VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Rūta Pačebutaitė

# ORLAIVIŲ KONFLIKTINĖS SITUACIJOS SPRENDIMO SAUGAUS IR RACIONALAUS ALGORITMO PARINKIMAS

# SELECTION OF A SAFE AND RATIONAL ALGORITHM FOR AIRCRAFT CONFLICT RESOLUTION

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 6011EX001
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Rūta Pačebutaitė

# ORLAIVIŲ KONFLIKTINĖS SITUACIJOS SPRENDIMO SAUGAUS IR RACIONALAUS ALGORITMO PARINKIMAS

# DETERMINATION OF A SAFE AND RATIONAL ALGORITHM FOR AIRCRAFT CONFLICT RESOLUTION

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 6011EX001
Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

**Vadovė** _____dr. Anrieta Dudoit_____ _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

**Lietuvių kalbos konsultantė**____lekt. Angelika Petrėtienė_____ _____ _____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2024

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
**Antano Gustaičio aviacijos institutas**
**Aviacijos technologijų** katedra

ISNB ISSN

Egz. sk. 1

**Orlaivių pilotavimo** studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Orlaivių konfliktinės situacijos sprendimo saugaus ir racionalaus algoritmo parinkimas**

Autorius **Rūta Pačebutaitė** Vadovė dr. Anrieta Dudoit

**Kalba**

[X] lietuvių

[ ] užsienio

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas dviejų orlaivių konflikto horizontalioje plokštumoje sprendimas, parenkant saugią ir racionalią skrydžio trajektoriją. Literatūros analizėje nagrinėjamos orlaivio skrydžio trajektorijų konflikto aptikimo bei sprendimo priemonės, aprašomi jų privalumai bei trūkumai. Tiriamojoje dalyje pateikiamos tyrimo sąlygos, eiga, matematinis modelis, paremtas Dubinso metodu. Konflikto sprendimui rasti, išsikeliami vertinimo kriterijai konflikto sprendimo algoritmo pateikiamoms trajektorijoms vertinti. Tyrimo metu gauti rezultatai yra lyginami pagal išsikeltus kriterijus, pateikiamos išvados.

Darbą sudaro 4 dalys: įvadas, teorinė dalis, kurioje nagrinėjami orlaivių konfliktų sprendimo būdai, metodinė dalis, kurioje pristatomas orlaivių konflikto sprendimo algoritmas, apibendrintos išvados bei rekomendacijos.

Darbo apimtis – 104 p. teksto be priedų, 62 iliustracijos, 32 lentelės, 59 bibliografiniai šaltiniai.

**Reikšminiai žodžiai:** orlaivių konfliktas, Dubinso metodas, konflikto sprendimo algoritmai, vengimo manevrai, horizontalaus skirstymo reikalavimai.

Vilnius Gediminas technical university

**Antanas Gustaitis Aviation Institute**

**Department of Aviation Technologies**

ISNB ISSN

Egz. sk. 1

Integrated **studies of Aircraft piloting** study programme Master graduation Thesis

Pavadinimas **Determination of a safe and rational algorithm for aircraft conflict resolution**

Author **Rūta Pačebutaitė** Academic Supervisor dr. Anrieta Dudoit

**Language**

[X] lithuanian

[ ] english

This Master's thesis examines conflict resolution methods of two aircraft in a two-dimensional plane by selecting the safest and most rational trajectory. The literature analysis analyses the tools used for conflict detection and resolution, describing their advantages and disadvantages. In the research section, the conditions, process, mathematical model based on the Dubins method for finding conflict resolution, and evaluation criteria for conflict resolution trajectories are presented. The results obtained during the research are compared according to the set criteria, and conclusions are provided.

The thesis consists of 4 parts: introduction, theoretical part about aircraft conflict resolution methods, methodological part about aircraft conflict resolution algorithm, summarized conclusions and recommendations.

The thesis consists of 104 pages without appendixes, 62 figures, 32 tables, 59 bibliographical references.

**Keywords:** Aircraft conflict, Dubins method, conflict resolution algorithms, avoiding maneuvers, horizontal separation provision

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

**(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)**

**VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS**

Rūta Pačebutaitė, 20194933
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Antano Gustaičio aviacijos institutas
(Fakultetas)
Orlaivių pilotavimas, OPfau-19
(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)**
**SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2024 m. gegužės 14 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Orlaivių konfliktinės situacijos sprendimo saugaus ir racionalaus algoritmo“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose. Mano darbo vadovė Anrieta Dudoit. Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

RŪTA PAČEBUTAITĖ
(Vardas ir pavardė)

# TURINYS

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS ..... 8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS ..... 9
LENTELIŲ SĄRAŠAS ..... 13
ĮVADAS ..... 15
1. LITERATŪROS ANALIZĖ ..... 16
1.1 Orlaivių konfliktinės situacijos apibrėžimas ..... 16
1.2 Orlaivių stebėjimo erdvėje priemonės ..... 17
1.3 Skrydžių valdovų konflikto išvengimo metodai ..... 18
1.3.1 Vidutinės trukmės laikotarpio susidūrimo grėsmės nustatymo priemonė ..... 19
1.3.2 Taktinė skrydžių vadovo priemonė ..... 22
1.3.3 Trumpojo laikotarpio perspėjimas apie konfliktą ..... 24
1.4 MTCD, TCT, STCA palyginimas ..... 26
1.5 Būsimo konflikto aptikimo ir vengimo priemonės, prieinamos pilotams ..... 27
1.5.1 Oro eismo pavojaus ir susidūrimų vengimo sistema ..... 27
1.6 Skrydžių vadovų konflikto sprendimo pasirinkimai ..... 31
1.6.1 Konflikto sprendimo metodų apžvalga ..... 32
1.6.2 Dubinso kreivės ..... 38
1.7 Pirmojo skyriaus išvados ..... 40
2. ORLAIVIŲ MINIMALAUS SAUGAUS ATSTUMO PAŽEIDIMO SPRENDIMO ALGORITMAS ..... 41
2.1 Tyrimo metodika ..... 46
2.2 Konflikto sprendimo algoritmo vertinimo kriterijai ..... 47
3. TYRIMO REZULTATAI ..... 49
3.1 Pradinio kampo 25° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 50
3.2 Pradinio kampo 30° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 54
3.3 Pradinio kampo 35° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 57
3.4 Pradinio kampo 45° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 61
3.5 Pradinio kampo 50° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 65
3.6 Pradinio kampo 55° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 69
3.7 Pradinio kampo 60° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 72
3.8 Pradinio kampo 70° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 74
3.9 Pradinio kampo 75° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 77

3.10 Pradinio kampo 80° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 81
3.11 Pradinio kampo 85° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 84
3.12 Pradinio kampo 90° tarp skrydžio trajektorijų analizė ..... 87
3.13 Bendra kampų analizė ..... 90
3.14 Lūžio taško radimas ..... 95
3.15 35° kampo susidūrimo trajektorijos palyginimas su A. Dudoit disertacija ..... 96
3.16 Antrojo skyriaus išvados ..... 96
BENDROSIOS IŠVADOS ..... 97
LITERATŪROS SĄRAŠAS ..... 99

# SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

ACAS / TCAS – susidūrimo ore vengimo sistema (angl. *Airborne Collision Avoidance System / Traffic Alert and Collision Avoidance System*);

ADS-B – transliavimo automatinė priklausomoji apžvalga (angl. *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*);

ATC – skrydžių valdymas (angl. *Air Traffic Control*);

CDT – susidūrimo grėsmės nustatymo priemonėmis (angl. *Conflict Detection Tools*);

CPA – arčiausio suartėjimo taškas (angl. *Closest Point of Approach*);

EASA – Europos aviacijos saugos agentūros (angl. *European Union Aviation Safety Agency*);

GNSS – pasaulinė navigacijos palydovų sistema (angl. *Global Navigation Satellite System*);

ICAO – Tarptautinė civilinės aviacijos organizacija (angl. *International Civil Aviation Organization*);

KTT – kilimo ir tūpimo takas (angl. *Runway*);

MTCD – vidutinės trukmės laikotarpio susidūrimo grėsmės nustatymo priemonė (angl. *Medium Term Conflict Detection*);

QNH – atmosferinis slėgis nuo vidutinio jūros lygio;

RA – nurodymų zona (angl. *Resolution Advisory*);

RLS – radiolokacinė sistema;

RT – riedėjimo takas (angl. *Taxiway*);

RVSM – sumažinto vertikaliojo skirstymo minimumai (angl. *Reduced Vertical Separation Minima)*;

SLOT – išskridimo laiko tarpsnis;

SSR – antrinės apžvalgos radarą (angl. *Secondary Surveillance Radar*)

STCA – trumpalaikis įspėjimas apie konfliktus (angl. *Short Term Conflict Alert*);

TA – įspėjimo zona (angl. *Traffic Advisory*)

TAU – laikas iki minimalaus reikalaujamo saugaus atstumo pažeidimo (angl. *Time to Intercept*);

TCT – taktinė skrydžių vadovo priemonė (angl. *Tactical Controller Tool*);

TMA – oro uostų prieigos kontroliuojama oro erdvė (angl. *Terminal Manoeuvring Area*);

UAV – bepiločiai orlaiviai (angl. *Unmanned Aerial Vehicles*).

# PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

**1 pav**. Standartinė saugos zona aplink orlaivį skrendant maršrute (Adaptuota remiantis Chaboud, 2020) ..... 16
**2 pav**. Antrinio apžvalgos radaro veikimo seka (Adaptuota remiantis Plyasovskikh, 2023) ..... 17
**3 pav**. ADS-B veikimo principas (Adaptuota remiantis Busyairah et al., 2015) ..... 18
**4 pav.** Du orlaiviai ir jų greičio vektoriai (Adaptuota remiantis Noren, 2004) ..... 20
**5 pav.** A1 ir A2 lėktuvų išdėstymas plokštumoje su santykiniu greičiu V (Adaptuota remiantis Noren, 2004) ..... 20
**6 pav.** Skrydžio vadovų ekrane matomas vaizdas. Kairėje – įprastas skrydis, dešinėje – skrydis su MTCD įspėjimo ženklu (Eurocontrol Human Machine Interface Service, 2022) ..... 22
**7 pav**. Taktinės trajektorijos konfliktas (Adaptuota remiantis Alam et al., 2009) ..... 23
**8 pav**. Būsenos vektoriaus trajektorijos konfliktas ekstrapoliuojant būsenos vektorių (Adaptuota remiantis Alam et al., 2009) ..... 23
**9 pav.** TCT įspėjimas skrydžių vadovo ekrane (Adaptuota remiantis DSNA, 2022) ..... 24
**10 pav.** Veiksmų seka esant STCA perspėjimui. (Adaptuota remiantis EUROCONTROL, 2007) . 25
**11 pav.** Potencialus orlaivių konflikto išfiltravimas (Adaptuota remiantis Reckhouse, 2010) ..... 26
**12 pav.** STCA įspėjimas skrydžių vadovo ekrane (Adaptuota remiantis AAIU, 2020 bei EUROCONTROL, 2002) ..... 26
**13 pav.** Orlaivių konflikto nustatymas ir konflikto priemonės aktyvavimas atsižvelgiant į likusį laiką iki konflikto. Adaptuota pagal Noskievič & Kraus (2017) ..... 28
**14 pav.** TAU kitimas pagal atstumą tarp orlaivių (Adaptuotas remiantis AIRBUS, 2018) ..... 30
**15 pav.** Pilotams navigacinio monitoriaus ekrane rodomas aplink esantis eismas (Adaptuota remiantis Flysafe project, 2011) ..... 31
**16 pav.** Šeši Dubinso kreivių pavyzdžiai (Adaptuota remiantis Zhang et at., 2021) ..... 38
**17 pav**. Orlaivio trajektorijų susikirtimo pavyzdys (Adaptuota remiantis Dudoit, 2023) ..... 41
**18 pav**. Orlaivių konflikto sprendimas Dubinso metodu (sudaryta autorės remiantis Dudoit, 2023) ..... 42
**19 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 25°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės) ..... 50
**20 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 25° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 51
**21 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 53

**22 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 30°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės) ..... 54
**23 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 30° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 55
**24 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 57
**25 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 35°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės) ..... 58
**26 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 35° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 59
**27 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 35° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 61
**28 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 45°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės) ..... 62
**29 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 45° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 63
**30 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 65
**31 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 50°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 66
**32 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 50° kampui (sudaryta autorės) ..... 66
**33 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešinąja puse atvaizdavimas esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 68
**34 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 55°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 69
**35 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 55° kampui (sudaryta autorės) ..... 69
**36 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 71
**37 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 60°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 72
**38 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 60° kampui (sudaryta autorės) ..... 72

**39 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 74
**40 pav**. Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 70°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 75
**41 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 70° kampui (sudaryta autorės) ..... 75
**42 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 77
**43 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 75°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 78
**44 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 75° kampui (sudaryta autorės) ..... 78
**45 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 80
**46 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 80°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 81
**47 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 80° kampui (sudaryta autorės) ..... 81
**48 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 83
**49 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 85°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 84
**50 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 85° kampui (sudaryta autorės) ..... 84
**51 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 86
**52 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 90°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės) ..... 87
**53 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 90° kampui (sudaryta autorės) ..... 87
**54 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 89
**55 pav.** Mažiausias atstumas tarp orlaivių prie kiekvieno tiriamojo pradinio kampo tarp skrydžio trajektorijų (sudaryta autorės) ..... 90

**56 pav.** $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 91
**57 pav**. Atstumo pailgėjimo priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 91
**58 pav.** Papildomų degalų sąnaudų priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 92
**59 pav.** Perkrovos koeficiento priklausomybė nuo kampo tarp trajektorijų dešiniąja ir kairiąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 93
**60 pav.** Skrydžio trukmė skrendant dešiniąja apskritimo $O_S$ perimetru kintant kampui tarp trajektorijų (sudaryta autorės) ..... 93
**61 pav.** Perkrovos koeficiento ir $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų kairiąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 94
**62 pav.** Perkrovos koeficiento ir $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės) ..... 94

# LENTELIŲ SĄRAŠAS

**1 lentelė**. MTCD, STCA ir TCT palyginimas (Adaptuota remiantis Humm & Abate, 2022)..... 27
**2 lentelė.** Laikai, kada įgulai yra sugeneruojamas įspėjimas, priklausomai nuo orlaivio aukščio (EUROCONTROL, 2022)..... 30
**3 lentelė**. Orlaivių konflikto sprendimo metodai ..... 32
**4 lentelė**. Orlaivių konflikto sprendimo Dubinso metodu vertinimas..... 39
**5 lentelė.** Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) 51
**6 lentelė**. Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 52
**7 lentelė.** Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) 55
**8 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 56
**10 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 35° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) 59
**11 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 60
**12 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) 63
**14 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) ..... 64
**15 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametrų duomenys (sudaryta autorės)..... 67
**16 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 67
**17 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)..... 70
**18 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 70

**19 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 73
**20 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 73
**21 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 76
**22 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 76
**23 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 79
**24 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 79
**25 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 82
**26 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 82
**27 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 85
**28 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) . 85
**29 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės) ..... 88
**30 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju OS apskritimo perimetru, esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės) 88
**31 lentelė.** Lūžio taško radimo duomenys (sudaryta autorės) ..... 95
**32 lentelė.** Palyginimas su Dudoit (2022) disertacijos rezultatais (sudaryta autorės) ..... 96

# ĮVADAS

**Problema:** laiku neaptiktas orlaivių minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimas yra pavojinga situacija, kurioje dėl riboto laiko, žmogiškųjų faktorių ar situacijos sudėtingumo, konfliktui išvengti gali būti pasirenkamas ne pats optimaliausias, racionaliausias sprendimas. Neefektyvus, sudėtingas konfliktinės situacijos sprendimo metodas gali sukelti skrydžio vadovų ar pilotų pasimetimą, kyla patiriamo streso tikimybė. Be žmogiškųjų faktorių, galimi skrydžių vėlavimai, sutrikimai eismo oro erdvėje, degalų sąnaudų padidėjimas, dėl to auga orlaivių naudotojų išlaidos ir $CO_2$ tarša aplinkai. Dėl minėtų priežasčių konfliktų sprendimo algoritmus būtina pritaikyti taip, kad šie pateiktų skrydžių vadovui saugiausią bei racionaliausią sprendimo metodą.

**Aktualumas:** Europos aviacijos saugos agentūros (angl. *European Union Aviation Safety Agency,* EASA) išleidžiamoje kasmetinėje Europos aviacijos saugos ataskaitoje teigiama, kad orlaivių minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimas, 2018–2022 laikotarpiu surinktais duomenimis, yra antras, labiausiai fiksuotas įvykis avarijų bei rimtų incidentų kategorijoje. Orlaivių minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimai jau daugiau nei dešimtį metų yra dažniausių incidentų dešimtuke, tai leidžia daryti prielaidą, jog didėjant oro eismui (remiantis EUROCONTROL prognoze, 2025 metais skrydžiai pasieks 2019 metų skaičius (11,1 milijono) ir toliau kasmet augs apie 1,5 %) bei naudojant dabartines konflikto sprendimo priemones, orlaivių minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimo incidentai gali būti dažnesni.

**Tyrimų objektas:** dviejų orlaivių konfliktinės situacijos sprendimo modelio analizė, įvertinant saugą ir racionalų maršruto parinkimą.

**Tikslas:** pasiūlyti dviejų orlaivių konfliktinės situacijos sprendimo modelį, įvertinantį saugų ir racionalų maršruto parinkimą.

**Darbo uždaviniai:**

1. Išanalizuoti skrydžių vadovų ir pilotų naudojamas konflikto aptikimo ir taikomus konflikto sprendimo metodus.
2. Pasiūlyti dviejų orlaivių konfliktinės situacijos sprendimo modelį, įvertinantį saugų ir racionalų maršruto parinkimą.
3. Atlikti gautų rezultatų analizę ir pateikti išvadas bei rekomendacijas pasiūlytam metodui tobulinti.

**Taikoma metodika**

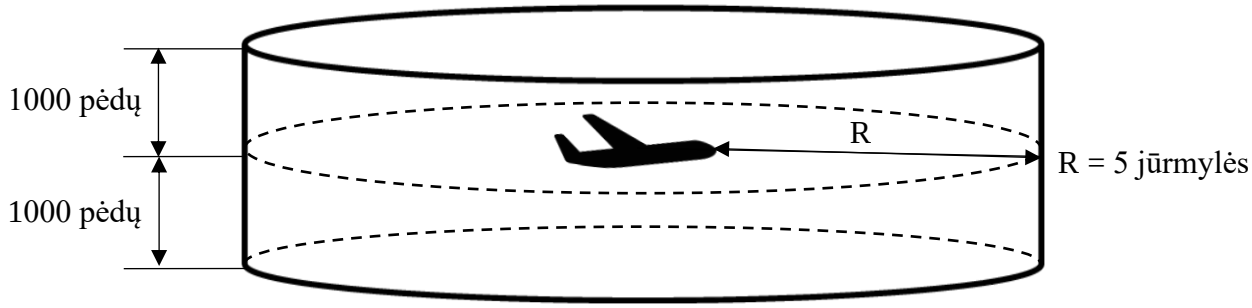
Darbe pritaikytas skaitinis (matematinis) modelis, kuriuo vertinama sauga ir racionalus maršruto parinkimas dviejų skrendančių orlaivių konfliktinės situacijos uždaviniui spręsti.

# 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

Šiame skyriuje pateikti literatūros šaltiniai, kuriuose tiriamos orlaivių konfliktinės situacijos aptikimo ir sprendimo priemonės. Išskiriamos skrydžių vadovų bei pilotų naudojamos sistemos, aprašomas jų veikimo principas. Įvardijami skrydžių vadovų konflikto sprendimo metodai bei pateikiama jų analizė, įvardijant privalumus bei trūkumus. Apžvelgiama literatūra, nagrinėjanti tyrimo metodiką (Dubinso koncepciją) ir įvertinamas jos tinkamumas konflikto aptikimo ir sprendimo algoritmo kūrimui.

## 1.1 Orlaivių konfliktinės situacijos apibrėžimas

ICAO (2001) pateiktame PANS-ATM dokumente Nr. 4444 „Oro navigacijos paslaugų procedūros. Oro eismo valdymas“, orlaivių konfliktas yra apibrėžiamas kaip situacija, kurioje atstumas tarp orlaivių, jų pozicija erdvėje bei greitis gali sukelti pavojų šių lėktuvų minimalaus saugaus atstumo reikalavimams. Remiantis dokumentu, norint išlaikyti skrydžių saugą oro erdvėje, kurioje naudojama orlaivių stebėjimo įranga – radarai, transliavimo automatinė priklausomoji apžvalga (angl. *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*, ADS-B), tarp orlaivių turi būti išlaikomas ne mažesnis nei 5 jūrmylių horizontalus reikalaujamas atstumas bei 1000 pėdų vertikalus atstumas.



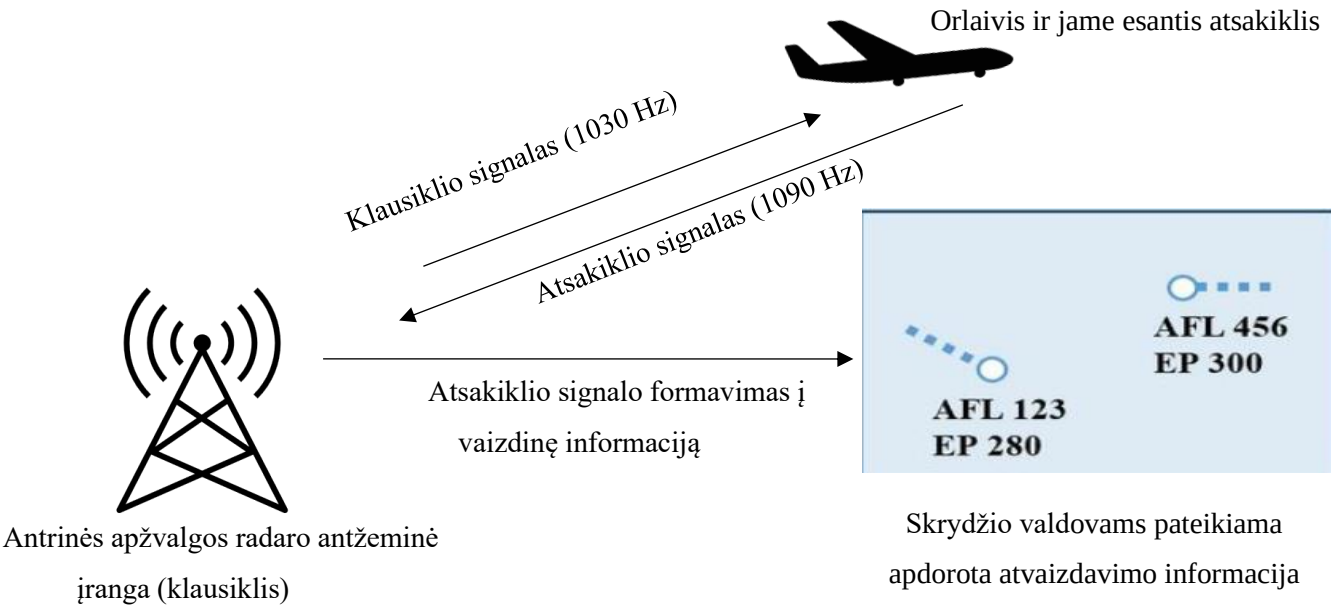

**1 pav**. Standartinė saugos zona aplink orlaivį skrendant maršrute (Adaptuota remiantis Chaboud, 2020)

Šie minimumai gali būti dar labiau sumažinami naudojant pažangesnes orlaivių stebėjimo, sekimo priemones. 2014 metais Honkonge vykusioje konferencijoje apie atskirties minimumus bei oro erdvės talpą buvo pažymėta, jog orlaivių atskyrimo standartai suteikė galimybę efektyvesniam oro erdvės išnaudojimui, pagerino galimybes skraidyti optimaliais, degalų taupymui palankesniais, skrydžio maršrutais ir sumažino skrydžių vadovų (angl. *Air Traffic Control*, ATC) personalo darbo krūvį ir užduočių sudėtingumą. Kitą vertus, sumažinus orlaivio saugos zoną, pilotams bei skrydžių vadovams paliekama mažiau laiko reaguoti į atsirandančias konfliktines situacijas. Tai paskatino konflikto nustatymo technologijų vystymąsi skrydžių valdymo bei orlaivių navigacijos srityse.

