
6	SP-001	280	263	-17	-6,1
2	YL-003	280	256	-24	-8,6
4	YL-004	280	250	-30	-10,7
5	EW-005	280	257	-23	-8,2
7	SP-003	280	263	-17	-6,1
8	SP-002	280	276	-4	-1,4
11	YL-005	280	261	-19	-6,8
12	SP-004	280	297	17	6,1
13	SP-005	280	261	-19	-6,8

Pateiktoje lentelėje matoma, YL-004 orlaiviui teko sumažinti greitį 10,7 %, o SP-004 padidinti 6,1 %. Bendras orlaivių greičio pokyčio vidurkis yra 3 % greičio sumažėjimas. Tai parodo, kad toks mažas procentas neturi įtakos orlaivių skrydžio išlaidų, bet leis orlaiviams sklandžiai nutūpti priartėjus oro uostą.

Rezultatams palyginti yra surinkti realių skrydžių laikų duomenys iš Eurokontrolės. 3.13 lentelėje parodyti 2019 m. kovo 15 dienos skrydžiai iš Rygos, Varšuvos bei Minsko. Iš pateiktų duomenų matyti, kad skirtingomis sąlygomis orlaiviai vidutiniškai vėluoja 5 minutėmis. Tai parodo, kad orlaivių skrydžio laiko kontrolę būtina vykdyti, nes tai sumažina orlaivių susidūrimo konfliktų skaičių bei skrydžių vadovo darbą.

3.13. lentelė. Duomenys apie 2019 m. kovo 15 d. skrydžius iš Varšuvos, Rygos ir Minsko

Data	**Maršrutas**	**Skaičiuojamas atvykimo laikas**	**Realus atvykimo laikas**	**Skirtumas, min**
2019-03-15	Ryga–Vilnius	06:12:00	06:19:00	+ 7
		10:56:00	11:03:00	+ 7
		14:11:00	14:24:00	+ 13
		17:01:00	17:11:00	+ 10
		19:17:00	19:30:00	+ 13
		22:11:00	22:26:00	+ 15
	Varšuva–Vilnius	07:57:00	07:51:00	- 06
		10:57:00	10:51:00	- 06
		16:19:00	16:19:00	0
		22:41:00	22:42:00	+ 1
	Minskas–Vilnius	17.10:00	17:14:00	+ 4

Šis tyrimas parodo, kad laiko kontrolė greičiu gali būti labai naudinga esant intensyviam orlaivių eismui oro uostuose. Nustatyto laiko priskyrimas orlaiviams leidžia ne tik atskirsti tiesiai pagal maršrutą, nekeičiant kurso ir nelaukiant laukimo zonoje, bet ir sumažina darbo krūvį skrydžių vadovams.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikta literatūros analizė parodo, kad i4D koncepciją tyrinėja vis daugiau mokslininkų, ji leidžia suvaldyti orlaivių srautą oro uostų prieigų zonose ir sumažinti skrydžio vadovų krūvį. Pastebėta, kad orlaiviams yra iš anskto priskiriamas atvykimo laikas, kurio jie turi laikytis ir atvykti kuo tikslesniu laiku. Šiame darbe bus bandoma atvykimo laikus priskirti skrydžio metu, nes tai leidžia efektyviau atsižvelgti į oro erdvės salygų apribojimus.
2. Sukurtas genetinio algoritmo pagrindu veikiantis orlaivio efektyvaus maršruto planavimas tarp bet kurių taškų pasaulio žemėlapyje ir atsižvelgiant į oro erdvės apribojimus.
3. Sukurtas algoritmas sudarantis orlaivių atvykimo eilę į numatytą oro uostą ir koreguojantis orlaivių greitį, taip išvengiant galimo orlaivio laukimo šalia oro uosto ir orlaivių konfliktų prieigų zonose. Siekiant užtikrinti tikslų orlaivio atvykimą į jo nustatytą atvykimo laiką buvo keičiamas orlaivio greitis, daugiausia orlaiviui teko sumažinti greitį 10,7 %, padidinti 6,1 %. Bendras orlaivių greičio pokyčio vidurkis yra 3 % greičio sumažėjimas. Tai parodo, kad toks mažas procentas neeturi įtakos orlaivių skrydžio išlaidų ir leidžia orlaiviams sklandžiai nutūpti priartėjus oro uostą nesudarant papildomų orlaivių užlaikymų ore.
4. Algoritmas yra viešai prieinamas, todėl jį tobulinti gali ir kiti mokslininkai: https://github.com/wyciokas/GeneticAlgorithmShortestPath/