## 1.2 Orlaivių stebėjimo erdvėje priemonės

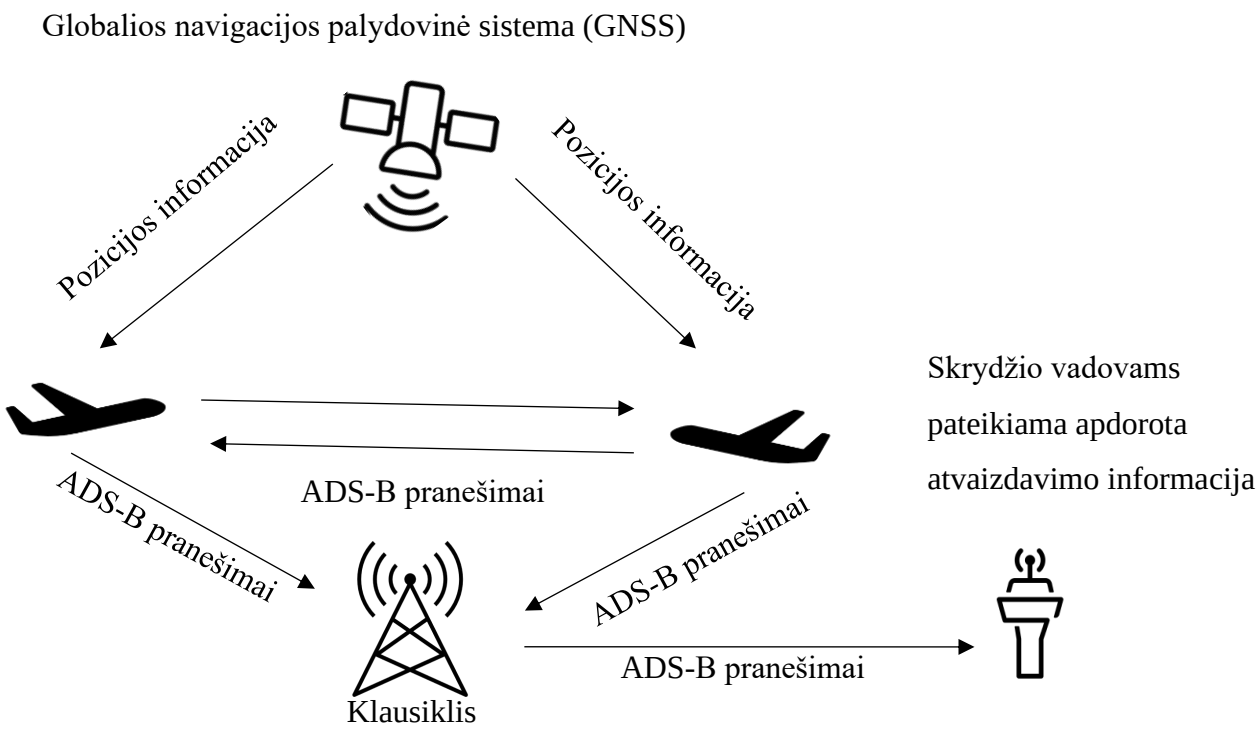
Skrydžių valdymui kreiseriniame lygyje (lygis, kurio laikomasi didžiąją skrydžio laiko dalį (Reglamentas (ES) 2017/373) orlaiviai stebimi naudojant antrinės apžvalgos radarą (angl. *Secondary Surveillance Radar*, SSR) arba transliavimo automatinę priklausomąją apžvalgą (angl. ADB-S).

Antrinės apžvalgos radarą sudaro klausiklio aparatūra antžeminėje stotyje ir orlaivyje esanti atsakiklio aparatūra (Jakučionis, 2007). Eugenijaus Pilecko (2006) knygoje „Skrydžių valdymo radiolokacinės sistemos“ aprašomas antrinės apžvalgos radaro veikimas. Klausiklis suformuoja periodiškai pasikartojantį koduotą paklausimo signalą, kuris turi keletą aukštojo dažnio impulsų, atskirtų tarpusavyje numatytais laiko intervalais, priklausomai nuo užklausimo režimo 8 arba 21 μs. Paklausimo signalai kryptinės antenos išspinduliuojami į erdvę. Orlaivyje jie priimamai atsakikliu ir sustiprinami jo imtuve. Priėmus paklausimo signalą, atsakiklis suformuoja atsako signalą, kuris siųstuvu ir antena išspinduliuojamas į erdvę. Atsako signalui perduoti atsakikliui naudojamas 1090 Hz dažnis, kuris skiriasi nuo paklausimo 1030 Hz dažnio. Klausiklis priima atsakiklio signalą ir iš sustiprinto atsako signalo gauta informacija siunčiama į skrydžių valdymo tarnybų atvaizdavimo įrenginius (2 pav.). Remiantis šiuo principu, SSR gali veikti trimis režimais: režimu A, režimu C ir režimu S. Klausiklio suformuluojamas paklausimo signalas nulemia atsako talpinamą informaciją. Pavyzdžiui, kai antžeminė stotis užklausia orlaivio aukščio, atsakiklis atsako režimu C. Kai užklausiama režimu A, atsakoma orlaivio identifikacija / šaukiniu. Į režimo S užklausimą atsakoma su informacija apie orlaivio poziciją (skrydžio numeris, greitis, kursas, pasirinktas aukštis, 24 bitų lėktuvo identifikavimo kodas, buvimo ore ar ant žemės statusas) (AIRBUS, 2018). Antrinio atsako radiolokacinė sistema (RLS) sudaro sąlygas nustatyti tris orlaivio koordinates (x, y ir z), atpažinti orlaivį pagal jo skrydžio numerį ir gauti iš orlaivio duomenis.




**2 pav**. Antrinio apžvalgos radaro veikimo seka (Adaptuota remiantis Plyasovskikh, 2023)

Europos Sąjungos (ES) reglamente 2017/373 transliavimo automatinė priklausomoji apžvalga (ADS-B) apibūdinama kaip „sistema, kurią naudodami orlaiviai, aerodromo transporto priemonės ir kiti objektai, gali automatiškai, transliavimo režimu, per duomenų perdavimo ryšio liniją perduoti ir (arba) gauti duomenis, pavyzdžiui, orlaivio atpažinimo, buvimo vietos nustatymo ir prireikus papildomus duomenis“. ADS-B sistema veikia panašiu principu kaip ir antrinės apžvalgos radarai. Pagrindiniai skirtumai atsiranda orlaivio pozicijos nustatyme bei signalo skleidime. Antrinės apžvalgos radarai apskaičiuoja orlaivio padėtį pagal išsiųsto ir gauto signalo laiką, atsižvelgiant į fiksuotą laiko tarpą, per kurį iš klausiklio gautas signalas yra apdorojamas ir sustiprinamas (Plyasovskikh & Eshmuradov, 2023). Tuo tarpu naudojant ADS-B, lėktuvo koordinates paimamos iš jame esančio GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*) imtuvo, inercinės navigacijos sistemos arba iš skrydžio programinio valdymo sistemos (angl. *Flight Management System,* FMS) (Savickas, 2020). Atsakiklis šiuos parametrus automatiškai, pavyzdžiui, kas sekundę, nedidele visakrypte antena išsiunčia skrydžių vadovui ir kitiems orlaiviams (Savickas, 2017). Šiuolaikiniuose orlaiviuose tas pats atsakiklis gali būti pasitelkiamas ir stebėjimui antriniu radaru bei ADS-B.




**3 pav**. ADS-B veikimo principas (Adaptuota remiantis Busyairah et al., 2015)

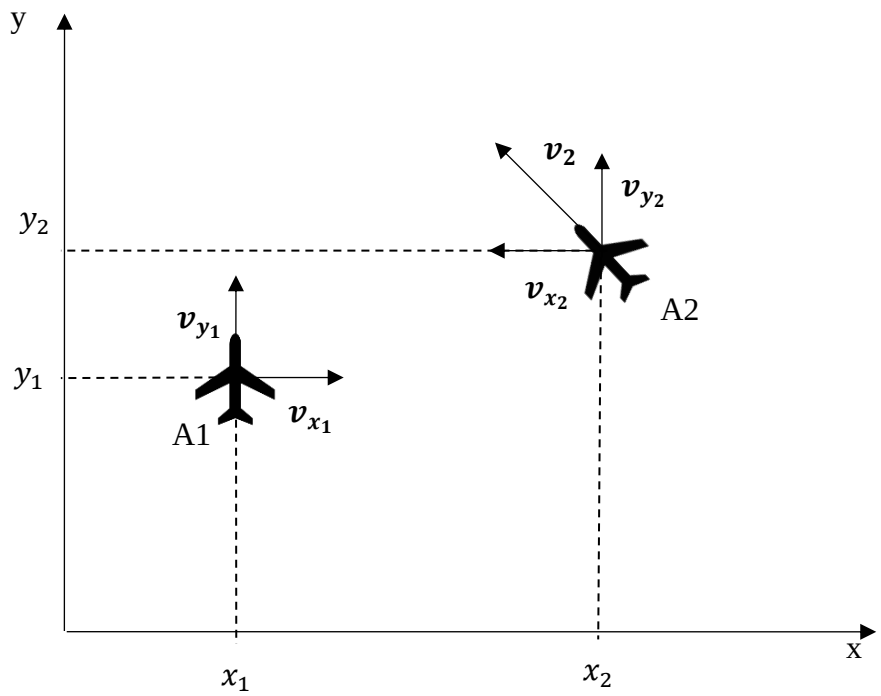
## 1.3 Skrydžių valdovų konflikto išvengimo metodai

Viena iš svarbiausių skrydžių vadovų užduočių yra užtikrinti efektyvų oro erdvės panaudojimą bei saugų atstumą tarp joje skrendančių lėktuvų. Konfliktui tarp orlaivių aptikti skrydžių valdymo padaliniai naudoja orlaivių skrydžio plano maršrutą, padėties erdvėje informaciją (Blin, 2000).

Pastaroji gali būti gaunama iš antrinio apžvalgos radaro arba ADS-B, tačiau jų pozicija erdvėje būsimu laiko momentu gali būti nustatoma nuspėjant trajektoriją (Hoekstra et al., 2016). Priemonės, gebančios aptikti trajektorijų suartėjimą per mažesnį nei minimalų saugų reikalaujamą atstumą, vadinamos susidūrimo grėsmės nustatymo priemonėmis (angl. *Conflict Detection Tools*, CDT). Jos padeda įspėti skrydžių vadovus apie galimą orlaivių suartėjimą arba susidūrimą, tačiau neturi konflikto sprendimo pasiūlymo galimybės. Orlaivių konflikto nustatymo priemonės gali būti skirstomos į tris kategorijas: ilgojo, vidutiniojo, trumpojo laikotarpio iki susidūrimo. (Pérez-Castán et al., 2022). Toliau darbe pristatomas priemonės, naudojamos kiekvienai iš šių kategorijų aptikti.

### 1.3.1 Vidutinės trukmės laikotarpio susidūrimo grėsmės nustatymo priemonė

Vidutinės trukmės laikotarpio susidūrimo grėsmės nustatymo priemonė (angl. *Medium Term Conflict Detection*, MTCD) yra planavimo įrankis, sukurtas stebėti orlaivius ir nuspėti būsimą konfliktą. Jis analizuoja trajektorijų poras ir tikrina, ar jos suartės iki minimalaus reikalaujamo saugaus atstumo. Jei taip nutinka, skrydžių vadovui rodoma perspėjimo žinutė. Remiantis Noskievič & Kraus (2017) šis įrankis ieško tiek „orlaivių-oro erdvės“ konfliktų, tiek „orlaivių-orlaivių“ konfliktų. Norint prognozuoti „orlaivis-orlaivis“ konfliktus, sistema turi gauti duomenis iš trajektorijų prognozavimo įrankio. MTCD naudoja skrydžio plano maršrutą, skrydžių vadovo instrukcijas kaip informaciją, pagal kurią bus modeliuojama orlaivio būsima trajektorija. Kadangi darbo tyrimo objektas yra dviejų orlaivių konfliktinės situacijos horizontalioje plokštumoje valdymo, t.y. aptikimo ir sprendimo modelio analizė, reikalinga išnagrinėti, kaip sistema aptinka ir modeliuoja konfliktus horizontalioje plokštumoje. Norén (2004) darbe aprašo tiesinės prognozės modelį, pagal kurį skaičiuojamos būsimos orlaivių trajektorijos. Pateiktame 4 pavyzdyje apskaičiuojamas dabartinis atstumas tarp orlaivių ir artimiausio suartėjimo taško (angl. *Closest Point of Approach*, CPA). CPA – tai pozicija, kurioje du judantys objektai pasiekia savo artimiausią minimalią saugą užtikrinantį atstumą vienas nuo kito (Arumugam, 2006). Orlaivis A1 yra pozicijoje $(x_1, y_1)$ , jo greičio vektoriai $(\boldsymbol{v}_{x_1}, \boldsymbol{v}_{y_1})$, orlaivis A2 yra pozicijoje $(x_2, y_2)$, jo greičio vektoriai $(\boldsymbol{v}_{x_2}, \boldsymbol{v}_{y_2})$, kaip pavaizduota 4 paveiksle.



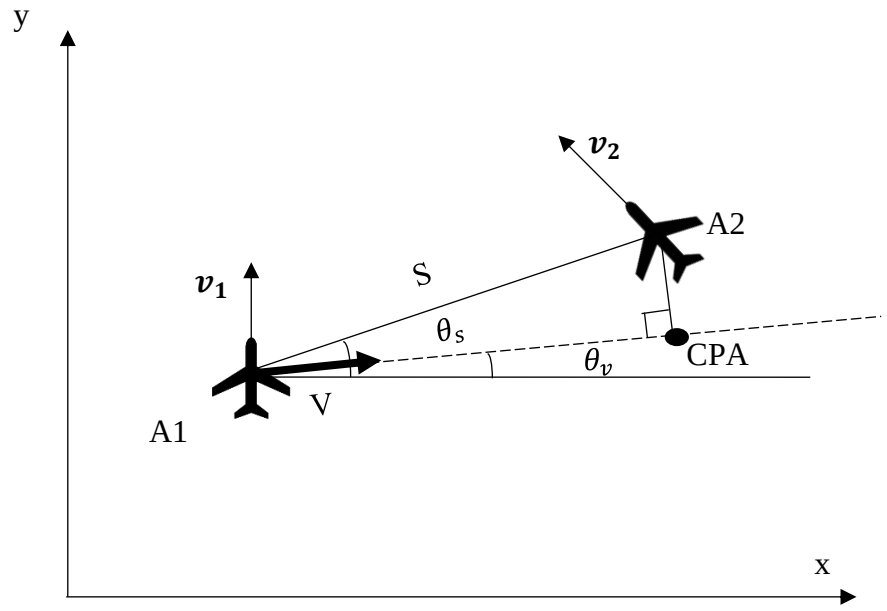

**4 pav.** Du orlaiviai ir jų greičio vektoriai (Adaptuota remiantis Noren, 2004)

Iš šios informacijos galima sužinoti laiką bei atstumą iki potencialaus konflikto atsiradimo. Pirmiausiai apskaičiuojamas atstumas S tarp orlaivių bei krypties kampas ($\theta_s$).

$$S = \sqrt{(x_2 - {x_1}^2) + (y_2 - {y_1}^2)} \quad (1)$$

$$\theta_s = arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_2}\right) \quad (2)$$

Greitis, kuriuo orlaiviai artėja vienas prie kito, yra santykinis greitis ir žymimas V. Orlaivis A1 artėja link orlaivio A2 palei brūkšninę liniją, kaip pavaizduota 5 paveiksle.




**5 pav.** A1 ir A2 lėktuvų išdėstymas plokštumoje su santykiniu greičiu V (Adaptuota remiantis Noren, 2004)

Santykiniam greičiui (V) apskaičiuoti naudojamos orlaivių x ir y koordinatės dvimatėje plokštumoje.

$$V = \sqrt{(v_{x1} - v_{x2})^2 + \left(v_{y1} - v_{y2}\right)^2} \quad (3)$$

$$\theta_v = arctan\left(\frac{v_{y1} - v_{y2}}{v_{x1} - v_{x2}}\right) \quad (4)$$

Arčiausio suartėjimo taškas pasiekiamas, kai atstumas tarp orlaivio A2 ir santykinio greičio tęsinio linijos (brūkšninė linija), yra trumpiausias. 5 paveiksle tai yra atvaizduojama nubrėžiant statų kampą tarp brūkšninės linijos ir atstumo nuo CPA iki A2 orlaivio. Pastarasis yra parametras, kuris gali būti nustatytas pagal reikalaujamus atskirties tarp orlaivių minimumus (5 jūrmylės). Atstumas $D_1$ žymi atstumą iki taško, kuriame dar bus užtikrinamas mažesnis nei minimalus saugus reikalaujamas atstumas.

$$D_1 = A1 \rightarrow CPA = S \cdot cos(\theta_s - \theta_v) \quad (5)$$

$$D_2 = A2 \rightarrow CPA = S \cdot sin(\theta_s - \theta_v) \quad (6)$$

Čia :

$D_1 -$ atstumas iki kol bus pasiektas CPA, m;

$D_2 -$ mažiausias atstumas tarp orlaivių būsimu laiko momentu, m;

S – atstumas tarp orlaivių, m;

$\theta_s -$ krypties kampas laipsniais;

$\theta_v -$ santykinio greičio kampas laipsniais.

Laikas, per kurį lėktuvas A1 pasieks arčiausiai leistiną suartėjimą ($t_{CPA}$), apskaičiuojamas pagal formulę apačioje:

$$t_{CPA} = \frac{D_1}{V} \quad (7)$$

Atsižvelgiant į išraišką $D_1$ ir $V$, pilna išraiška $t_{CPA}$:

$$t_{CPA} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1{}^2) + (y_2 - y_1{}^2)} \cdot cos\left(arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_2}\right) - arctan\left(\frac{v_{y1} - v_{y2}}{v_{x1} - v_{x2}}\right)\right)}{\sqrt{(v_{x1} - v_{x2})^2 + \left(v_{y1} - v_{y2}\right)^2}} \quad (8)$$

Tam, kad nebūtų pažeistas arčiausias minimalus reikalaujamas saugus atstumas $D_r$, įspėjimas skrydžių vadovui turi būti pateikiamas, kai atstumas yra ilgesnis nei numatyti saugaus tarp orlaivių

atstumo minimumai (5 jūrmylės), tam kad būtų suspėta imtis reikiamų vengimo manevrų. Skrydžių vadovui ekrane yra pateikiamas vizualus įspėjimas. (žr. 6 pav.)



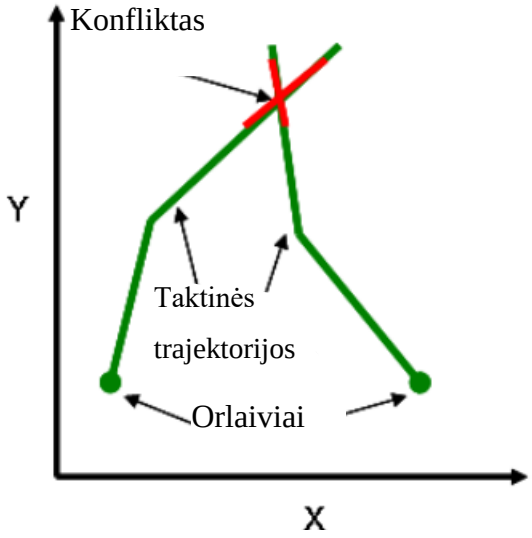

**6 pav.** Skrydžio vadovų ekrane matomas vaizdas. Kairėje – įprastas skrydis, dešinėje – skrydis su MTCD įspėjimo ženklu (Eurocontrol Human Machine Interface Service, 2022)

### 1.3.2 Taktinė skrydžių vadovo priemonė

MTCD yra sukurtas įspėti tam tikro sektoriaus skrydžių vadovus, atsakingus už skrydžio maršruto planavimą jų prižiūrimoje erdvėje, apie galimą konfliktą likus 20 minučių iki minimalaus reikalaujamo saugaus atstumo pažeidimo, o STCA (angl. *Short Term Conflict Alert,* STCA), naudojamas taktinių skrydžio vadovų, suteikia tik 2 minučių laiko tarpą iki minimalaus reikalaujamo saugaus atstumo pažeidimo. EUROCONTROL pristatė taktinę skrydžių vadovo priemonę (angl. *Tactical Controller Tool*, TCT), kuri galėtų suteikti taktiniam skrydžių vadovui efektyviau palaikyti skrydžių saugą esant padidėjusiam darbo krūviui (EUROCONTROL, 2009). Mokslininkai Alam, Lokan ir Abbass (2009) savo darbe taktinę skrydžių vadovo priemonę apibūdina kaip taktinių skrydžių vadovų pagalbinį įrankį, sukurtą nuspėti būsimą trajektorijų konfliktą per artėjančias 5–8 minutes. Taktinė skrydžių vadovo priemonė naudoja būsenos vektoriaus bei taktinę trajektoriją konfliktui aptikti:

1) Taktinė trajektorija

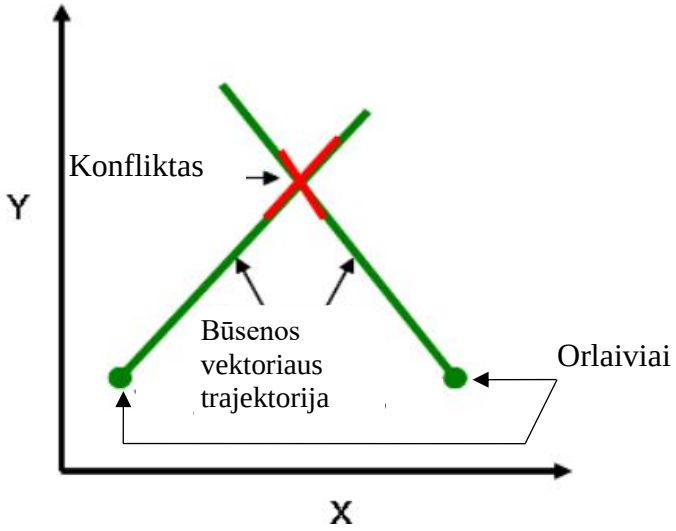
Orlaivio trumpalaikė pozicija yra modeliuojama pagal skrydžio planą arba skrydžio vadovo instrukcijas (nurodomas skrydžio kursas, nurodomas skrydis į nesuplanuotą kelio tašką) (Noskievič & Kraus, 2017)




**7 pav**. Taktinės trajektorijos konfliktas (Adaptuota remiantis Alam et al., 2009)

2) Būsenos vektoriaus trajektorija

Sudaroma pagal orlaivio esamos pozicijos duomenis, pratęsiant jo kelio liniją 8 minučių laikotarpiu į priekį.




**8 pav**. Būsenos vektoriaus trajektorijos konfliktas ekstrapoliuojant būsenos vektorių (Adaptuota remiantis Alam et al., 2009)

Trajektorijų skaičiavimas taktiniame vadovo įrankyje yra pagrįstas MTCD naudojamu tiesinės prognozės algoritmu, kuris pagal vektorių geometriją plokštumoje skaičiuoja arčiausio suartėjimo tašką tarp dviejų linijos segmentų. Jei yra aptinkamas minimalaus saugaus reikalaujamo

atstumo pažeidimas, įspėjimas, atitinkantis konflikto skubumą, rodomas radaro ekrane skrydžių vadovui (EUROCONTROL, 2009).

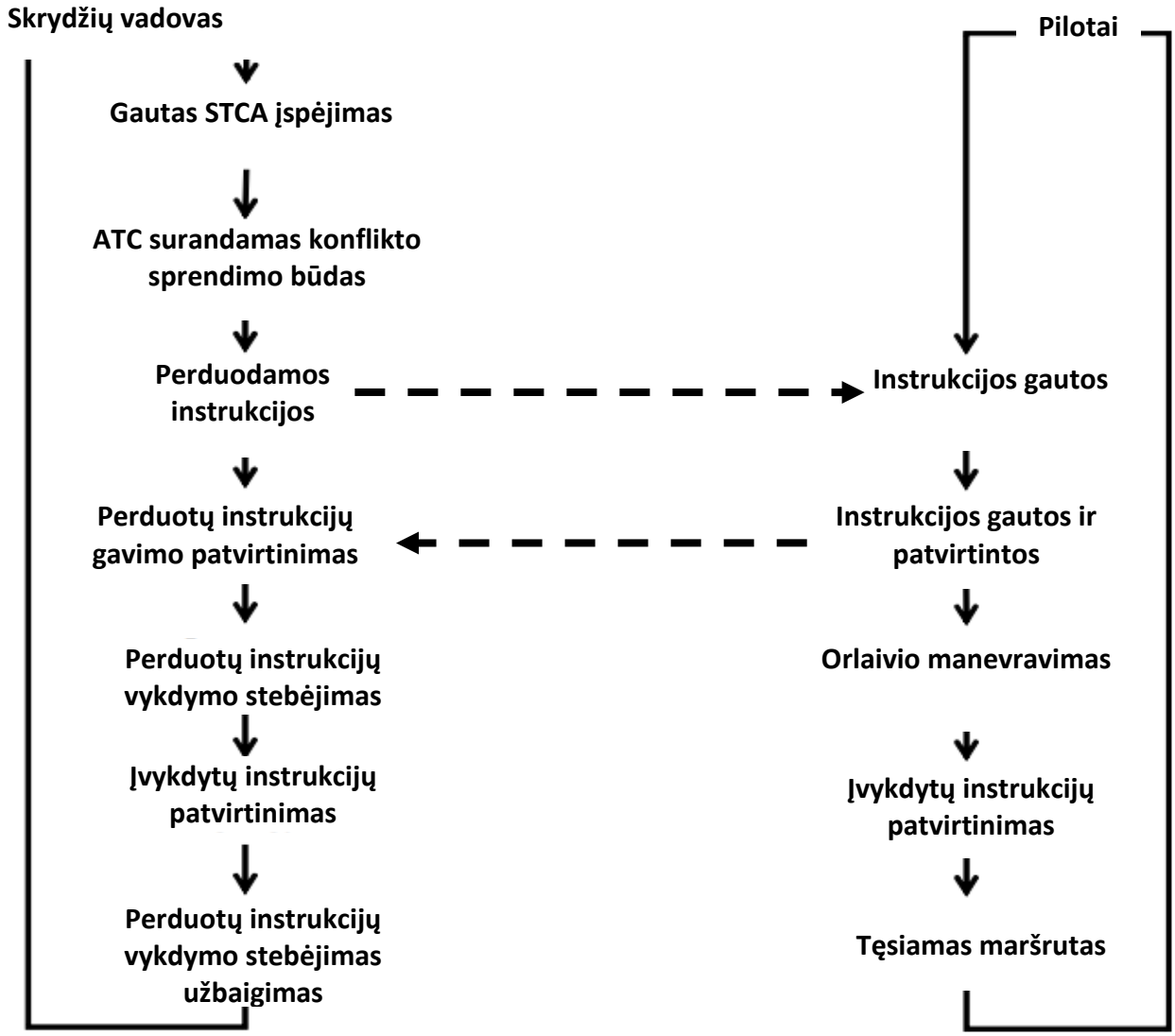



**9 pav.** TCT įspėjimas skrydžių vadovo ekrane (Adaptuota remiantis DSNA, 2022)

Iš mokslinės literatūros analizės matyti, jog TCT gali sumažinti skrydžio vadovo darbo krūvį. Dėl ankstaus konflikto aptikimo leidžia imtis „švelnesnių“ vengimo manevrų, sumažina nepastebėtų konfliktų skaičių, įvertina skrydžio vadovų instrukcijų riziką sukelti minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimą (Szabo, 2020).

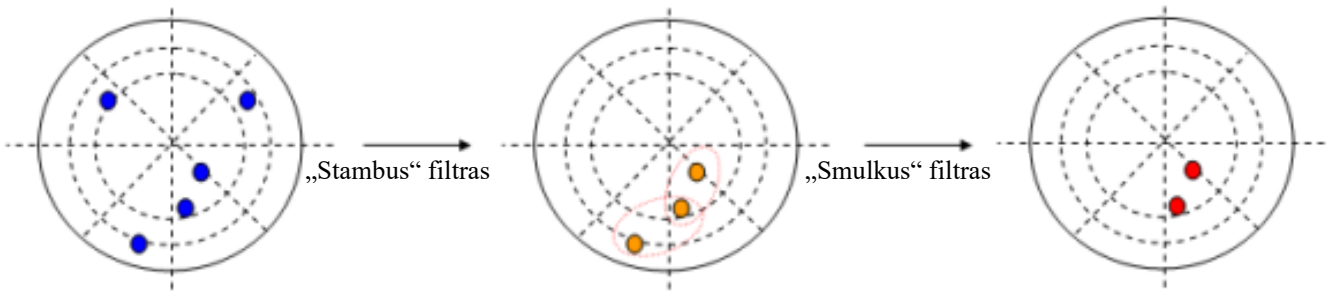
### 1.3.3 Trumpojo laikotarpio perspėjimas apie konfliktą

Trumpalaikis įspėjimas apie konfliktus (STCA) yra antžeminė sistema, naudojama kaip paskutinis skrydžių vadovų saugos tinklas orlaivių minimaliam saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimui aptikti. Sistema, kuri gali būti naudojama ir maršruto, ir oro uostų prieigos valdomoje oro erdvėje (angl. *Terminal Maneuvring Area,* TMA), sukuria įspėjimą, kad taktiniai skrydžių vadovai (angl. *Executive Air Traffic Controller*) būtų įspėti, kai yra pažeidžiamas minimalus saugus reikalaujamas atstumas tarp orlaivių (SESAR 3JU, 2016). Ši sistema sukurta siekiant pagerinti saugą ir įspėti apie potencialius konfliktus, kurie gali kilti per artėjančias apytiksliai 2 minutes, tačiau ji nesuteikia konflikto sprendimo būdų. EUROCONTROL (2009) išleistose STCA specifikacijose aprašoma, jog ši programa naudoja tris parametrus konflikto aptikimui: orlaivio stebėjimo priemonių informaciją, aplinkos informaciją (QNH, STCA prižiūrimos oro erdvės regionas), skrydžio duomenis (RVSM statusas, orlaivio valkčio turbulencija).



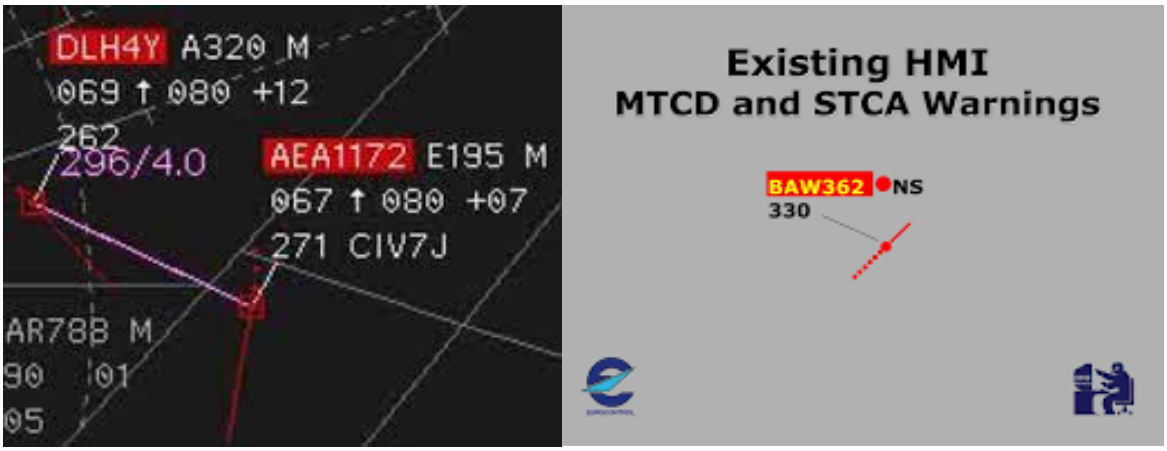

**10 pav.** Veiksmų seka esant STCA perspėjimui. (Adaptuota remiantis EUROCONTROL, 2007)

Iš esmės STCA tikrina tik orlaivių poras. Kas tris/keturias sekundes (laikas, skirtas radaro vienam apsisukimui) antžeminis radaras atvaizduoja orlaivių pozicijas. Sistema remiasi tiesinės prognozės modeliu, kad apskaičiuotų arčiausio suartėjimo tašką tarp dviejų orlaivių (Noren, 2004). Gauta trajektorija yra patikrinama per „stambų" filtrą, skirtą atmesti visas orlaivių poras, kurių nėra pakankamai arti, kad būtų pateisinamas tolesnis apdorojimas. Tik orlaivių poros, kurių trajektorijos yra pakankamai arti viena kitos, perduodamos į „smulkiuosius" filtrus. Ši situacija iliustruojama 11 paveiksle, kur keletas orlaivių pozicijų yra pažymėtos mėlynais apskritimais. Skenavimas pro stambųjį filtrą nustato, kurios dvi orlaivių poros yra pakankamai arti, kad galėtų būti praleidžiamos pro „smulkųjį" filtrą, (orlaivio padėtis pažymėta oranžine spalva, poromis apibrėžta raudonai). Pritaikius „smulkųjį" filtrą nustatyta, kad yra tik viena konfliktuojanti pora (pažymėta raudonais apskritimais).




**11 pav.** Potencialus orlaivių konflikto išfiltravimas (Adaptuota remiantis Reckhouse, 2010)

Anot EUROCONTROL (2007), STCA vizualūs įspėjimai privalo patraukti skrydžio vadovo dėmesį ir nurodyti konflikte dalyvaujančius orlaivius. Garsinis elementas gali būti įtrauktas siekiant atkreipti skrydžio vadovo dėmesį į įspėjimą. Jei yra įtrauktas nuolatinis garsinis elementas, gali būti įrengtas mechanizmas, leidžiantis nutildyti įspėjimą.




**12 pav.** STCA įspėjimas skrydžių vadovo ekrane (Adaptuota remiantis AAIU, 2020 bei EUROCONTROL, 2002)

## 1.4 MTCD, TCT, STCA palyginimas

Vidutinės trukmės laikotarpio susidūrimo grėsmės nustatymo priemonė (MTCD), taktinė skrydžių vadovo priemonė (TCT) bei trumpalaikis įspėjimas apie konfliktus (STCA) yra svarbios skydžių vadovo pagalbinės priemonės skirtos konfliktų tarp orlaivių prevencijai. Nepaisant to, kad jų bendras tikslas – didinti aviacijos saugą, jos skiriasi esminiais aspektais. MTCD – strateginis planavimo įrankis, sutelktas į eismo stebėjimą tam tikroje oro erdvėje vidutinio laiko intervalu paprastai per artėjančias 10–30 minučių. TCT siekia teikti informaciją apie trajektorijos konfliktus per artėjančias 5–8 minutes, padeda skrydžių vadovams nustatyti konfliktus savo sektoriuje, todėl yra vertingas įrankis užtikrinant minimalų saugų reikalaujamą atstumą. STCA – trumpalaikė saugos

sistema, kurios tikslas aptikti konfliktus, galinčius įvykti per artėjančias apytiksliai 2 minutes. STCA yra paskutinė gynybos linija, siekiant išvengti susidūrimų, kurie nebuvo pastebėti skrydžių vadovo. Iš analizuotos literatūros galima matyti, jog kiekviena iš šių sistemų atlieka svarbų vaidmenį aviacijos saugos kontekste, padedant sumažinti žmogiškojo veiksnio klaidas, suteikiant perspėjimus skrydžių vadovams skirtingais laiko intervalais.

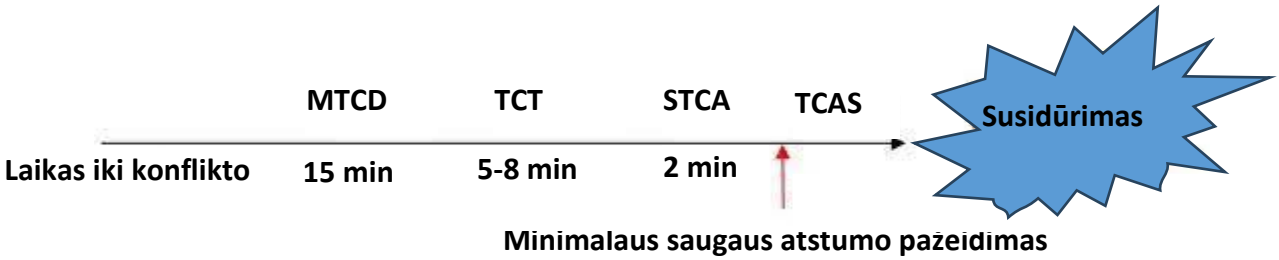
**1 lentelė**. MTCD, STCA ir TCT palyginimas (Adaptuota remiantis Humm & Abate, 2022)

| | MTCD | TCT | STCA |
|---|---|---|---|
| **Duomenys, naudojami būsimai orlaivio pozicijai nuspėti** | Skrydžio planas, skrydžio vadovo instrukcijos | Radaras, ADS-B, skrydžių planas, skrydžių vadovo instrukcijos | Radaras, ADS-B |
| **Įspėjimo iki konflikto laikas** | 20 minučių | 5 – 8 minutės | 2 minutės |
| **Realusis laikas** | Ne | Taip | Taip |
| **Naudotojas** | Skrydžių vadovai padėjėjai | Taktiniai skrydžių vadovai | Taktiniai skrydžių vadovai |
| **Paskirtis** | Planavimo įrankis (informuoti skrydžių vadovą apie galimą konfliktą, kad jį būtų galima spręsti iš anksto) | Informuoti skrydžių vadovą, jei orlaiviui duodami nurodymai sukeltų minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimą | Saugos tinklas, naudojamas įspėti skrydžių vadovą apie artėjantį minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimą |

## 1.5 Būsimo konflikto aptikimo ir vengimo priemonės, prieinamos pilotams

### 1.5.1 Oro eismo pavojaus ir susidūrimų vengimo sistema

Paskutinis saugos tinklas, apsaugantis orlaivius nuo susidūrimo, yra oro eismo pavojaus ir susidūrimų vengimo sistema (angl. *Traffic Collision Avoidance System*, TCAS) (Žr. 13 pav.)




**13 pav.** Orlaivių konflikto nustatymas ir konflikto priemonės aktyvavimas atsižvelgiant į likusį laiką iki konflikto. Adaptuota pagal Noskievič & Kraus (2017)

Tai orlaivyje sumontuota avionikos sistema, veikianti nepriklausomai nuo skrydžių vadovo, perspėjanti įgulą apie aplink esančius orlaivius, kurie potencialiai galėtų sukelti grėsmę skrydžių saugai. Anot Tarptautinės civilinės aviacijos organizacijos (angl. *International Civil Aviation Organization,* ICAO), nuo 2014 sausio 1 dienos visuose naujuose orlaiviuose, kurių maksimali kilimo masė didesnė nei 5700 kilogramų arba keleivių skaičius didesnis nei 19, turi būti aprūpinti TCAS II 7.1 versija. Nuo 2017 metų sausio 1 dienos visi orlaiviai, turėję senąją versiją, privalėjo atsinaujinti į naujausią 7.1 versiją (ICAO Annex 10, 2014). Europos Sąjungos Tarybos pasiūlyme (2022) rašoma, jog „siekiant pagerinti saugą, sumažinti nereikalingų įspėjimų skaičių, pritaikyti naujas procedūras ir sudaryti sąlygas naudoti kitus stebėjimo šaltinius, pritaikytus naujiems orlaivių tipams, taip pat sumažinti klaidingų įspėjimų skaičių“ bus siekiama įdiegti ACAS Xa sistemą. Šiame darbe aptariamas TCAS II veikimas, kadangi būtent ši versija yra labiausiai paplitusi ir taikoma aviacijoje.

AIRBUS (2018) detaliai aprašo TCAS II veikimo principą. Oro eismo pavojaus ir susidūrimų vengimo sistema yra savarankiškai veikianti ir nepriklausoma nuo navigacinės įrangos ar antžeminių oro eismo paslaugų sistemų. Norėdama aptikti aplink esančius orlaivius, sistema siunčia užklausimo signalą šalia esančių orlaivių atsakikliams (angl. *Transponder*). Užklausimas veikia panašiu principu kaip ir automatinio priklausomojo stebėjimo sistemoje ADS-B ir jo dėka TCAS II gali apskaičiuoti šiuos parametrus:

- Atstumą tarp orlaivių, apskaičiavus laiką, praėjusį nuo užklausimo iki atsakymo gavimo;
- Barometrinį aukštį, jei lėktuvo siųstuvas-imtuvas yra aprūpintas režimu C arba S;
- Orlaivio pelengą į šalia esantį orlaivį.

A. Savickas (2017) rašo, kad „nustatydama susidūrimo pavojingumą, sistema analizuoja skrydžio iki orlaivių mažiausio tarpusavio suartėjimo vietos laiką ir orlaivių aukščius. Sistema pirmenybę teikia ne atstumui tarp orlaivių, bet skrydžio iki pavojingiausios suartėjimo vietos laikui.“

Tikslesnis veikimas aprašomas AIRBUS (2018) leidinyje: TCAS II vertina laiką iki minimalaus reikalaujamo saugaus atstumo pažeidimo (graik. $\tau$, TAU), o ne pagal geometrinę CPA poziciją. Dviem orlaiviams artėjant vienas link kito toje pačioje ašyje, šis laikas gaunamas kaip santykis tarp atstumo tarp orlaivių bei jų greičių sumos.

$$TAU = \frac{d}{V_A + V_B} \tag{9}$$

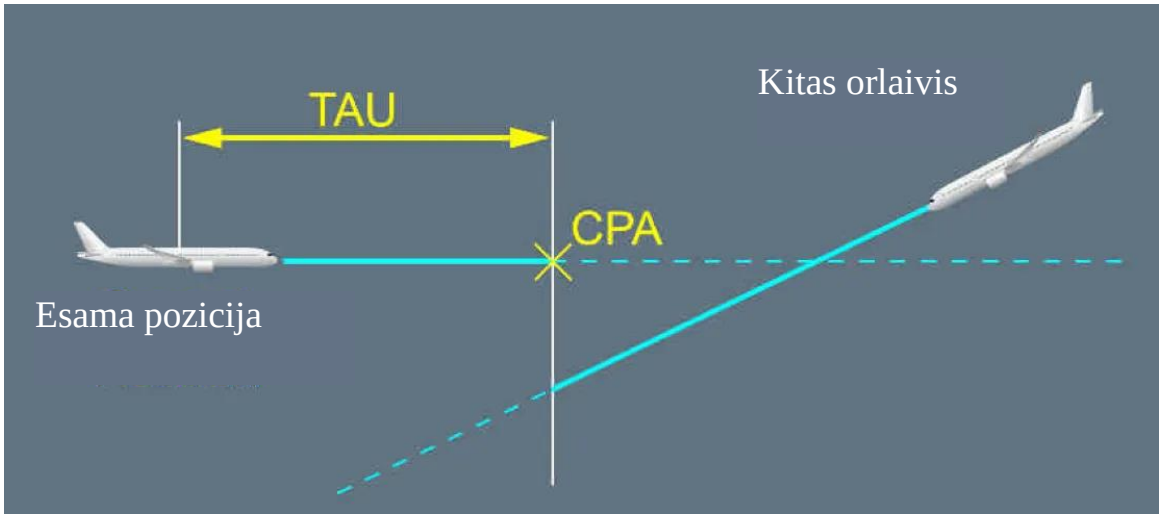
Čia,

TAU – laikas iki susikirtimo, s;

d – atstumas tarp orlaivių, m;

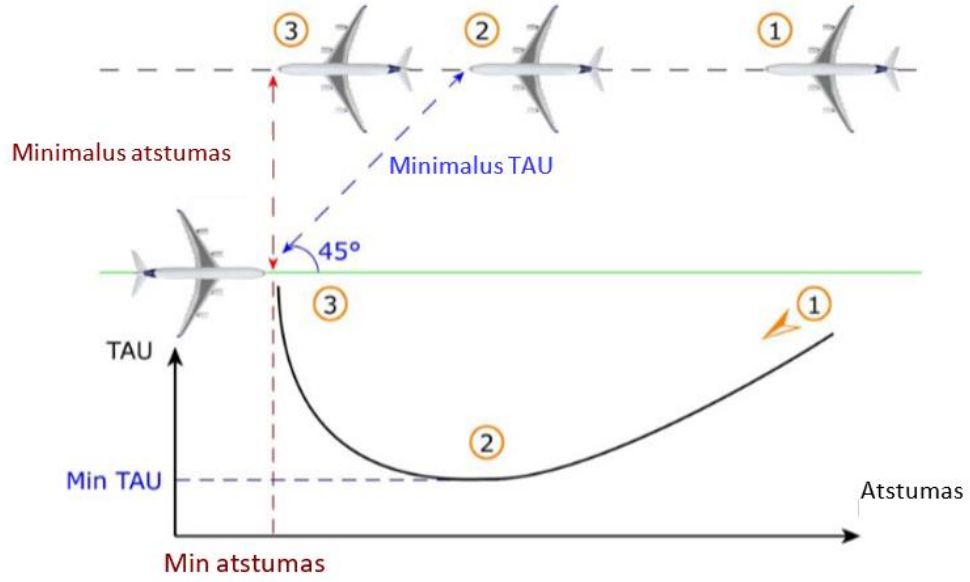
$V_A$ – orlaivio A greitis, m/s;

$V_B$ – orlaivio B greitis, m/s.




**14 pav**. Laikas iki minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimo (TAU).
(Adaptuota remiantis AIRBUS, 2018)

Susidūrimo rizika didėja, kai TAU mažėja. TCAS II pilotų kabinoje demonstruoja įspėjimą (angl. *Traffic Advisory*, TA), kai TAU peržengia iš anksto nustatytą laiką.




**14 pav.** TAU kitimas pagal atstumą tarp orlaivių (Adaptuotas remiantis AIRBUS, 2018)

EUROCONTROL (2022) metais išleistame „ACAS Guide“ leidinyje aiškinama, jog įspėjimo TA (angl. *Traffic Advisory*, TA) ir nurodymo (angl. *Resolution Advisory*, RA) zonų matmenys priklauso nuo TAU vertės. TA arba RA zonų prasiskverbimas atitinkamai inicijuoja įspėjimą arba nurodymus įgulai. TAU gali kisti priklausomai nuo orlaivio aukščio. Kuo didesnis orlaivio aukštis, tuo ilgesnis laiko tarpas iki įspėjimo įgulai.