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Alejo, D.; Cobano, J. A.; Heredia G.; Ollero A. 2013. Collision-Free 4D Trajectory Planning in Unmanned Aerial Vehicles for Assembly and Structure Construction, iš *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 73(4): 783–785.

Amaro Carmona, M. A.; Rudinskas, D.; Barrado, C. 2015. Design of a Flight Management System to Support Four-Dimensional Trajectories, iš *Aviation, Vol. 19, no. 1, Mar. 2015*, 19(1): 58–65

Barnier, N.; Allignol, C. 2009. 4D-trajectory deconfliction through departure time adjustment, iš *USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar* 2009(6578):1–2.

Bolt, M. L.; Steven, J. R.; Corfam D. 2007-08-01. *Method and apparatus for generating a four-dimensional (4D) flight plan.* Arinc Incorporated. Annapolis, JAV patentas Nr. US7925393B2.

Chao H. Y.; Cao Y. C; Chen Y. Q. 2010. Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles, iš *International Journal of Control, Automation, and Systems* 8(1): 36–44.

D. Geister, B. Korn, S. Tittel, C. Edinger, "Operational integration of UAS into the ATM system", AIAA Infotech Aerospace Conference, 2013.

Delgado, L.; Prats. X. 2012.En Route Speed Reduction Concept For Absorbing Air Traffic Flow Management Delays, iš *Journal of aicraft Vol.49,No. 1*, Ispanija, 1-4.

Enea, G.; Porretta, M. 2012. A comparison of 4D-Trajectory operations envisioned for NextGen and SESAR, some preliminary findings [interaktyvus]. [žiurėta 2018 m. rugsėjo 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/310.PDF >

Feigh, K.; Dorneich, M. C.; Whitlow. S.; Rye. J. M. 2008-11-18 *Methods for generating a flight plan for an unmanned aerial vehicle based on a predicted camera path.* JAV patentas Nr. US8010267B2.

Gardi, A.; Sabatini, R.; Kistan, T.; Lim, Y.; Ramasamy, S. 2015. 4 Dimensional trajectory functionalities for air traffic management systems, iš *2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, 1-2.

Gibbs J. M et al. 2003-04-01. *Methods and apparatus for integrating, organizing, and accessing flight planning and other data on multifunction cockpit displays.* JAV patentas Nr. US6542796B1.

Hagelauer, P.; Mora-Camino, F. 2008. A soft dynamic programming approach for on-line aircraft 4D-trajectory optimization, iš *European Journal of Operational Research* 107(1): 87–95.

Hainz E. 2005. Automated Conflict Resolution for Air Traffic Control, iš *31st Digital Avionics Systems Conference*, Kalifornija, 1–3

Harrison, M. J. 2006. ADS-X the Next Gen Approach for the Next Generation Air Transportation System, iš *2006 ieee/aiaa 25TH Digital Avionics Systems Conference, Portlandas, 1–3.*

Honzík B.; Herodes M. 2012. Airborne 4-Dimensional Trajectory Management, iš *31st Digital Avionics Systems Conference,* Brno, 1-11.

ICAO Long Term Traffic Forecasts [interaktyvus]. 2016. ICAO. Prieiga per internetą: <https://www.icao.int/Meetings/aviationdataseminar/Documents/ICAO-Long-Term-Traffic-Forecasts-July-2016.pdf >

Jonge, H. W. G. 2002. An operational concept for Gate-to-Gate 4D flight planning [interaktyvus]. Tulūza. [žiurėta 2018 m. spalio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.65&rep=rep1&type=pdf >

Joulia, A.; Le Tallec C. 2011. Aircraft 4D contract based operation: The 4DCo-GC project, iš *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* 2011(6859): 1–3.

Klooster J. et al. 2008. 4D Trajectory and Time-of-Arrival Control to Enable Continuous Descent Arrivals, iš *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit Honolulu,* , Havajai.