**2 lentelė.** Laikai, kada įgulai yra sugeneruojamas įspėjimas, priklausomai nuo orlaivio aukščio (EUROCONTROL, 2022)

| Orlaivio aukštis | TAU vertės [s] | |
|---|---|---|
| | **TA** | **RA** |
| 0 – 1000 pėdų virš žemės lygio (angl. *Above Ground Level*, AGL) | 20 | Nėra RA |
| 1000 – 2350 pėdų AGL | 25 | 15 |
| 2350 pėdų – FL50 | 30 | 20 |
| FL50 – FL100 | 40 | 25 |
| FL100 – FL200 | 45 | 30 |
| FL200 – FL410 | 48 | 35 |
| Virš FL410 | 48 | 35 |

Leidinyje aprašoma, kad, kai grėsmė yra užfiksuojama, dviejų žingsnių procesas naudojamas tinkamiems nurodymams sugeneruoti. Pirmajame žingsnyje nustatoma, kuria kryptimi (aukštyn ar žemyn) būtų užtikrinamas optimaliausias vengimo manevras. Antras žingsnis nustato, kokia sparta manevras turėtų būti atliekamas. Galiausiai pilotams suteikiamos garsinės ir vaizdinės indikacijos. „Jei grėsmė susidurti nedidelė, kabinos garsiakalbyje girdisi įspėjimas *Traffic, traffic.* Jei nuotolis tarp orlaivių mažesnis, girdimos, pvz., tokios komandos*: Climb, climb; Descend, descend; Reduce climb; Increase climb* (Savickas, 2017).




**15 pav.** Pilotams navigacinio monitoriaus ekrane rodomas aplink esantis eismas (Adaptuota remiantis Flysafe project, 2011)

Apibendrinant, galima teigti, jog orlaivių susidūrimo išvengimo sistema TCAS II yra labai efektyvi mažinant susidūrimų ore riziką. Saugos tyrimai rodo, kad TCAS II sumažina susidūrimų riziką 75–95 procentais ore su orlaiviais, kurie yra įrengę tik atsakiklį, veikiantį režimais A/C, S, arba turinčiais TCAS II. (ICAO, 2012).

## 1.6 Skrydžių vadovų konflikto sprendimo pasirinkimai

Orlaivių konflikto sprendimo būdas yra priimamas skrydžio vadovo, analizuojant skrydžio plano maršrutą, radaro informaciją, remiantis savo patirtimi ir darbo mokymais (Kwangyeon, 2021). Aviacijoje yra sutinkami dažniausi trys konfliktų sprendimo tipai:

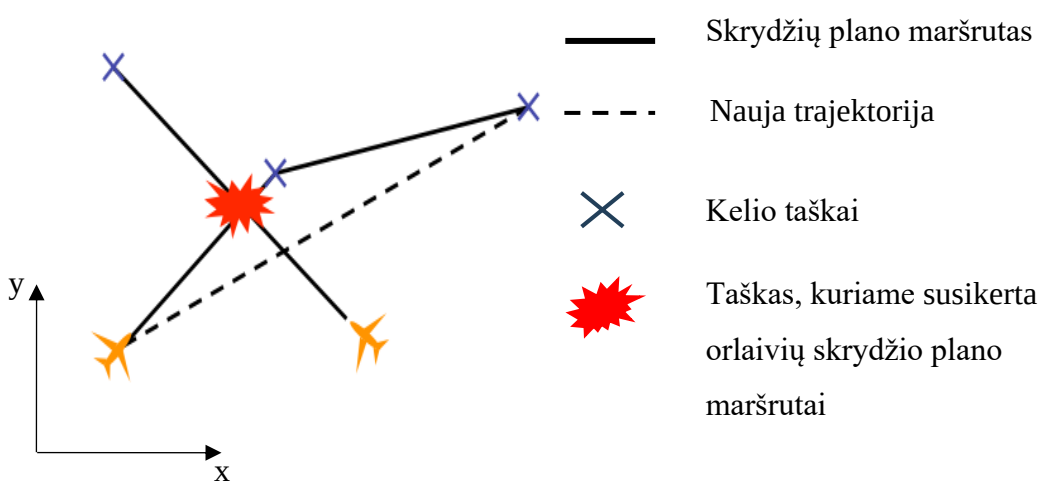
- horizontalusis skirstymas, keičiant dviejų orlaivių skrydžio kursus (Tang, 2019);
- vertikalusis skirstymas, keičiant dviejų orlaivių lygius (Krozel, 1997);
- laiko iki minimalaus saugaus atstumo pažeidimo skirstymas, keičiant orlaivių greičius (Kuenz, 2015).

Analizuojant literatūrą, nagrinėjančią horizontalų skirstymą, keičiant dviejų orlaivių skrydžio kursus, sutinkama Dubinso metodika, kuri galėtų būti pasitelkiama orlaivių konflikto sprendimo algoritmo kūrimui. Anksčiau išvardyti konflikto spendimo metodai yra pasitelkiami spręsti orlaivių konfliktus jiems jau esant ore, tačiau orlaivių išskridimo laiko tarpsnių vėlinimas (angl. SLOT) sutelkia galimybę išvengti minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimo maršrute, kol jie dar yra ant žemės. Toliau darbe bus trumpai pristatomi šie metodai bei aptariami jų privalumai bei trūkumai.

### 1.6.1 Konflikto sprendimo metodų apžvalga

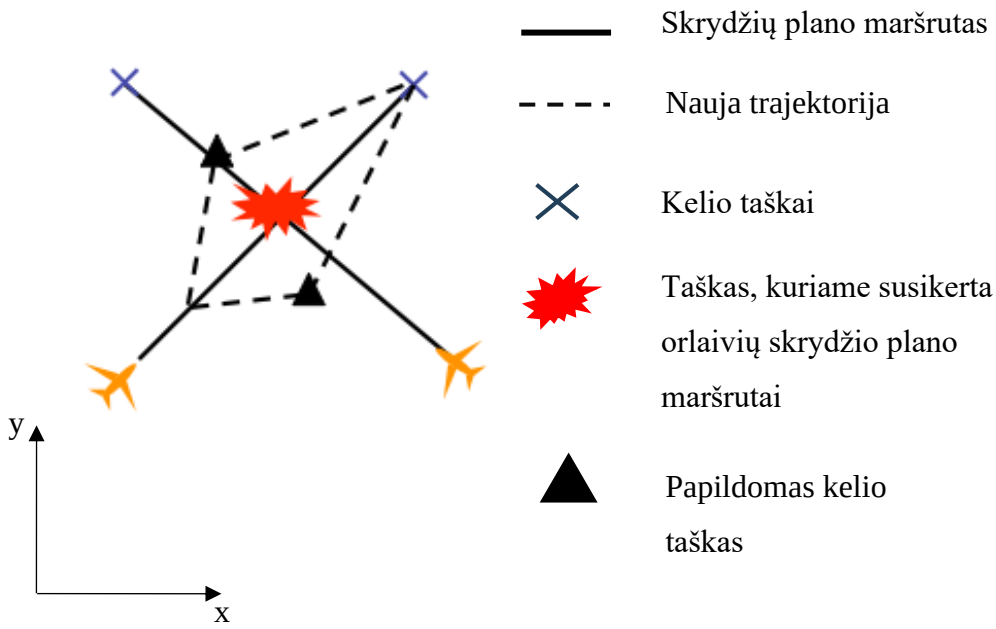
Horizontalusis skirstymas keičiant dviejų orlaivių skrydžio kursus gali būti skirstomas į kelis tipus: tiesioginis, maršruto pailginimas bei lygiagretus nuokrypis.

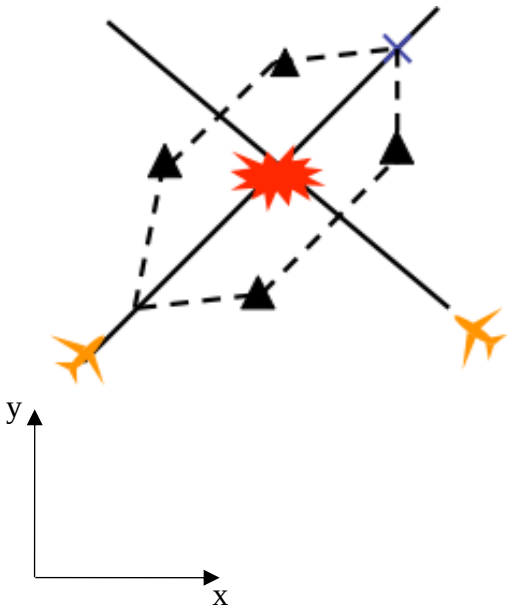
**3 lentelė**. Orlaivių konflikto sprendimo metodai

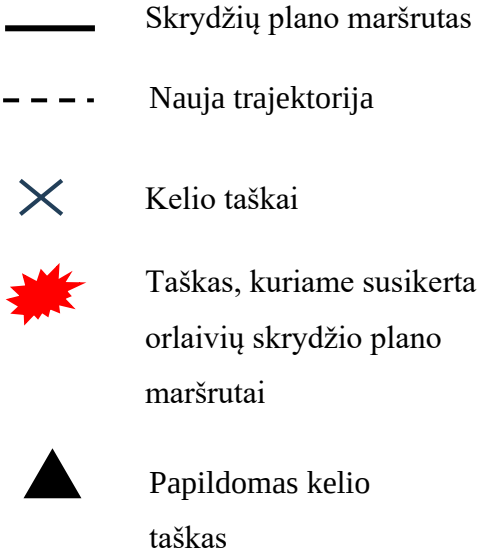
<table>
<tr><td colspan="2">Tiesioginis (angl. Direct-to)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Praleidžiamas numatytas kelio taškas ir skrendama tiesiogiai į kitą kelio tašką<br>
</td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Sutrumpinamas maršruto laikas, degalų sąnaudos mažėja atitinkamai</td><td>Jei abu orlaiviai skrenda tiese, neįmanoma praleisti kelio taško (angl. Waypoint)</td></tr>
<tr><td>Tiesioginis kelio taškų kirtimas dažnai pasitaiko skrydžio maršrute</td><td></td></tr>
</table>

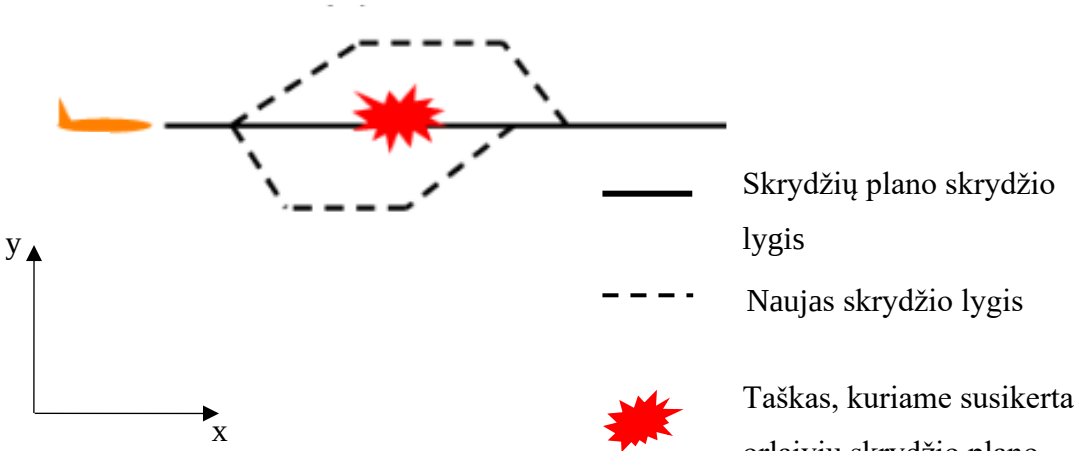
| |
|---|
| Autoriai: Erzberger, 2010; Dudoit, 2022 |

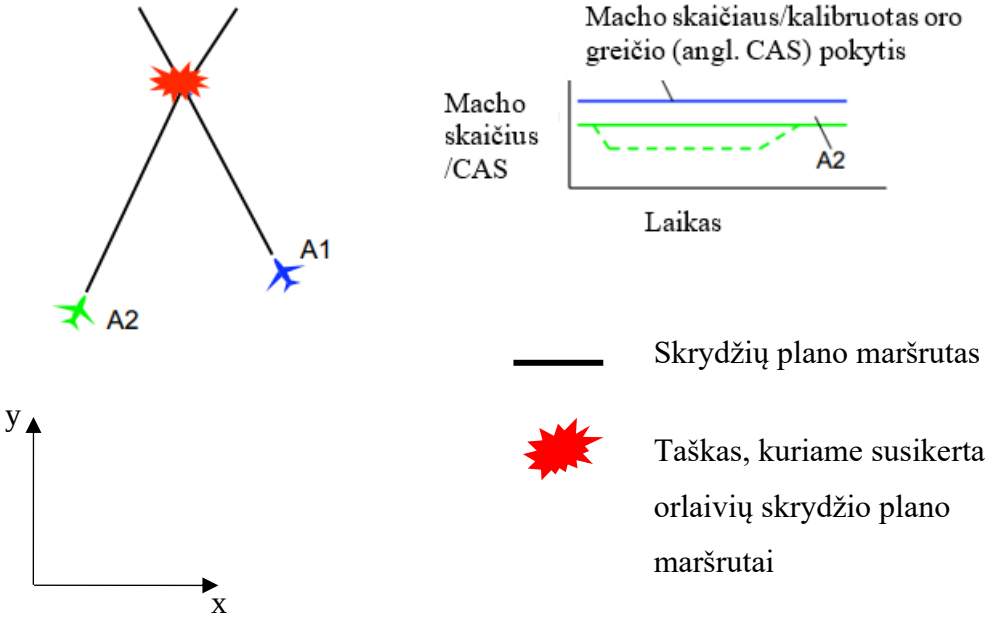
3 lentelės tęsinys

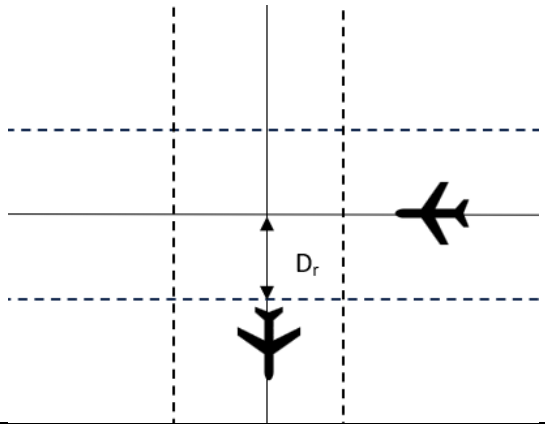
| Maršruto pailginimas (angl. *Path Stretch*) | |
|---|---|
| Kurso keitimas nukrypstant nuo suplanuoto maršruto, siekiant išvengti konflikto, ir grįžimas į skrydžio plano maršrutą, kai konfliktas yra išspręstas   | |
| Privalumai | Trūkumai |
| Pateikiama daugiau nei viena konflikto sprendimo trajektorija | Papildomo kelio taško įvedimas sukelia papildomą krūvį pilotams |
| | Papildomos degalų sąnaudos, pailginamas skrydžio laikas |
| Autoriai: Erzberger, 2010; Dudoit, 2022; Donciu, et al., 2011 | |

<table>
<tr><td colspan="2">Lygiagretus nuokrypis (angl. Route Offset)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Skrendama segmentu, kuris yra lygiagretus konfliktiniam maršrutui ir nuo jo nukrypstama atitinkamu atstumu, užtikrinančiu minimalų saugų reikalaujamą atstumą tarp orlaivių<br>


</td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Skrydžio programinio valdymo sistemą galima suprogramuoti skristi lygiagrečiai originalaus maršruto</td><td>Tinka tik konfliktuojančioms trajektorijoms, esančioms tiesioje maršruto dalyje</td></tr>
<tr><td></td><td>Papildomos degalų sąnaudos, pailginamas skrydžio laikas</td></tr>
<tr><td colspan="2">Autoriai: Erzberger, 2010; Dudoit, 2022; Donciu et al. 2011</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">Vertikalusis</td></tr>
<tr><td colspan="2">Instrukcija skraidančiam orlaiviui pakilti/nuleisti iki skrydžio vadovo nurodyto skrydžio lygio, o konflikto grėsmei praėjus, grįžti į pirminį skrydžio lygį<br>
</td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Sparčiausiai pritaikomas metodas</td><td>Orlaivių, kurių kilimo masė yra arti maksimalios, kopimas į aukštesnį skrydžio lygį gali būti lėtesnis arba neįmanomas dėl orlaivio eksploatacinių savybių</td></tr>
<tr><td>Nekeičiamas skrydžio maršrutas</td><td>Žemesnis skrydžio lygis padidina degalų sąnaudas</td></tr>
<tr><td colspan="2">Autoriai: Erzberger, 2010; Dudoit, 2022; Donciu et al., 2011; Guleria et al., 2021; Krozel et al., 1997</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">Orlaivių/orlaivio greičio keitimas</td></tr>
<tr><td colspan="2">Dviejų orlaivių konflikto ore išsprendimas, keičiant jų greitį<br>
</td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Nėra keičiami skrydžių maršrutai</td><td>Dėl lėktuvo inercijos greičio padidinimas ar sumažinimas gali užtrukti</td></tr>
<tr><td>Nėra užkraunamas didelis krūvis pilotams bei skrydžių vadovams</td><td>Dėl orlaivio eksploatacinių savybių ar oro sąlygų šis metodas ne visada gali būti panaudojamas</td></tr>
<tr><td></td><td>Šis metodas nėra efektyvus esant priešpriešinio (angl. head-on) konflikto situacijai</td></tr>
<tr><td colspan="2">Autoriai: Erzberger, 2010; Dudoit, 2022; Cetek, 2009; Archambault, 2004; Breil et al., 2016</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2">Išskridimo laiko tarpsniai</td></tr>
<tr><td colspan="2">Skrydžio pakilimo laiko vėlinimas (angl. SLOT) siekiant išvengti minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo pažeidimo maršrute<br>Ant žemės Ore<br><br></td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Skrydžio vėlavimas orlaiviui esant ant žemės yra pigesnis nei orlaivio vėlavimas jam skrendant maršrutu</td><td>Mažas patikimumas dėl orlaivių techninių parametrų (greičių), vėjo įtakos</td></tr>
<tr><td>Saugus, efektyvus bei ekonomiškas metodas</td><td>Laiko tarpsniai ant žemės (angl. SLOT) sukelia oro uosto infrastruktūroje spūstis: RT, KTT, perone</td></tr>
<tr><td colspan="2">Autoriai: Dudoit, 2022; Hamdan, 2022; Barnier & Allignol, 2009; Xiangmin et al., 2013</td></tr>
</table>

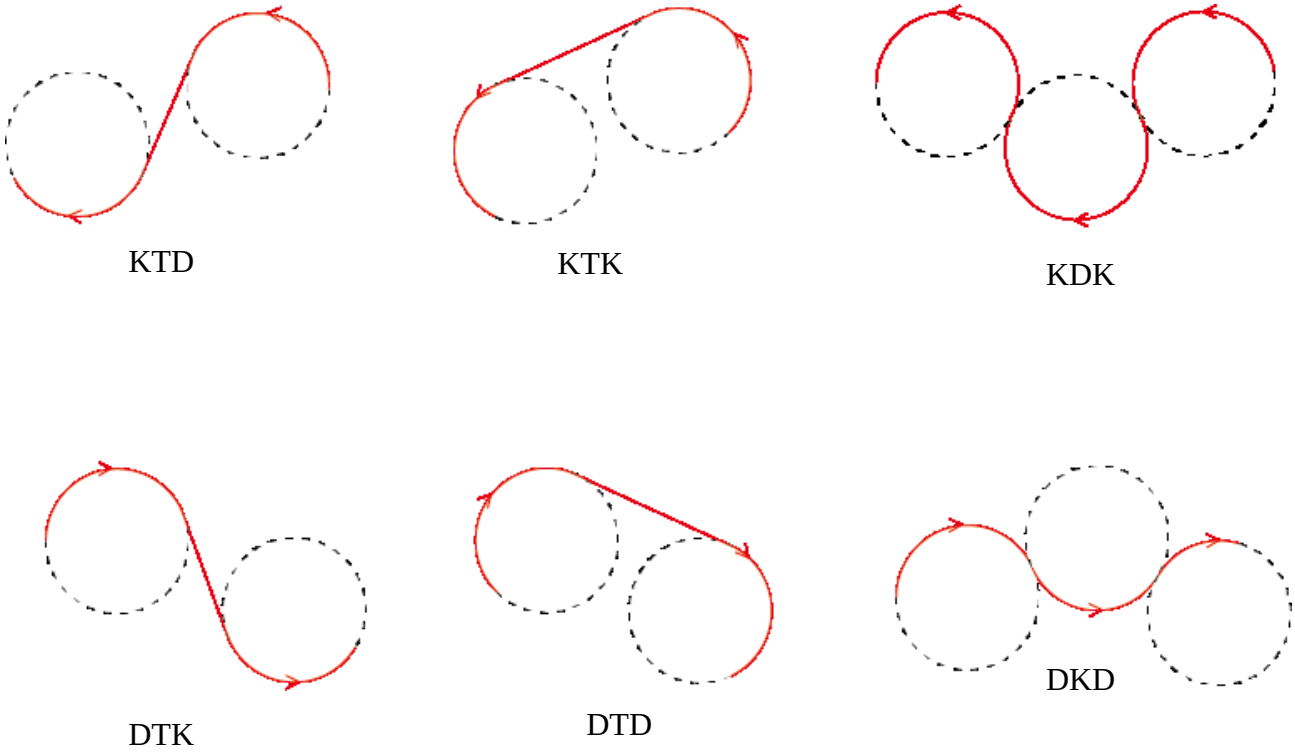
1. Daugumoje konflikto situacijų, kurios gali būti išspręstos horizontaliu skirstymu, keičiant orlaivio skrydžio kursą, tiesioginiam (angl. *Direct-to*) sprendimo metodui yra teikiama pirmenybė dėl sutrumpinamo maršruto laiko ir degalų sąnaudų sumažinimo (Kwangyeon Kim, 2021).
2. Orlaivių greičių keitimas nėra toks efektyvus kaip anksčiau aprašyti konflikto vengimo manevrai, tačiau tyrimai rodo, kad šio metodo pritaikymas kartu su horizontaliu skirstymu keičiant orlaivių skrydžio kursą gali pagerinti efektyvų oro erdvės panaudojimą (Cetek, 2009).
3. Vertikalus skirstymas keičiant skrydžio lygį yra palankiausias taktinis konfliktų sprendimo metodas dėl greito pritaikymo, efektyvesnio oro erdvės panaudojimo (orlaiviui reikia tik 1000 pėdų vertikaliam, minimaliai saugiam atstumui palaikyti palyginus su 5 jūrmylėmis horizontalaus

atstumo), aerodinamiškai pranašesnis t.y. pasipriešinimas skrydžio lygio keitimo metu yra mažesnis nei orlaiviui atliekant posūkį (Krozel, 1997).

4. Orlaivio užlaikymas yra ekonomiškas, saugus konflikto sprendimų metodas, tačiau gali sukelti grūstis perone, kilimo ir tūpimo ar riedėjimo takuose, be to patikimumą mažina vėjo ir orlaivio techninių parametrų įtaka (Dudoit, 2023).

### 1.6.2 Dubinso kreivės

Viena iš pagrindinių trajektorijos planavimo problemų yra optimalaus kelio parinkimas. Netaikant jokių ribojimų, šios problemos sprendimas yra tiesė, tačiau atsižvelgiant į orlaivio valdymo savybes, trajektorijoje turi būti naudojamos kreivės (Stephens, 2021). Metodas, kaip rasti trumpiausią kelią, naudojant apskritimo kreives, pirmą kartą buvo pristatytas Dubinso darbe (Dubins, 1957). Dubinso metodikos taikymas planuojant judėjimo maršrutus yra paremtas veiksmų su vektoriais atlikimu (Skačkauskas, 2021). Dubinsas nustatė, jog yra šeši trumpiausi junginiai, sudaryti kombinuojant kreives bei tiesias linijas, kurie gali sujungti pradžios ir paskirties vietas (Flämig et al., 2023). Šie navigaciniai manevrai pažymėti pagal jų pradines raides „T“ – tiesiai „K“ – kairė ir „D“ – dešinė: DTK, KTD, DKD, KDK, DTD, KTK (Yardimci et al., 2019).

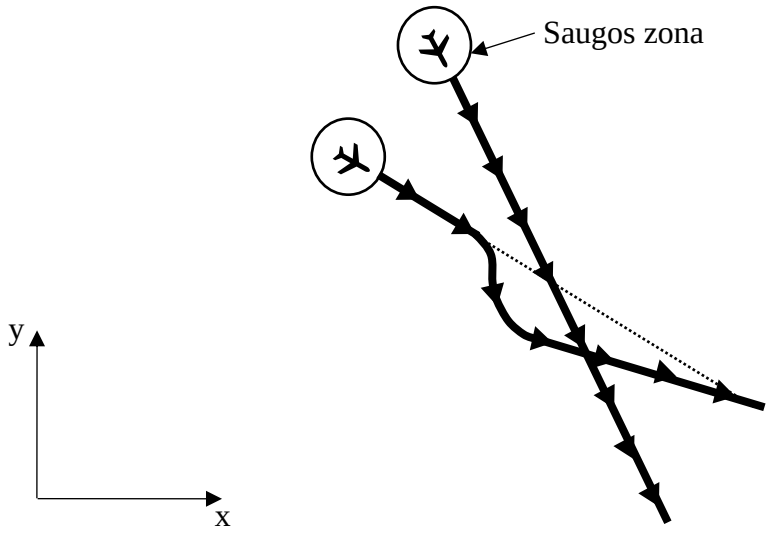



**16 pav.** Šeši Dubinso kreivių pavyzdžiai (Adaptuota remiantis Zhang et at., 2021)

Dubinso kreivės aviacijoje naudojimas dažnai pritaikomas bepiločių orlaivių (angl. *Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) judėjimui (Shanmugavel et al., 2007). Pastarajame darbe pabrėžiamas

Dubinso metodo skaičiavimų bei manevrų, reikalingų skristi Dubinso kreivėmis, paprastumas. Komercinėje aviacijoje Dubinso kreivės gali būti panaudotos orlaivio trajektorijos modeliavimui esant avarinei situacijai. Vienas iš pagrindinių iššūkių avarinėse situacijose yra saugus ir spartus lėktuvo nutupdymas ant žemės. Mokslininkų (Flämig et al., 2023; Haghighi et al., 2022) darbuose, pasitelkiant Dubinso kreives ir jų savybę sudaryti trumpiausią maršrutą tarp dviejų pasirinktų taškų, kuriamas optimizavimo modelis, kuris parinktų racionaliausią, saugiausią trajektoriją iki pasirinktos lėktuvo tupdymo vietos. Dubinso metodas gali būti panaudojamas skrydžio maršruto optimizavimui laiko atžvilgiu (Chitsaz & LaValle, 2007). Vienas iš privalumų naudojant Dubinso metodą yra tai, jog trajektorijos ilgis yra lengvai gaunamas, nes trajektorijos sudarytos iš apskritimų kreivių ir tiesių segmentų. Trumpiausias maršrutas laiko atžvilgiu būtų randamas apskaičiuojant trajektorijų ilgius ir pasirenkant trumpiausią (Stephens, 2021). Kaip remiantis šiomis savybėmis Dubinso metodas yra panaudojamas modeliuoti konflikto sprendimo trajektoriją, išlaikant minimalų saugų atstumą tarp orlaivių, yra aprašomas Dudoit (2023) disertacijoje. Pagal Dudoit (2023), vieno orlaivio trajektorija, norint išlaikyti saugų reikalaujamą atstumą, būtų pakeista pagal Dubinso koncepciją, tuo tarpu kitas orlaivis galėtų skristi savo pirmine trajektorija nekeisdamas kurso.

**4 lentelė**. Orlaivių konflikto sprendimo Dubinso metodu vertinimas

<table>
<tr><td colspan="2">Dubinso metodas</td></tr>
<tr><td colspan="2">
</td></tr>
<tr><td>Privalumai</td><td>Trūkumai</td></tr>
<tr><td>Keičiama 1-o orlaivio trajektorija</td><td>1-o orlaivio trajektorija yra ilgesnė, dėl to padidėja degalų sąnaudos</td></tr>
</table>

| | |
|---|---|
| 2-o orlaivio trajektorija nekeičiama | Intensyvus SV stebėjimas, ar orlaivis atlieka nustatytuose taškuose posūkius |
| Horizontalusis konflikto (konfliktinės situacijos) sprendimo būdas (išnaudojami oro erdvės resursai) | Momentinis orlaivio kurso keitimas |
| Autoriai: Dudoit, 2023; Stephens, 2021 | |

## 1.7 Pirmojo skyriaus išvados

Atlikus literatūros apžvalgą, daromos tokios išvados:

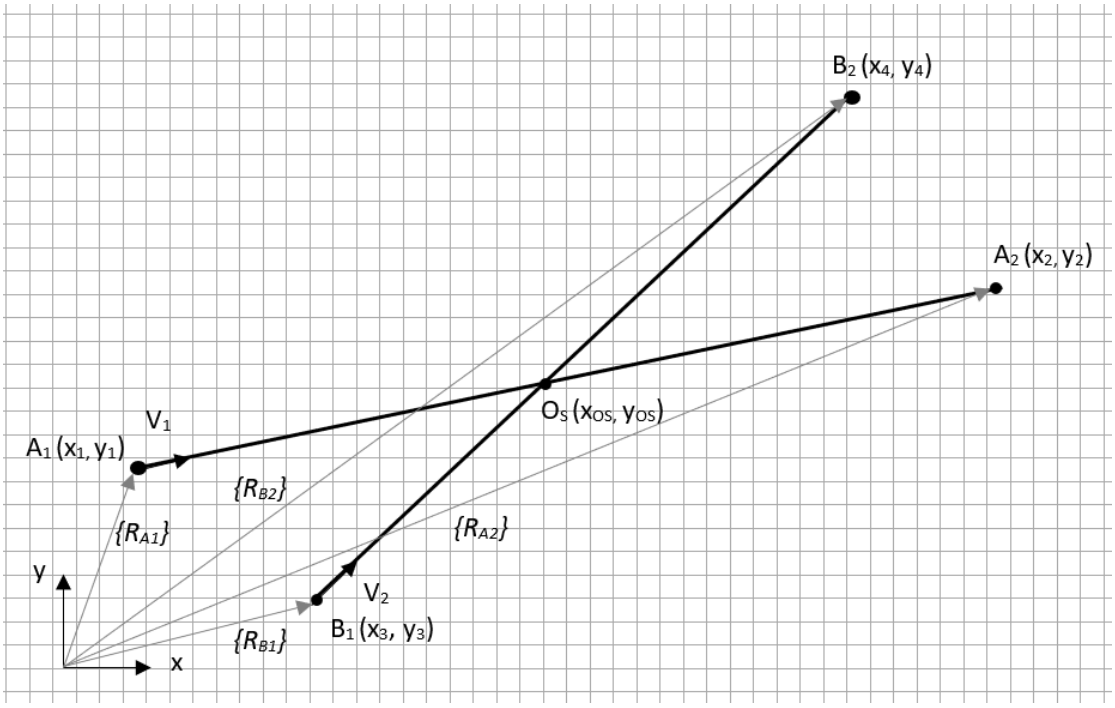
1. EUROCONTROL prognozuojamas oro eismo augimas (2025 metais skrydžiai pasieks 2019 metų skaičius (11,1 milijono) ir toliau kasmet augs apie 1,5 %) sukelia iššūkių oro eismo valdymo sistemoms palaikyti efektyvų ir saugų orlaivių judėjimą. Didėjant darbo krūviui, kyla poreikis vystyti ir tobulinti sistemas, galinčias aptikti konfliktines situacijas ir saugiai bei racionaliai išspręsti konfliktines situacijas t.y. palaikant reikalaujamą saugų atstumą tarp orlaivių bei leidžiant orlaiviams kuo mažiau nukrypti nuo suplanuotų skrydžio plano trajektorijų.
2. Skrydžių vadovams prieinamos antžeminės sistemos skirtos įspėti apie artėjantį konfliktą, tačiau jo saugus ir racionalus sprendimas priklauso nuo skrydžių vadovo ir jo turimos patirties, gautų mokymų, situacijos sudėtingumo bei turimo laiko konfliktui išspręsti. Tinkamas algoritmas, įvertinantis konflikto manevro sudėtingumą, ekonomiškumą bei racionalumą, padidintų oro eismo saugą, užtikrintų racionalias skrydžio trajektorijas, sumažintų skrydžių vadovo darbo krūvį, nuovargį, streso lygį, neteisingų sprendimų pasirinkimą.
3. Tinkamo algoritmo veikimas galėtų būti paremtas Dubinso koncepcija. Nagrinėtoje literatūroje pabrėžiama Dubinso metodo savybė racionaliai ir saugiai išspręsti orlaivių konfliktą, modeliuojant trumpiausią maršrutą horizontalioje plokštumoje tarp dviejų taškų, kuo mažiau nukrypstant nuo suplanuoto skrydžio plano maršruto, kuris būtų tiesi linija. Kadangi maršrutas yra sudaromas naudojant tieses ir apkritimo kreives, trajektorijos ilgis yra lengvai apskaičiuojamas. Tai leidžia įvertinti papildomas degalų sąnaudas bei laiką reikalingą atlikti vengimo manevrą.

# 2. ORLAIVIŲ MINIMALAUS SAUGAUS ATSTUMO PAŽEIDIMO SPRENDIMO ALGORITMAS

Atlikus literatūros analizę, yra siūloma taikyti Dubinso metodą, orlaivių konflikto sprendimo tyrimui. Toliau yra nagrinėjama situacija, kai vieno orlaivio trajektorija yra pakeičiama skristi Dubinso metodu, apskritimo perimetru, o antrojo orlaivio trajektorija paliekama pagal suplanuoto skrydžio plano maršrutą. Šioje situacijoje, nekeičiant skrydžio maršrutų, orlaivių greičiai yra tokie, jog jų susidūrimo taškas yra $O_S$.

Konfliktinės situacijos pavyzdys yra pateikiamas Dudoit (2022) disertacijoje:

1. Vienas orlaivis yra taške $A_1$, kurio koordinatės ($x_1$, $y_1$, z), o kitas orlaivis (B) yra taške $B_1$, kurio koordinatės ($x_3$, $y_3$, z).
2. Taškai $A_2$ ($x_2$, $y_2$, z) ir $B_2$ ($x_4$, $y_4$ ir z) nurodo orlaivių vykimo vietą, jų judėjimo trajektoriją.
3. Abu orlaiviai yra tame pačiame oro erdvės sektoriuje, kuriame galioja 5 jūrmylių horizontalų skirstymas.
4. Šių orlaivių trajektorijos yra nagrinėjamos dvimatėje erdvėje, tame pačiame skrydžių lygyje, vadinasi nėra taikomas 1000 pėdų vertikalusis skirstymas.




**17 pav**. Orlaivio trajektorijų susikirtimo pavyzdys (Adaptuota remiantis Dudoit, 2023)

Naudojant orlaivių pradžios ir galutinius taškus išreikštus vektoriais, galima gauti abiejų orlaivių trajektorijas.

$$T_A = R_{A1,A2} = R_{A2} - R_{A1} \tag{10}$$

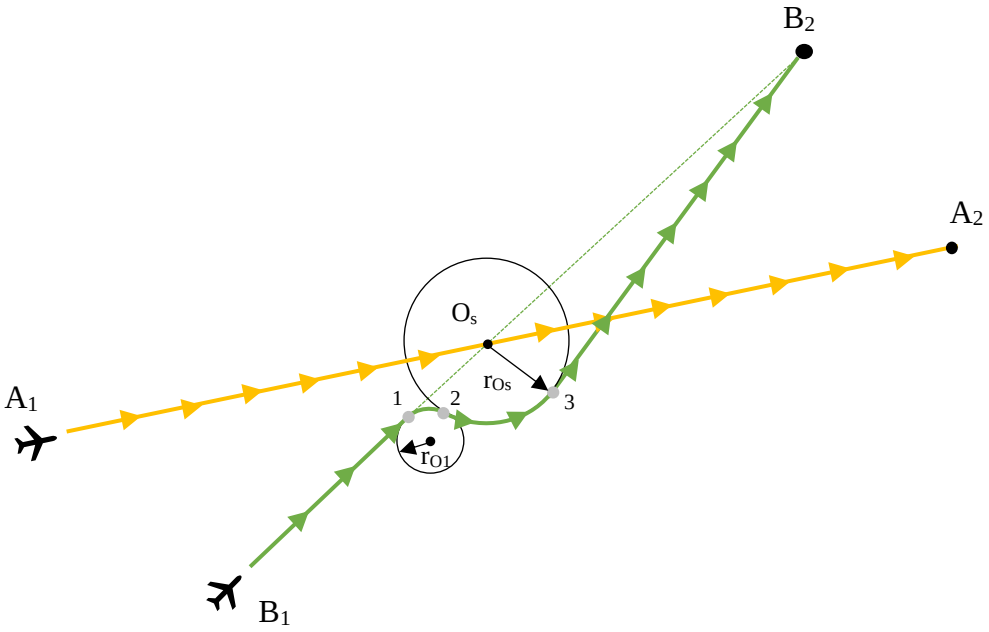
$$T_B = R_{B1,B2} = R_{B2} - R_{B1} \tag{11}$$

čia:

$$R_{A1}^T = [x_1, y_1], R_{A2}^T = [x_2, y_2], R_{B1}^T = [x_3, y_3], R_{B2}^T = [x_4, y_4]$$

Taško $O_S$ koordinatės, kuriame susiduria dviejų orlaivių trajektorijos, $T_{A1}$ ir $T_{B2}$ išreiškiamos taip (Weisstein, 2019):

$$R_{Os} = \begin{bmatrix} \frac{(x_1y_2 - y_1x_2)(x_3 - x_4) - (x_1 - x_2)(x_3y_4 - y_3x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)} \\ \frac{(x_1y_2 - y_1x_2)(x_3 - x_4) - (x_1 - x_2)(x_3y_4 - y_3x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)} \end{bmatrix} \tag{12}$$




**18 pav**. Orlaivių konflikto sprendimas Dubinso metodu (sudaryta autorės remiantis Dudoit, 2023)

Taškas $O_s$ yra svarbus parametras tolimesniam dviejų orlaivių konflikto sprendimo algoritmo kūrimui.

Norint įvertinti Dubinso metodo efektyvumą išspręsti konfliktą saugiausiu bei racionaliausiu būdu, reikia įvertinti, skrydžio trajektorijos ilgį, trukmę bei atstumą tarp orlaivių bet kuriame jų trajektorijos taške. Trajektorija $T_{A1}$ susideda iš vienos atkarpos $\overline{A_1, A_2} = R_{A\,2} - R_{A_1}$. Orlaivio B trajektorija yra brėžiama naudojant apskritimų $O_1$ ir $O_S$, kurių spinduliai lygus $r_{O1}$ ir $r_{Os}$, kreives. Orlaivis B juda palei apskritimo $O_S$ perimetrą, orlaivis A juda tiese per apskritimo $O_S$ centrą. $O_S$ apskritimo pradinis spindulys yra 5 jūrmylės, vertinant minimalų saugų atstumą. Maršruto ilgiui apskaičiuoti, trajektorija yra suskirstoma į būdingus trajektorijos punktus: punktą 1, punktą 2 ir punktą 3. A. Dudoit disertacijoje (2022) aprašomi būdingi trajektorijos punktai:

- 1 punktas – punktas, kuriame trajektorija $T_B$ liečiasi su apskritimo $O_1$ kontūru ir statmeniu, nubrėžtu iš šio apskritimo centro.
- 2 punktas – punktas, kuriame apskritimo $O_1$ kontūras liečiasi su apskritimo $O_S$ kontūru
- 3 punktas – punktas, kuriame tiesi linija, einanti per tašką $B_2$, liečiasi su apskritimo $O_S$ kontūru (liestinė).

Orlaivio B trajektorija $T_B$ yra sudaryta iš keturių atkarpų:

1. Atkarpa $\overline{B_1, 1} = R_1 - R_{B_1}$, kur $R_1$ yra vektorius gaunamas nuo koordinačių sistemos pradžios iki 1 būdingo taško.
2. Atkarpa $\widetilde{1,2}$, atstumas tarp būdingų trajektorijos punktų 1 ir 2.
3. Atkarpa $\widetilde{2,3}$, atstumas tarp būdingų trajektorijos punktų 2 ir 3.
4. Atkarpa $\overline{3, B_2} = R_{B_2} - R_3$, kur $R_3$ yra vektorius jungiantis būdingą punktą 3 ir galinį tašką $B_2$.

1 būdingas taškas yra reikalingas norint nustatyti Dubinso trajektorija judančio orlaivio konfliktinės situacijos sprendimo manevrų pradžią. Šis punktas turi būti parenkamas atsižvelgiant į oro eismo saugos reikalavimus bei trajektorijos racionalumą. Jeigu konflikto vengimo veiksmas yra pradedamas per anksti, manevras bus atliekamas mažesnėmis amplitudėmis, komfortiškesnis, tačiau padidės bendras nuskristo atstumo ilgis, degalų ir $CO_2$ sąnaudos. Jei manevras atliekamas vėluojant, minimalus saugus reikalaujamas atstumas tarp orlaivių gali būti neužtikrinamas, atliekami staigūs manevrai. Būdingo 1 punkto koordinačių radimas aprašomas taip:

$$R_1 = R_{B_1,1} + R_{B_1}. \tag{13}$$

Segmento $B_1 - 1$ ilgis žymimas $L_{B,1}$. Vektorius, apibūdinantis atkarpą $B_1 - 1$, išreiškiamas kaip:

$$R_{B_1,1} = L_{A_1,1} \cdot e_{1,O_S}. \tag{14}$$

Vienetinis vektorius $e_{1,O_S}$ randamas taip:

$$e_{1,O_S} = \frac{R_{B_1,O_S}}{L_{B_1,O_S}}. \quad (15)$$

Priklausomybės vardiklis (15) išreiškiamas atkarpos $B_1$, $O_S$ ilgiu, kuris apskaičiuojamas taip:

$$L_{B_1,O_S} = \sqrt{R_{B_1,O_S}^T \cdot R_{B_1,O_S}}. \quad (16)$$

Iš (14) formulės $L_{B_1,1}$ ilgis gaunamas taip:

$$L_{B_1,1} = L_{B_1,O_S} - L_{1,O_S}, \quad (17)$$

Čia

$$L_{1,O_S} = \sqrt{\left(r_{O_1} + r_{O_S}\right)^2 - r_{O_1}^2}. \quad (18)$$

Toliau yra skaičiuojamas būdingo punkto 2 koordinatės, orlaivis pradeda judėti išilgai apskritimo $O_S$ perimetru.

$$R_2 = R_{O_1} + R_{O_1,2} = R_{O_1} + r_{O_1} \cdot e_{O_1,Os}. \quad (19)$$

Apskritimo $O_1$ centro vektorius $R_{O_1}$ yra randamas taip:

$$R_{O_1} = R_1 + R_{1,O_1} = R_1 + r_{O_1} \cdot e_{1,O_1}. \quad (20)$$

Vieneto vektorius $e_{1,O_1}$, kuris yra statmenas atkarpai $B_1O_S$ gali būti apibūdintas kaip:

$$e_{1,O_1} = e_n \times e_{1,Os}, \quad (21)$$

Kur vienetinis vektorius $e_n$ yra lygus:

$$e_n^T = [0, 0, 1]. \quad (22)$$

Vienetinis vektorius $e_{O_1,Os}$ yra apibūdinamas kaip:

$$e_{O_1,Os} = \frac{R_{O_1,Os}}{L_{O_1,Os}} = \frac{R_{O_1,Os}}{r_{O_1} + r_{Os}}. \quad (23)$$

Toliau orlaivis apskritimo perimetru juda link būdingo punkto 3 koordinačių. Nuo šio taško orlaivis pradeda judėti tiese link trajektorijos $T_B$ galinio taško $B_2$. Būdingo taško 3 gali būti randamas brėžiant liestinę nuo taško $B_2$ iki apskritimo $O_s$ kontūro. Yra galimi du atvejai, į kuriuos reikia atsižvelgti:

1. Kai tiesės $B_1$, $B_2$ koordinatė $y_{B_1}$ yra auksčiau nei $y_{B_2}$

$$x_3 = x_{Os} + \frac{r_{Os}}{L^2_{O_S,B_2}}\left[r_{Os}\left(x_{B_2} - x_{O_S}\right) - \left(y_{B_2} - y_{O_S}\right)\sqrt{L^2_{O_S,B_2} - r^2_{Os}}\right]; \quad (24)$$

$$y_3 = y_{Os} - \sqrt{r^2_{Os} - (x_3 - x_{Os})^2}\,; \quad (25)$$

2. Kai tiesės $B_1$, $B_2$ koordinatė $y_{B_1}$ yra žemiau nei $y_{B_2}$

$$x_3 = x_{os} + \frac{r_{Os}}{L^2_{O_S,B_2}}\left[r_{Os}\left(x_{B_2} - x_{Os}\right) + \left(y_{B_2} - y_{Os}\right)\sqrt{L^2_{O_S,B_2} - r^2_{Os}}\right]; \quad (26)$$

$$y_3 = y_{Os} + \sqrt{r^2_{Os} - (x_3 - x_{Os})^2}\,. \quad (27)$$

Praskridęs būdingą punktą 3, orlaivis grįžta į pradinę trajektoriją. Apskaičiavus būdingus trajektorijos punktus, toliau galima rasti skrydžių trukmę bei trajektorijos ilgį. Atsižvelgiant į būdingų punktų seką, bendra ilgis išreiškiamas taip:

$$L^{Dubins}_{B_1,B_2} = L_{B_1,1} + L_{1,2} + L_{2,3} + L_{3,B_2}, \quad (28)$$

Atkarpa $L_{1,2}$ randama pagal formulę:

$$L_{1,2} = \alpha_{1,2} \cdot r_{O_1}, \quad (29)$$

Čia

$$\alpha_{1,2} = arccos\frac{R_1 \cdot R_2}{r^2_{O_1}}, \quad (30)$$

Atkarpa $L_{2,3}$ randama pagal formulę:

$$L_{2,3} = \alpha_{2,3} \cdot r_{O_S}, \quad (31)$$

Čia

$$\alpha_{2,3} = arccos\frac{R_2 \cdot R_3}{r^2_{O_S}}, \quad (32)$$

$$L_{3,B_2} = \sqrt{\left(R_{B_2} - R_3\right)^T \cdot \left(R_{B_2} - R_3\right)}. \quad (33)$$

Orlaivio B skrydžio laikas, jam skrendant pastoviu greičiu išreiškiamas:

$$t_{B_1,B_2}^{Dubins} = \frac{L_{B_1,B_2}^{Dubins}}{V_1}. \quad (34)$$

## 2.1 Tyrimo metodika

Skaitiniam konfliktinės situacijos sprendimo tyrimui atlikti yra naudojama „MapleSoft“ programinė įranga. Pasak Girnytės (2004), „ši sistema daugiau orientuota į sudėtingų matematinių uždavinių sprendimą“, tačiau pasižymi grafinio vizualizavimo bei animacijos priemonėmis. Remiantis Dudoit (2022) disertacija, kurioje Dubinso trajektorija buvo generuojama pasitelkus „MapleSoft“ programavimo kalbą, kodo parametrai buvo pakoreguoti norint gauti tiriamųjų kampų rezultatus. Kodo įvesties parametrai, reikalingi norint pradėti modeliavimą, yra pradžios ir pabaigos punktų koordinatės. Orlaivio trajektorijos pradžios ir galinių koordinačių radimui prie atitinkamų kampų buvo pasitelktos orlaivių konflikto koordinatės bei 35° kampo koordinatės naudojamos Dudoit (2022) darbe:

$$R_{O_s}^T = [(49{,}84; 49{,}92)]$$
$$R_{A_1}^T = [30, 41];\ R_{A_2}^T = [70, 59]$$
$$R_{B_1}^T = [40, 34];\ R_{B_2}^T = [61, 68]$$

Koordinatės prie tiriamųjų kampų randamos pasukant orlaivio, skrendančio Dubinso metodu, trajektoriją esant 35° kampui (pastarosios koordinatės yra paimamos iš A. Dudoit disertacijos) aplink tašką $O_S$ prieš arba pagal laikrodžio rodyklę, pagal formules.