Klooster, J. K.; Del Amo, A.;Manzi, P. 2009. Controlled time-of-arrival flight trials, iš *Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar,* Napa, 1-11

Klooster, J. K.; Smedt, D. D. 2011. Controlled Time-of-Arrival Spacing Analysis [interaktyvus]. Bruselis. [žiurėta 2018 m. rugsėjo 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar9/papers/19-Klooster-Final-Paper-4-14-11.pdf>

Klooster, K. J.; Wichman, D. K. 2008-10-31. *Methods and system for time of arrival control using available speed authority.* General Electric Company, Skenektadis, JAV patentas Nr. US8010267B2.

Kondroška, V. ir Stankūnas, J., 2012. Lietuvos oro erdvės struktūros tobulinimas iš *Aviation*, 16(4): 124–129

Kondroška, V., 2012. Regioninių oro erdvės blokų formavimo remiantis skrydžių srautais metodikos sukūrimas daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 18-19.

Korn B. ir Kuenz A. 2006. 4D FMS for Increasing Efficiency of TMA Operations, iš *2006 ieee/aiaa 25TH Digital Avionics Systems Conference,* Portlandas, 1-8

Lin, CH.; Valley S. 2008-05-19. *4D GIS virtual reality for controlling, monitoring and prediction of manned/unmanned system.* JAV patentas Nr. US8010267B2.

Meserole, J. S.; Moore W. J. 2006. What is System Wide Information Management (SWIM)?, iš *2006 ieee/aiaa 25TH Digital Avionics Systems Conference,* Portlandas, 1-8

Mutuel, L. H.; Neri P.; Paricaud E. 2013. Initial 4D Trajectory Management Concept Evaluation, iš *USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar* 2013(4554): 1–3.

P. H. Kopardekar.2014.Unmanned aerial system (UAS) traffic management (UTM): Enabling low-altitude airspace and UAS operations, NASA.

Patrón R. S. F., Botez R. M. 2015. Flight Trajectory Optimization Through Genetic Algorithms for Lateral and Vertical Integrated Navigation, iš *Journal of aerospace information systems Vol. 12, No. 8* , Kanada, 539

Ramasamy, S, Sabatini, R, Gardi, A. 2015. Novel flight management system for improved safety and sustainability in the CNS+A context, iš *Proceedings of the 15th Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference (ICNS),* Herndon, G3-1-G3-11.

Ramasamy, S.; Sabatini R.; Gardi A.; Kistan T. 2014. Next Generation Flight Management System for Real-Time Trajectory Based Operations, iš *Applied Mechanics and Materials* 1662(629): 344–349.

Ravenscroft, D. L 2008-01-14. *Computing flight plans for UAVs while routing around obstacles having spatial and temporal dimensions.* JAV patentas Nr. US8082102B2.

SESAR.2012. *SESAR Factsheet: I-4D – Flying a New Dimension.Single European Sky Research Team (SESAR).* (01).

Sylvester, T. 2007 06 13. *Method and apparatus for managing flight planning.* The Boeing Company, Čikaga, JAV patentas Nr. US8112186B2.

Sullivan, J. M. 2006. Evolution or revolution? The rise of UAVs,iš *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 25, no. 3, 43–49

Thomas E., Bleeker O. 2015. Options for insertion of RPAS into the Air Traffic System iš *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC),* Praga, 1-14.

Wichman, D. K.; Klooster K. J.; Bleeker F. O.; Rademaker M. R. 2007. Flight validation of downlinked flight management system 4D trajectory, iš *2007 IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference*, Dalasas, 1–10

PRIEDAI

A priedas

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

PAŽYMĖJIMAS

2019 m. balandžio 4 d.
Vilnius

Ilona Kulešo

dalyvavo

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
15-oje respublikinėje konferencijoje „Aviacija 2019“
ir skaitė pranešimą tema
Orlaivių skrydžių planavimo taikant i4D tyrimas

Antano Gustaičio aviacijos instituto dekanas — dr. Justas Nugaras

Konferencijos mokslinio komiteto pirmininkas — doc. dr. Eduardas Lasauskas