Sukant prieš laikrodžio rodyklę:

$$x_P = (x_{35°_P} - x_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) - (y_{35°_P} - y_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + x_{R_{OS}}; \quad (35)$$

$$y_P = (x_{35°_P} - x_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_P} - y_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + y_{R_{OS}}; \quad (36)$$

$$x_G = (x_{35°_G} - x_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) - (y_{35°_G} - y_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + x_{R_{OS}}; \quad (37)$$

$$y_G = (x_{35°_G} - x_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_G} - y_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + y_{R_{OS}}; \quad (38)$$

Sukant pagal laikrodžio rodyklę:

$$x_P = (x_{35°_P} - x_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_P} - y_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + x_{R_{OS}}; \quad (39)$$

$$y_P = -(x_{35°_P} - x_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_P} - y_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + y_{R_{OS}}; \quad (40)$$

$$x_G = (x_{35°_G} - x_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_G} - y_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + x_{R_{OS}}; \quad (41)$$

$$y_G = -(x_{35°_G} - x_{R_{OS}}) \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + (y_{35°_G} - y_{R_{OS}}) \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) + y_{R_{OS}}. \quad (42)$$

Kur:

$x_P -$ orlaivio B pradinė koordinatė prie pasirinkto tiriamojo kampo x ašyje;

$x_{35°_P} -$ orlaivio B pradinė koordinatė esant 35° kampo x ašyje;

$x_{R_{OS}} -$ orlaivių A ir B trajektorijų susikirtimo koordinatė x ašyje;

$\alpha -$ kampas laipsniais, kuriuo pasukama 35° kampo Dubinso trajektorija, norint gauti pasirinktą tiriamąjį kampą;

$y_{35°_G} -$ orlaivio B galinė koordinatė esant 35° kampo y ašyje;

$y_{R_{OS}} -$ orlaivių A ir B trajektorijų susikirtimo koordinatė y ašyje;

$x_{35°_G} -$ orlaivio B galinė koordinatė esant 35° kampo x ašyje;

$y_P -$ orlaivio B pradinė koordinatė prie pasirinkto tiriamojo kampo y ašyje;

$y_{35°_P} -$ orlaivio B pradinė koordinatė esant 35° kampo y ašyje;

$x_G -$ orlaivio B galinė koordinatė prie pasirinkto tiriamojo kampo x ašyje;

$y_G -$ orlaivio B galinė koordinatė prie pasirinkto tiriamojo kampo y ašyje.

Taškas $O_S$ žymi dviejų orlaivių susidūrimo vietą, jeigu nėra imamasi vengimo manevrų. Aplink šį tašką yra nubrėžtas apskritimas spinduliu $r_{O_S}$, modeliavimo pradžios metu yra lygus 5 jūrmylės. Programai vykdant skaičiavimus, $r_{O_S}$ yra keičiamas žingsniu 0,1 jūrmylės, kol yra randamas minimalus spindulys, kuriam esant yra išlaikomas minimalus saugus reikalaujamas atstumas tarp orlaivių. Jei $r_{O_S}$>15 jūrmylių, modeliavimas yra automatiškai nutraukiamas dėl neracionalaus Dubinso metodo orlaivio trajektorijos pailgėjimo. Apskritimo $O_1$ spindulys yra pastovus, 5 jūrmylės. Tyrimas yra atliekamas dvimatėje plokštumoje (orlaiviai gali atlikti manevrus tik horizontalioje plokštumoje), įvertinant laiko žingsnį.

## 2.2 Konflikto sprendimo algoritmo vertinimo kriterijai

Norint įvertinti konflikto sprendimo metodo tinkamumą, gauti rezultatai turi būti įvertinti pagal išvardytus kriterijus:

1. Sauga. Horizontalus atstumas tarp orlaivių bet kuriuo modeliavimo momentu negali būti mažesnis nei 5 jūrmylės. Kode nustatyti parametrai užtikrina šį atstumą.

2. Racionalumas. Šiam kriterijui įvertinti yra lyginami parametrai tokie kaip trajektorijos ilgis ir degalų sąnaudos. Trajektorijos ilgis yra automatiškai paskaičiuojamas programinės įrangos, o degalų sąnaudos randamos pagal formulę:

$$Degalų\ sąnaudos = FF \cdot \frac{s}{v}; \quad (43)$$

čia:

FF – degalų srautas, kg/sek;

s – trajektorijos ilgis, m;

v – orlaivio greitis (500 kts arba 257 m/s), m/s.

Degalų srautui yra naudojami komercinio orlaivio AIRBUS A320 duomenys paimti iš EUROCONTROL BADA duomenų bazės , kai kreiserinis greitis 459 mazgai (236 m/s, 850 km/h), kreiserinis skrydžio lygis 300 SL, oro temperatūra –45 °C ir pakrauto orlaivio masė lygi 73500 kilogramų. Degalų srautas lygus 49,3 kg/min arba 0,82 kg/sek.

3. Keleivių komfortas. Dubinso metodu trajektorija yra sudaroma iš tiesių bei apskritimų, kurių perimetru turi skristi orlaivis. Posūkio metu, pagal Lastauską (2008), „keliamoji jėga yra didesnė už lėktuvo svorį. Keliamosios jėgos ir lėktuvo svorio santykis yra perkrovos koeficientas“.

Perkrovos koeficiento išraišką, žinant orlaivio greitį bei viražo spindulį:

$$\theta = arctan(\frac{v^2}{g \cdot r}); \quad (44)$$

$$n = \frac{1}{cos(\theta)}; \quad (45)$$

čia:

$v$ – orlaivio greitis, m/s;

$g$ – laisvojo kritimo pagreitis, 9.8 m/s$^2$;

$r$ – viražo spindulys, m;

$\theta$ – posvyrio kampas laipsniais.

Pagal AIRBUS sertifikuotą dokumentą FCOM (angl. *Flight Crew Operating Manual*), kai posvyrio kampas yra didesnis nei 33° (arba 1,19 perkrovos koeficiento, jei v = 500 mazgų), yra laikoma jog atliekamas gilus posūkis. Priklausomai nuo posvyrio kampo, keleiviai, esantys lėktuve, patiria perkrovą, kuri „sukelia žmogui nepatogumo jausmą, sunku atlikti judesius, jaučiamas kūno spaudimas, esant didelėms perkrovoms, žmogus praranda koordinaciją, sutrinka regėjimas, smegenų veikla, prarandama sąmonė, galimas kraujo išsiliejimas į smegenis ar kitus organus.“ (Stonkus et al.

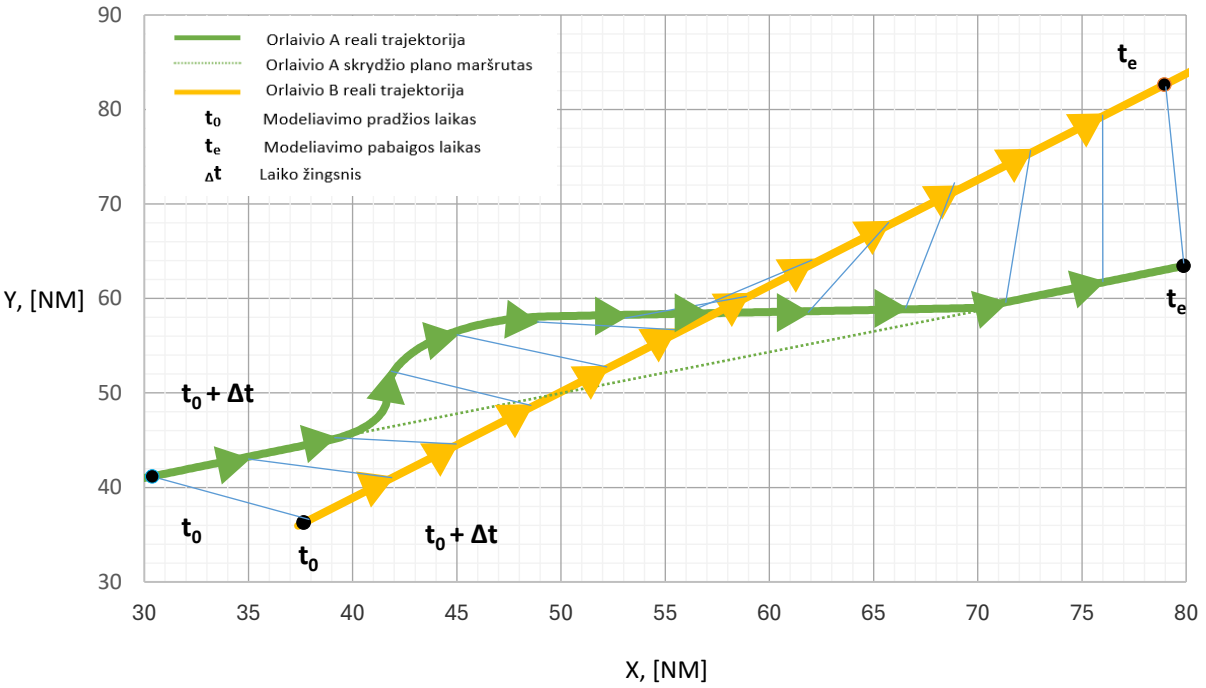
2022). Posūkio metu jaučiama apkrova veikia horizontalioje plokštumoje, todėl sąmonės netekimo galimybė nėra tokia didelė, tačiau pavojus kyla kaklo bei galvos raumenims, turintiems atlaikyti apkrovas (Vorshell, 2004). Orlaiviui skrendant tiesiai ir tame pačiame aukštyje perkrovos koeficientas lygus 1. Nors jaučiami simptomai bei jų atsiradimo laikas priklauso nuo kiekvieno žmogaus fiziologijos, galima teikti, jog esant 1,1 – 1,2 perkrovai, jaučiamas nedidelis apkrovos pojūtis, kuris tapta žymesnis padidėjus perkrovai iki 1,3 – 1,5. Kuo trumpesnis laikas yra praleidžiamas patiriant perkrovas, tuo lengviau kūnui atlaikyti krūvį (Kiselev et al., 2021). Atsižvelgiant į šiuos veiksnius, keleivių komfortui konflikto vengimo metu nustatyti bus apibrėžiamas perkrovos dydžio bei laiko praleisto patiriant perkrova parametrai. Jei skrendant apskritimu perkrovos koeficientas didesnis nei 1,19 ir laikas ilgesnis nei 60 sekundžių, yra laikoma, jog trajektorija yra nerekomenduotina dėl keleivių patiriamo diskomforto. Konflikto vengimo metu, orlaivis yra pirmiausiai nukreipiamas apskritimo $O_1$ perimetru, kurio spindulys 5 jūrmylės. Naudojant 44 ir 45 formules, paskaičiuota patiriama perkrova lygi 1,24. Šis koeficientas bus pastovus visai modeliavimo atvejais, nes $r_{O_1}$ yra pastovi reikšmė, skirsis tik laiko trukmė skrendant apskritimo $O_1$ perimetru. Kadangi laikas praleistas skrendant $O_1$ apskritimu bus trumpesnis arba lygus nei skrendant $O_S$ lanku, 1,24 perkrovos koeficientas yra laikomas priimtinas keleivių patogumui. Gavus apskritimo $O_S$ spindulį bei laiką praleista skrendant apskritimo perimetru, šie parametrai bus panaudojami įvertinti keleivių komforto kriterijų.

# 3. TYRIMO REZULTATAI

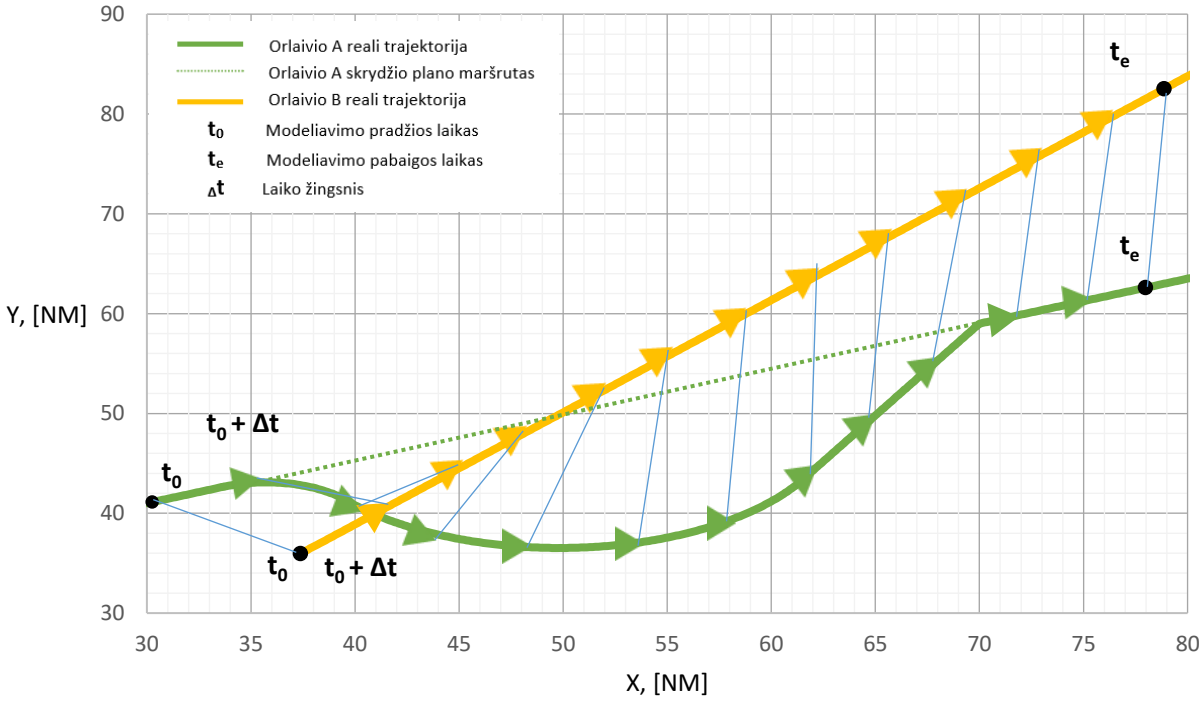
Tyrimas atliktas analizuojant orlaivių konflikto atvejus esant 20°, 25°, 30°, 35°, 45°, 50°, 55°, 60°, 70°, 75°, 80°, 85°, 90° kampams. Palyginimas tarp Dubinso trajektorijos orlaiviui skrendant dešiniąja apskritimo puse bei kairiąja apskritimo perimetro puse yra pateikiamas grafiškai, naudojant duomenis gautus pasitelkiant „MapleSoft“ programinę įrangą. Tyrimo metu nėra vertinami neapibrėžtumai, todėl orlaivių greičiai yra pastovus $v_A = v_B = 500$ mazgų (257 m/s).

## 3.1 Pradinio kampo 25° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo kairiuoju bei dešiniuoju perimetru, esant 25° modeliavimo kampui.



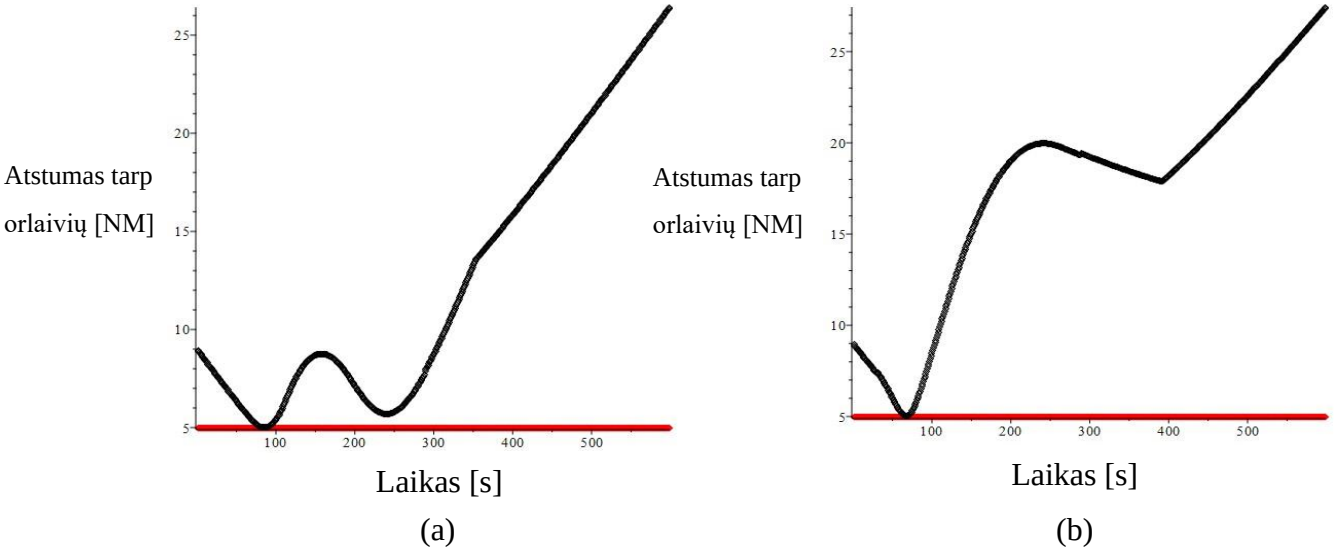

(a)




(b)

**19 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 25°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės)

Orlaiviui skrendant pagal Dubinso trajektoriją, kairiąja apskritimo $O_S$ dalimi, orlaivio mažiausias atstumas tarp abiejų lėktuvų trajektorijų lygus 5 jūrmylėms. Skrendant dešiniuoju apskritimo lanku, mažiausias atstumas yra 5,03 jūrmylės. Orlaivių trajektorijų suartėjimą modeliavimo metu galima matyti 20 paveiksle.




**20 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 25° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

Orlaiviui skrendant dešiniąja ar kairiąja apskritimo perimetro dalimi, saugus minimalus reikalaujamas 5 jūrmylių atstumas yra išlaikomas abiem atvejais.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Dubinso trajektorijų dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru esant 25° kampui palyginimas pateikiamas 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę | Skirtumas |
|---|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | 48,79 | 54,2 | 5,41 |
| Laikas [s] | 351,29 | 390,24 | 38,95 |
| Degalų sąnaudos [kg] | 288,64 | 320,65 | 32,01 |

Orlaiviui skrendant apskritimo kairiąja puse, trumpiausia trajektorija, kuriai esant yra užtikrinamas minimalus saugus atstumas yra pasiekiama, kai $r_{O_S} = 8{,}2$ jūrmylės. Skrendant dešiniąja

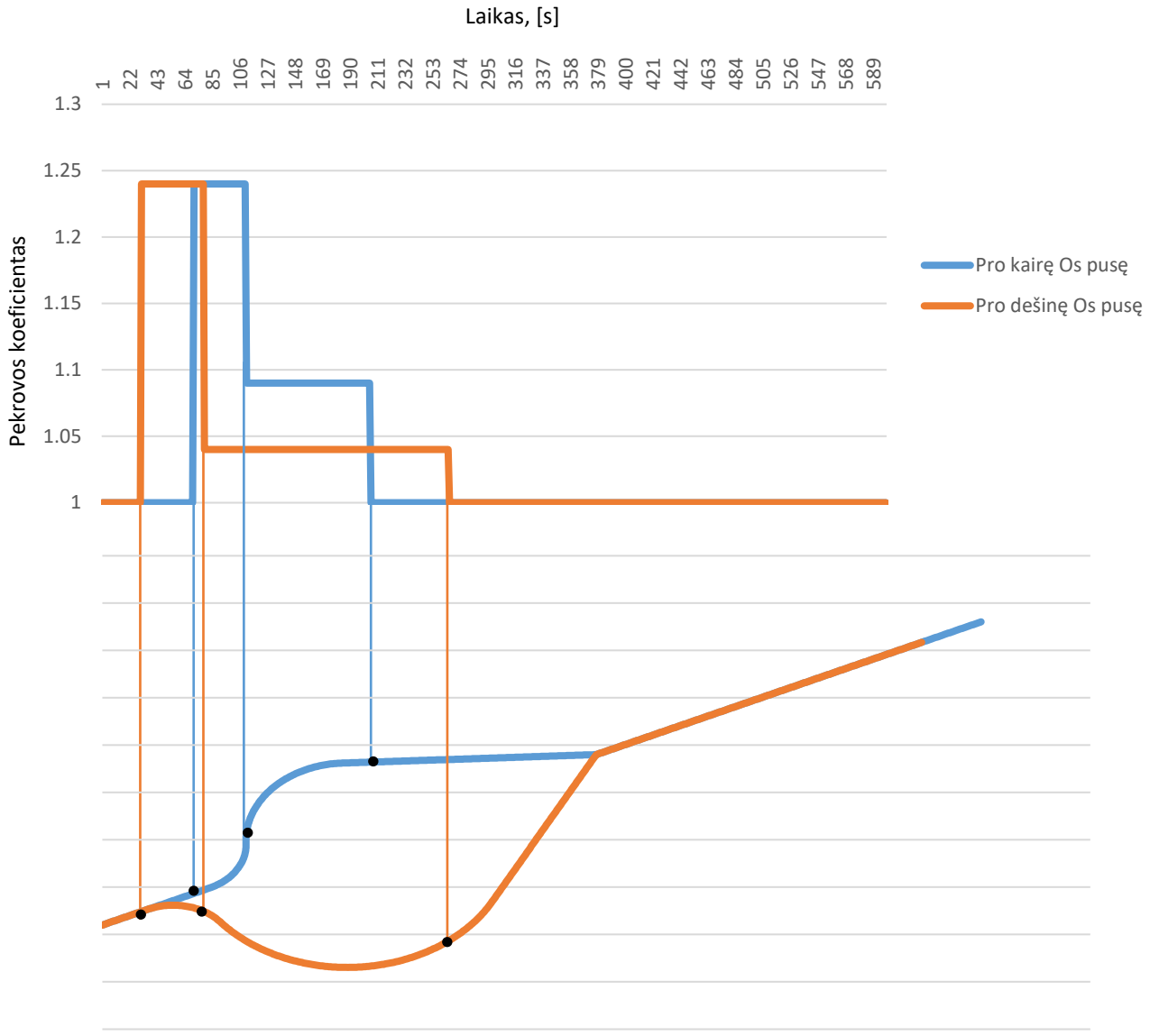
puse, mažiausias saugus atstumas užtikrinamas esant $r_{O_S} = 13{,}4$ jūrmylės. Atitinkamai, šis spindulio padidėjimas nulemia didesnį trajektorijos ilgį dešiniąja puse, t. y. 5,41 jūrmylės arba 38,95 sekundėmis. Iš degalų sąnaudų formulės (43) matoma, jog šis dydis yra tiesiogiai proporcingas skrydžio trukmei, todėl kairiąja apskritimo puse yra 32 kilogramais mažesnės nei dešiniąja puse. Racionalumo atžvilgiu, esant 25° laipsnių kampui orlaivio nukreipimas Dubinso metodo kairiąja apskritimo puse turi pranašumą dėl mažesnio apskritimo $R_{O_S}$, kuris nulemia maženį trajektorijos ilgį, laiką bei degalų sąnaudas nei dešiniąja puse.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų.. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 25° kampui skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse pateikiami 6 lentelėje.

**6 lentelė**. Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | 1,09 | 1,04 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | 92,01 | 188,15 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | 42,56 | 46,48 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais | 134,57 | 234,79 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija kairiuoju bei dešiniuoju apskritimo lanku, gali būti atvaizduojamas grafiškai.

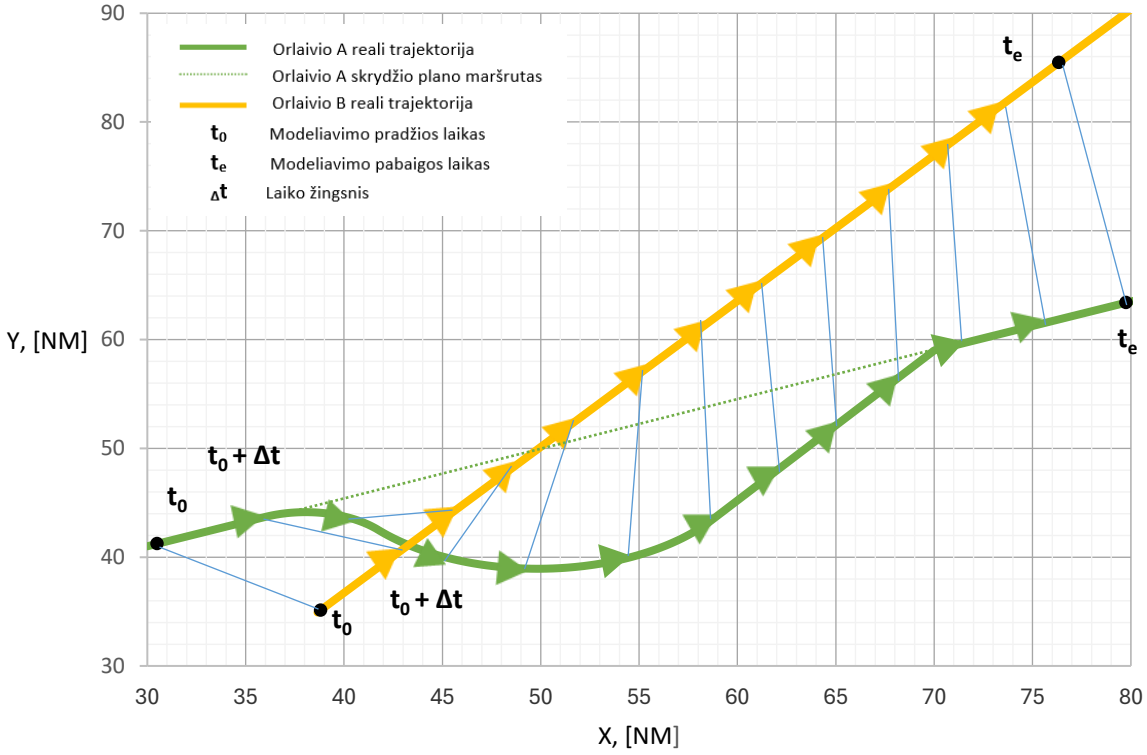



**21 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešiniąja pusėmis atvaizdavimas esant 25° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

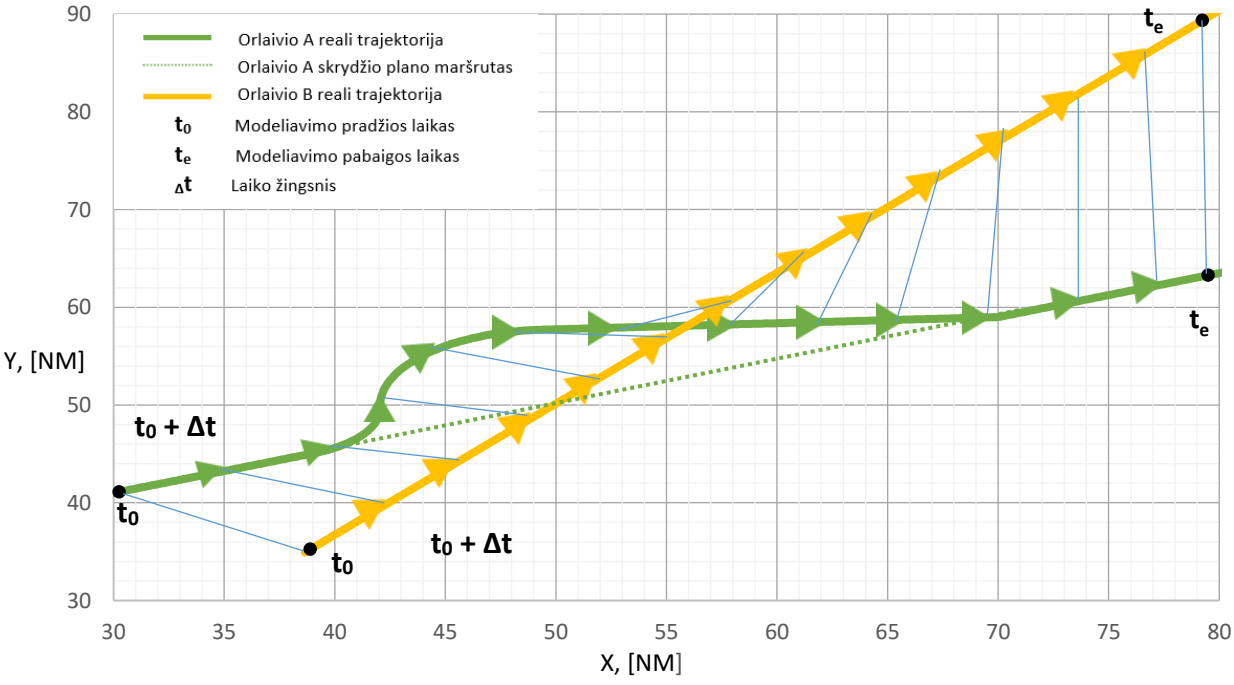
Nagrinėjant perkrovos koeficiento trajektorijoje atvaizdavimą grafiškai, reikia pabrėžti, jog netiksliai yra atvaizduojami duomenys trajektorijai pereinant iš tiesės į apskritimo lanką arba iš vieno apskritimo lanko į kitą (iš $O_1$ į $O_S$). Turėtų būti atitinkamas perkrovos koeficiento didėjimas arba mažėjimas, iki kol pasiekiamas norimas posvyrio kampas. Kadangi perkrovos reikšmės skrendant pro kairę ar pro dešinę apskritimu $O_S$ yra panašios bei artimos perkrovos koeficiento reikšmei horizontaliame skrydyje pastoviu greičiu, keleiviams komfortiškesnė trajektorija kairiąja apkritimo puse, dėl trumpesnio laiko, praleisto patiriant perkrovą (100,22 sekundėmis trumpiau nei dešiniąja puse).

## 3.2 Pradinio kampo 30° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo kairiuoju bei dešiniuoju perimetru, esant 30° modeliavimo kampui.



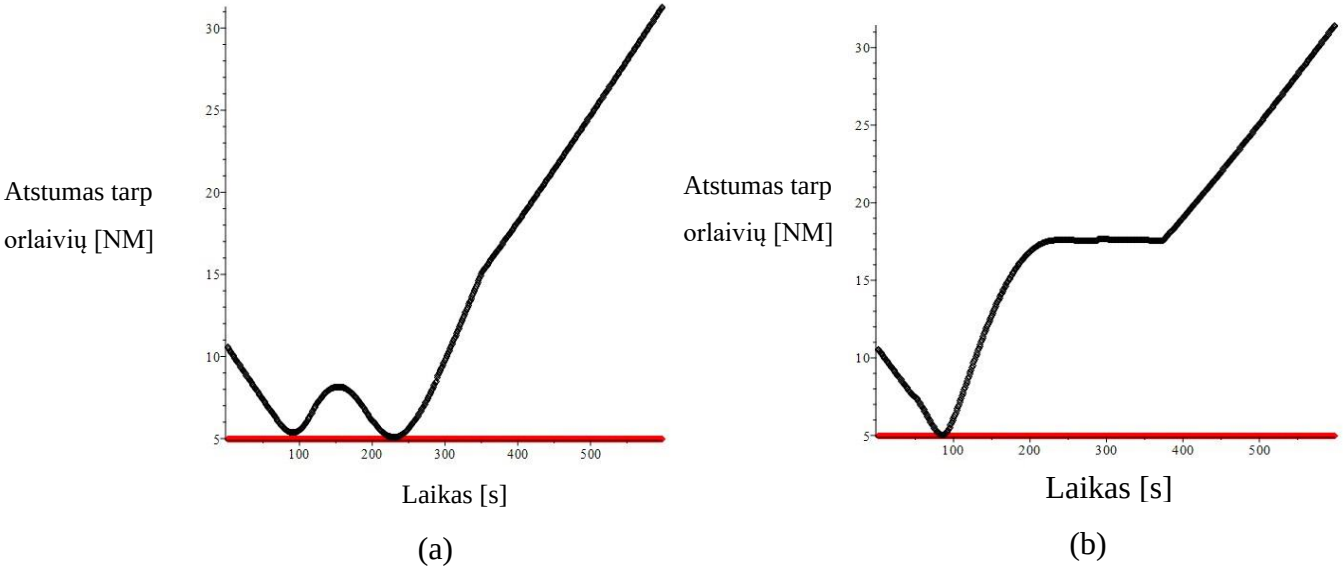

(a)




(b)

**22 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 30°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės)

Lėktuvui skrendant kairiąja apskritimo puse, mažiausia gauta atskirtis tarp orlaivių yra 5,08 jūrmylės. Trajektorijai nukreipiant pro dešiniąja apskritimo pusę, minimalus atstumas yra 5,04 jūrmylės.




**23 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 30° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

Esant 30° kampui, minimalus saugus reikalaujamas atstumas yra išlaikomas skrendant pro kairiąja bei pro dešiniąja apskritimo puses.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. 7 lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviams skrendant pro dešiniąja ir kairiąja apskritimo puses esant 30° kampui:

**7 lentelė.** Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę | Skirtumas |
|---|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | 48,44 | 51,51 | 3,07 |
| Laikas [s] | 348,77 | 370,87 | 22,1 |
| Degalų sąnaudos [kg] | 286,57 | 304,73 | 18,16 |

Orlaiviui skrendant kairiąja apskritimo puse, trumpiausia trajektorija, kuriai esant užtikrinamas minimalus saugus reikalaujamas atstumas, sugeneruojama esant apskritimo $O_S$ spinduliui 7,8 jūrmylės, tuo tarpu skrendant dešiniąja puse šis spindulys padidėja iki 11 jūrmylių.

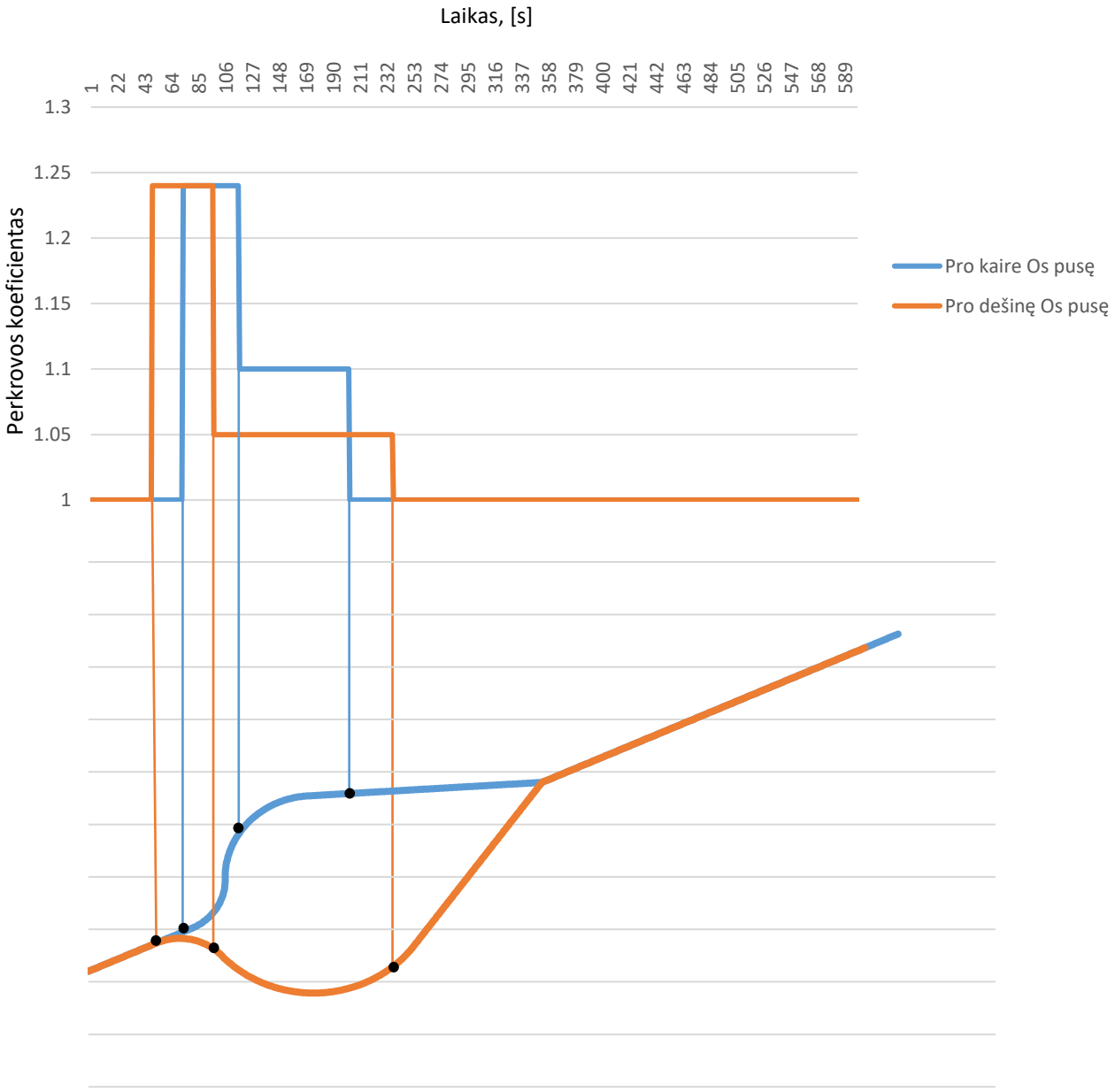
Skrendant dešiniąja puse orlaiviui tektų įveikti 3,07 jūrmylėmis arba 21,1 sekunde ilgesnį atstumą, kas padidintų jo degalų sąnaudas 18,16 kilogramais. Esant 30° kampui, orlaivio nukreipimas kairiąja apskritimo puse, maršrutas yra racionalesnis nei dešiniąja puse.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 30° kampui skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse pateikiami 8 lentelėje.

**8 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | 1,10 | 1,05 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | 85,72 | 140,41 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | 42,10 | 45,12 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | 127,83 | 185,52 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija kairiuoju bei dešiniuoju apskritimo lanku, gali būti atvaizduojamas grafiškai 24 paveiksle.

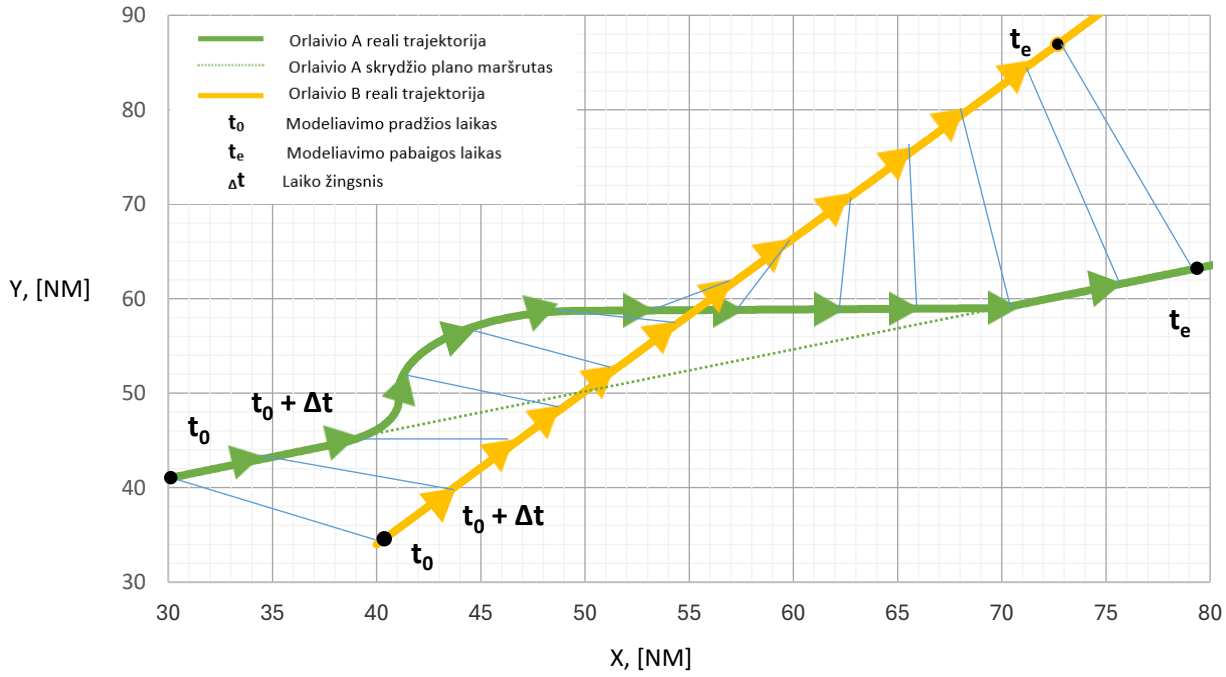



**24 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešiąja pusėmis atvaizdavimas esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

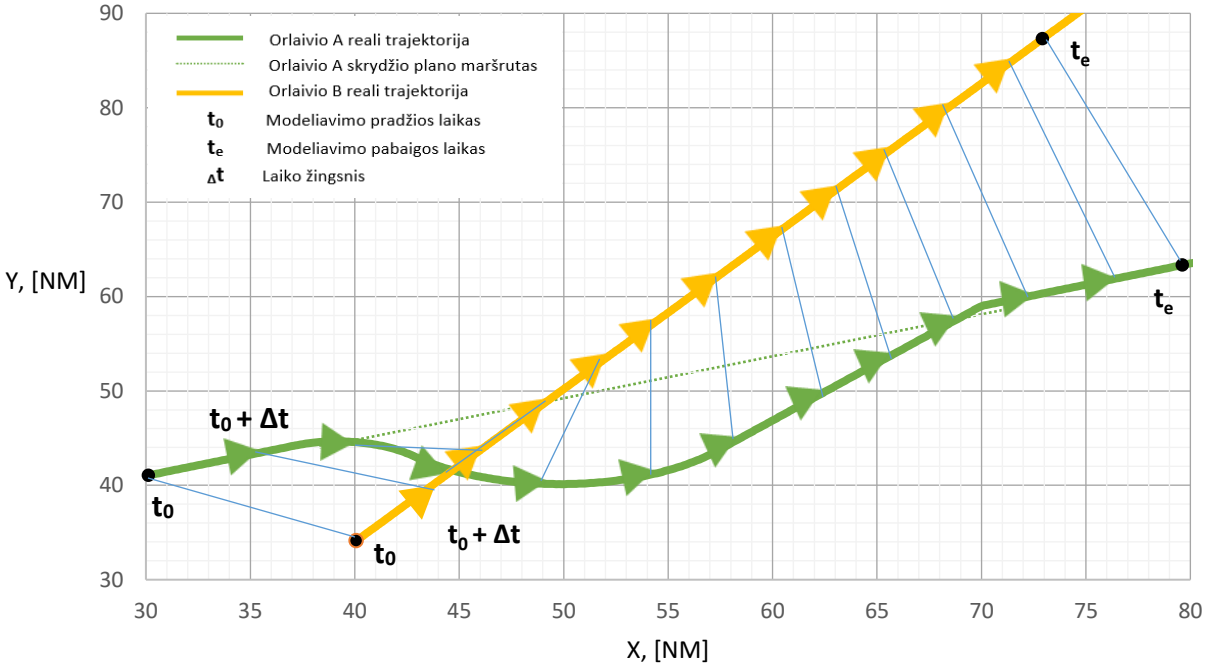
Orlaivį nukreipiant kairiąja apskritimo $O_S$ puse, patiriama perkrova yra šiek tiek didesnė nei skrendant dešiniąja puse, tačiau ji nesukelia didelio diskomforto keleiviams ir yra 57,69 sekundėmis trumpesnė nei dešinioji trajektorija, todėl yra komfortiškesnė.

## 3.3 Pradinio kampo 35° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo kairiuoju bei dešiniuoju perimetru, esant 35° modeliavimo kampui.

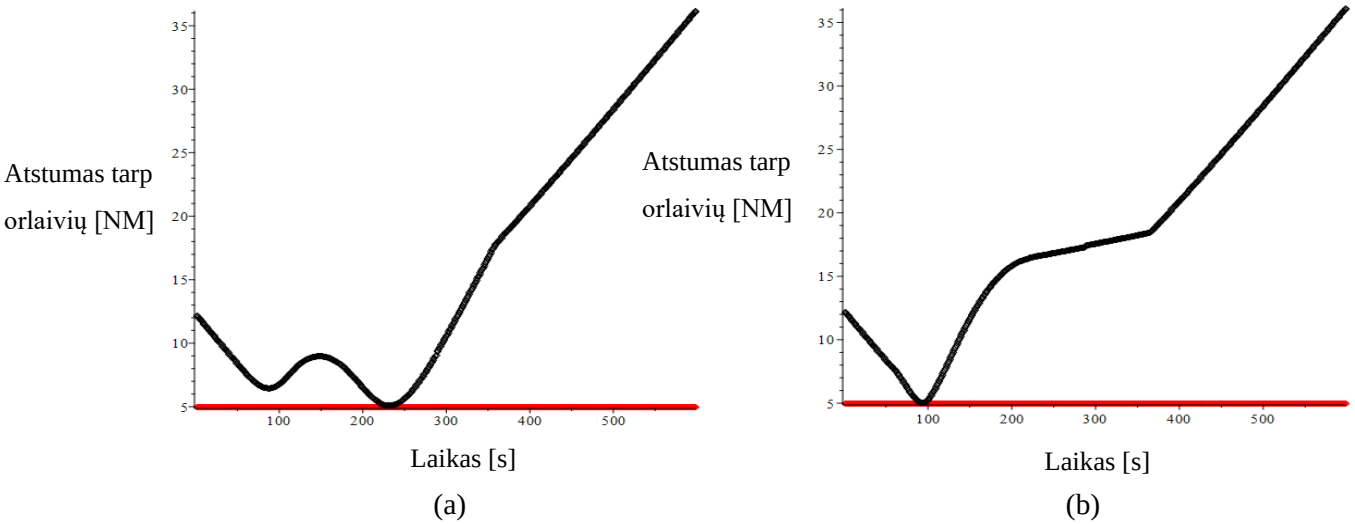



(a)




(b)

**25 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 35°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės)




**26 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 35° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

Kairiuoju apskritimo perimetru, minimalus atstumas tarp orlaivių modeliavimo metu yra 5,08 jūrmylės. Skrendant dešiniuoju apskritimo $O_S$ perimetru mažiausias atstumas tarp orlaivių yra 5 jūrmylės. Viso modeliavimo metu orlaiviai nepažeidžia minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo, todėl saugos kriterijus yra užtikrinamas.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Atstumo, skrydžio laiko ir degalų sąnaudų palyginimas esant 35° kampui orlaiviui skrendant pro kairiąja bei dešiniąja apskritimo puses.

**10 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 35° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę | Skirtumas |
|---|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | 49,34 | 50,29 | 0,95 |
| Laikas [s] | 355,23 | 362,09 | 6,86 |
| Degalų sąnaudos [kg] | 291,88 | 297,52 | 5,64 |

Skrendant kairiąja apskritimo puse, trumpiausias atstumas, kuriam esant užtikrinama sauga tarp orlaivių yra gaunamas esant $O_S$ spinduliui 8,8 jūrmylės, skrendant dešiniąja puse spindulys yra 9,8 jūrmylės. Didesnis spindulys nulemia nežymų trajektorijos pailgėjimą skrendant dešiniąja puse, t.y. apie 0,95 jūrmylėmis arba 6,86 sekundėmis. Papildomos degalų sąnaudos yra 5,64 kilogramo.

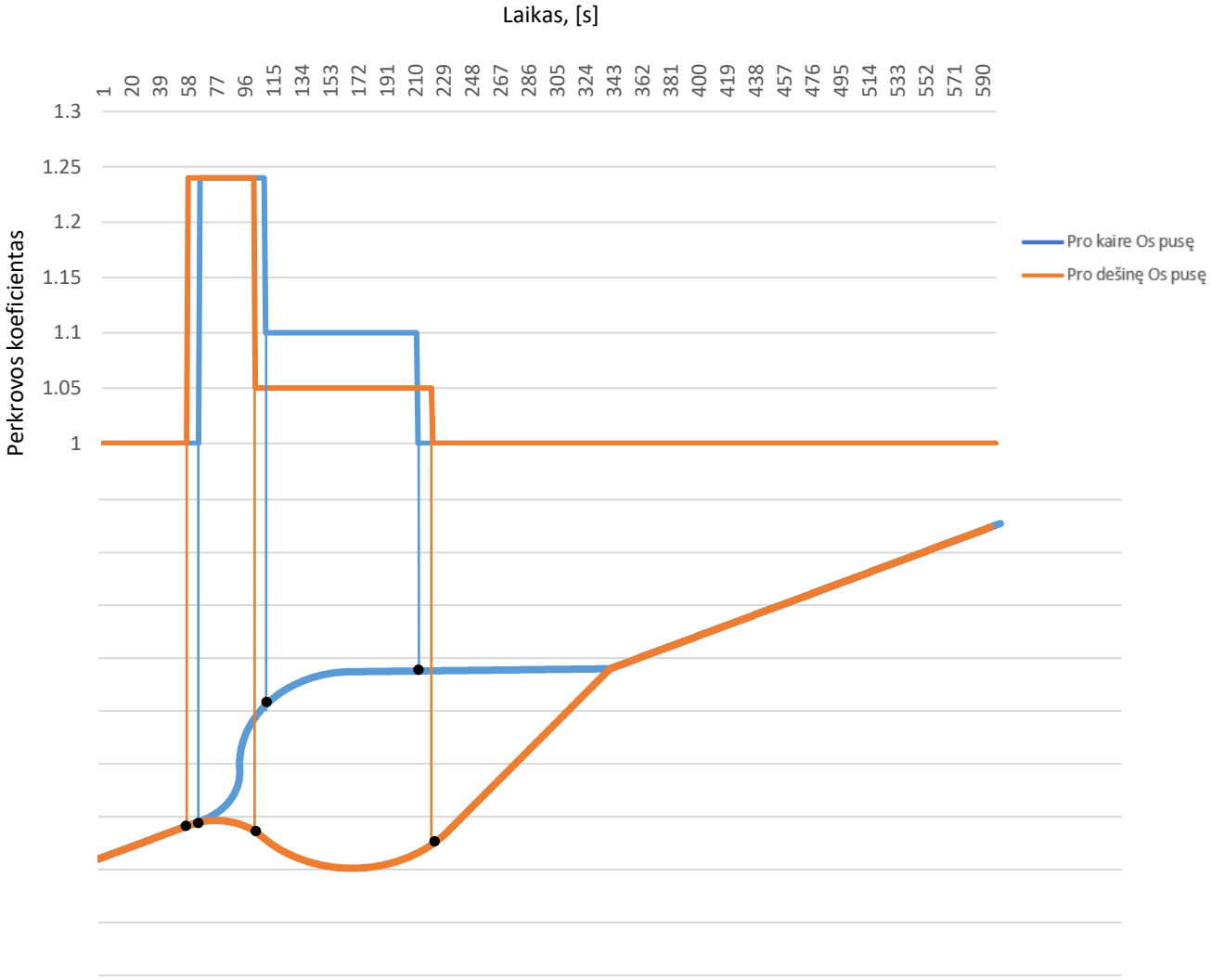
Esant 35° kampui, trajektorija pro kairiąja apskritimo dalį yra racionalesnė, tačiau šis skirtumas tarp trajektorijų nėra didelis.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 35° kampui skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse pateikiami 11 lentelėje.

**11 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 30° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | 1,08 | 1,07 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | 101,76 | 118,74 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | 43,20 | 44,14 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | 144,96 | 162,88 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija kairiuoju bei dešiniuoju apskritimo lanku, gali būti atvaizduojamas grafiškai 27 paveiksle.

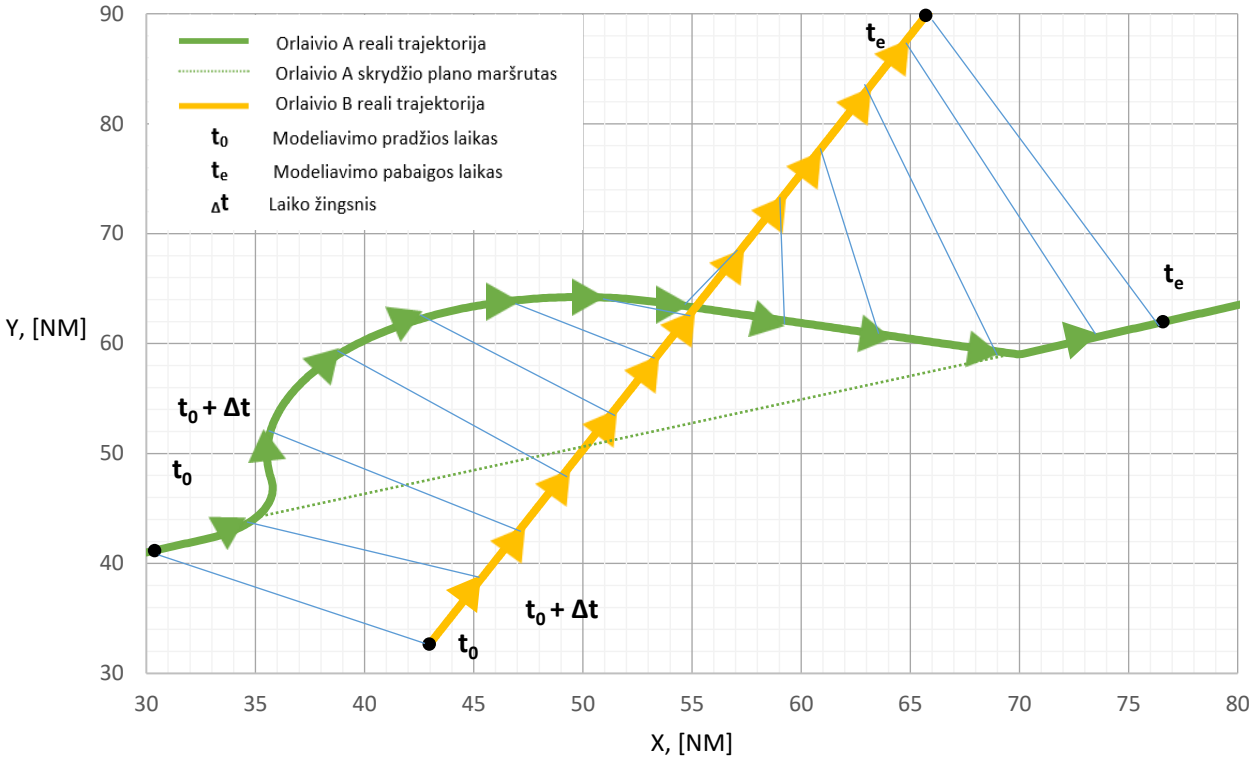



**27 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 35° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

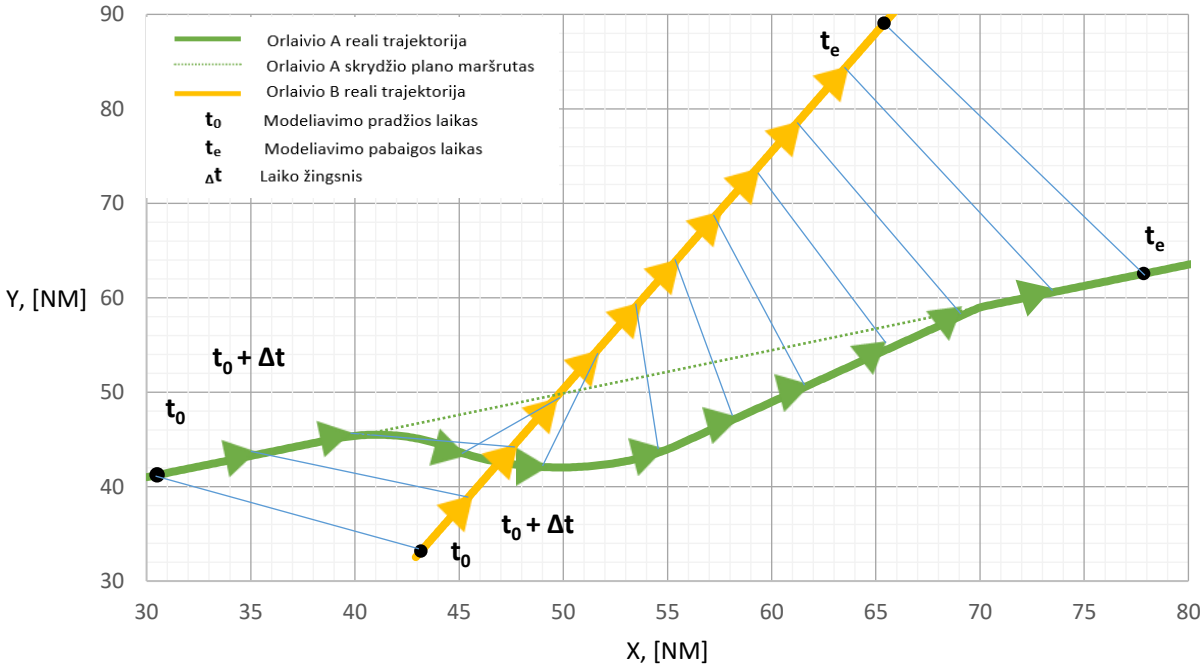
Skirtumas tarp perkrovos koeficiento, kairiąja bei dešiniąja apskritumų puse yra nežymus, neviršijantis 1,19 ribos. Kairiąja puse skrydžio laikas yra 17,92 sekundės trumpesnis, todėl turi nedidelį pranašumą lyginant su dešiniąja apskritimo perimetro trajektorija.

## 3.4 Pradinio kampo 45° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo kairiuoju bei dešiniuoju perimetru, esant 45° modeliavimo kampui.



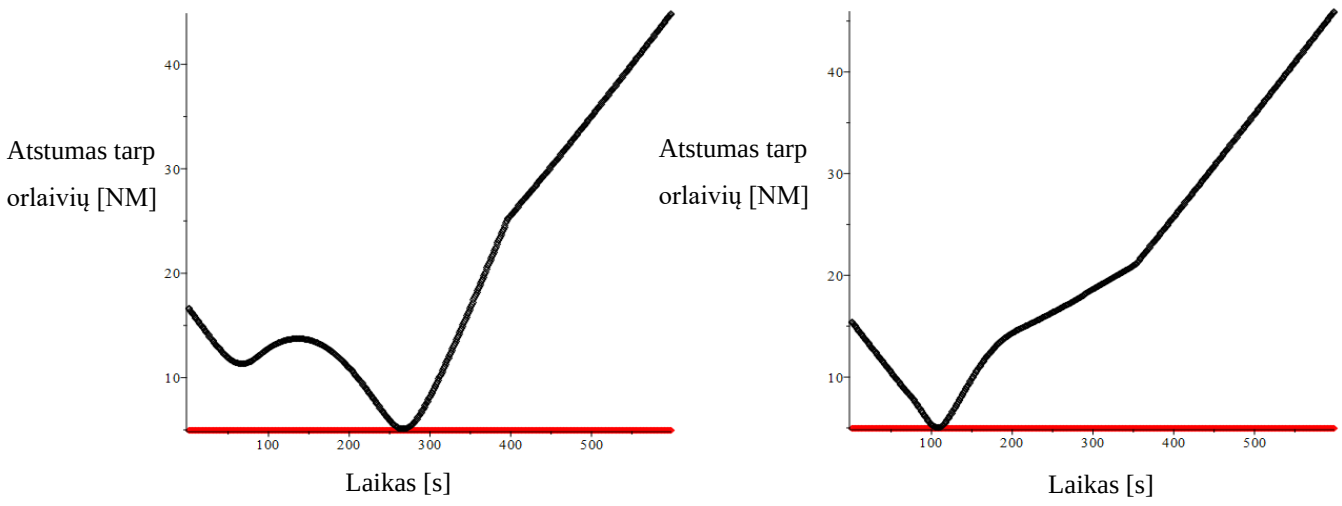

(a)




(b)

**28 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 45°: (a) skrendant per kairiąją apskritimo lanko pusę; (b) skrendant per dešiniąją apskritimo lanko pusę (sudaryta autorės)

Minimalus atstumas tarp orlaivių A ir B modeliavimo metu iliustruojamas 29 paveiksle.




**29 pav.** Atstumas tarp orlaivių, esant 45° kampui, kai skrendama: (a) kairiąja apskritimo puse; (b) dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

Kairiuoju apskritimo perimetru, minimalus atstumas tarp orlaivių modeliavimo metu yra 5,07 jūrmylės. Skrendant dešiniuoju apskritimo $O_S$ perimetru mažiausias atstumas tarp orlaivių yra 5,01 jūrmylės. Orlaiviui skrendant dešiniąja ar kairiąja apskritimo perimetro dalimi, saugus minimalus reikalaujamas 5 jūrmylių atstumas yra išlaikomas abiem atvejais.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviams skrendant pro dešiniąja ir kairiąja apskritimo puses esant 45° kampui:

**12 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju ir kairiuoju apskritimo perimetru racionalumo parametrų palyginimas, esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę | Skirtumas |
|---|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | 55,30 | 48,53 | 6,77 |
| Laikas [s] | 398,16 | 349,42 | 48,74 |
| Degalų sąnaudos [kg] | 327,15 | 287,10 | 40,05 |

Esant 45° kampui, orlaivis, skrendantis kairiąja apskritimo lanku, įveiks 55,30 jūrmylių atstumą, apskritimo spindulys lygus 14,3 jūrmylės. Dešiniąja apskritimo trajektorija įveikiamas atstumas yra 6,77 jūrmylėmis arba 48,74 sekundėmis trumpesnis, sutaupoma 40,05 kilogramai kuro.

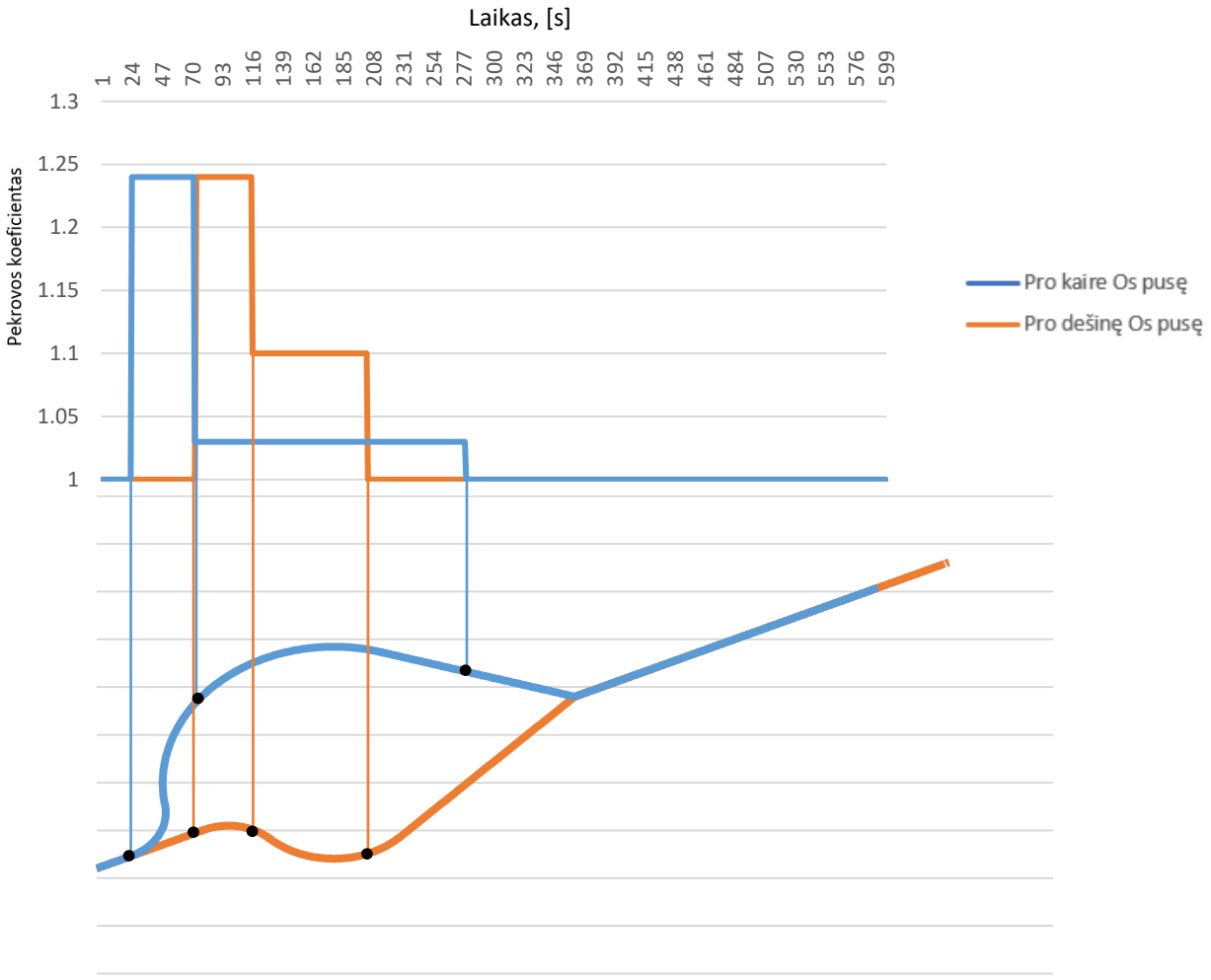
Iš gautų duomenų galima daryti išvadą, jog tarp 35° ir 45° laipsnių yra lūžio taškas, nuo kurio konfliktui išvengti orlaivį labiau apsimoka vektoriuoti apskritimo $O_S$ dešiniąja puse.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 45° kampui skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse pateikiami 14 lentelėje.

**14 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju bei kairiuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | 1,03 | 1,10 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | 207,88 | 87,28 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | 47,12 | 42,22 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | 254,99 | 129,50 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija kairiuoju bei dešiniuoju apskritimo lanku, gali būti atvaizduojamas grafiškai 30 paveiksle.



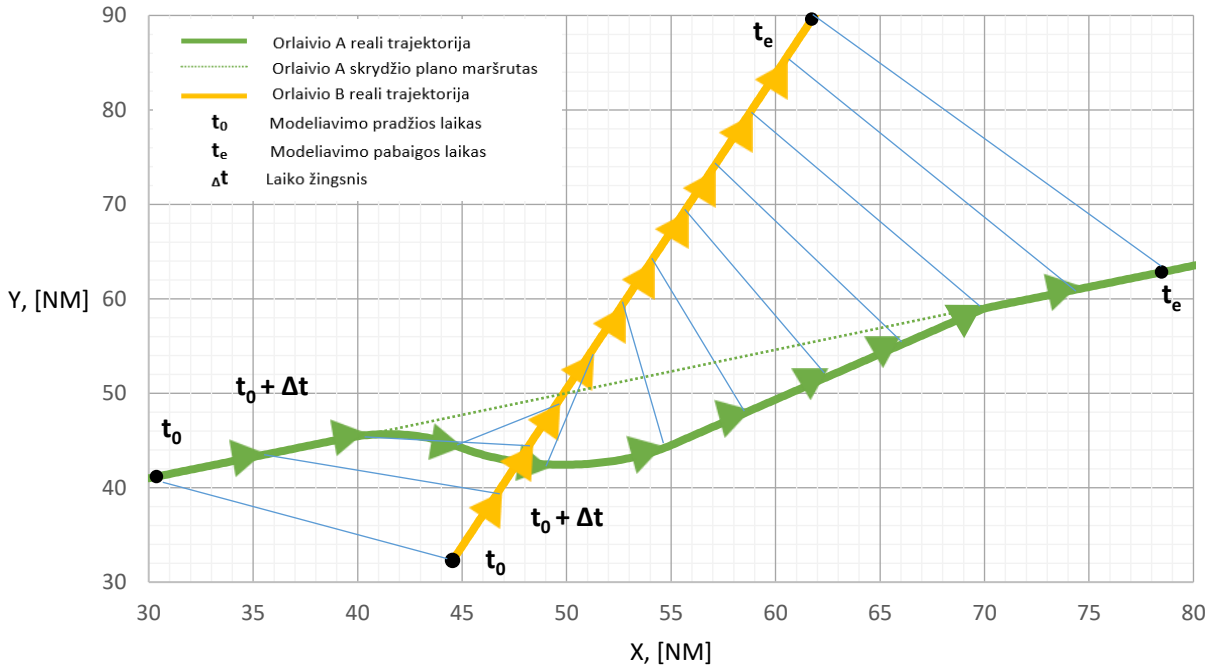

**30 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ kairiąja bei dešinąja pusėmis atvaizdavimas esant 45° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

Skrendant kairiąja apskritimo puse, dėl didesnio spindulio, perkrovos koeficientas yra mažas, lygus 1,03. Skrendant dešiniąja puse, perkrovos koeficientas yra 1,10, kas vis tiek nesukeltų keleiviams didelio diskomforto, be to laikas patiriant perkrovą būtų 124,49 sekundėmis trumpesnis, todėl rekomenduotina trajektorija pro dešinę apskritimo pusę.

## 3.5 Pradinio kampo 50° tarp skrydžio trajektorijų analizė

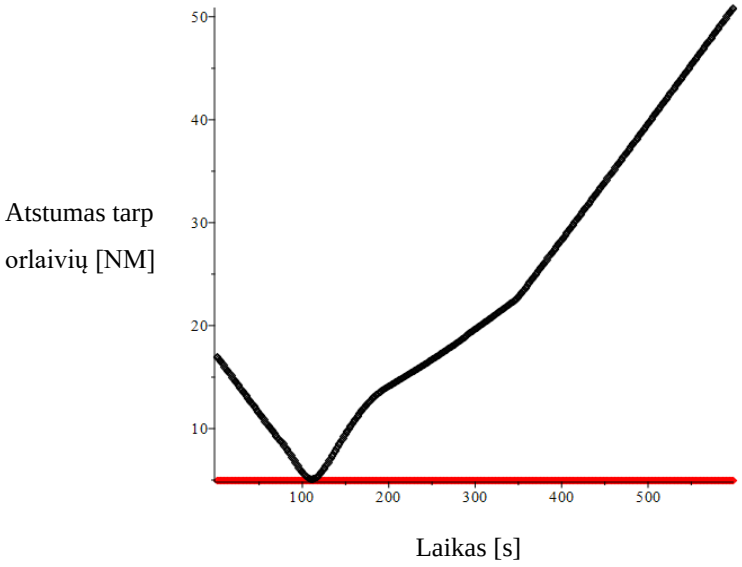
Esant 50° kampui, vienintelė sugeneruota trajektorija yra skrendant pro dešiniąją apskritimo $O_S$ pusę, dėl to, kad kode įrašyti parametrai nutraukia skaičiavimą, kai $r_{O_S} > 15$. Dėl šios priežasties

toliau yra pateikiamas grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorija eina tiktais apskritimo dešiniuoju perimetru.




**31 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 50°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Minimalus atstumas tarp orlaivių A ir B modeliavimo metu iliustruojamas 32 paveiksle.




**32 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 50° kampui (sudaryta autorės)

Mažiausias atstumas tarp orlaivių pasiekiamas yra 5,09 jūrmylės, kas užtikrina saugos reikalavimus.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 50° kampui:

**15 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametrų duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{Os} > 15$ | 48,18 |
| Laikas [s] | $r_{Os} > 15$ | 346,90 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{Os} > 15$ | 285,03 |

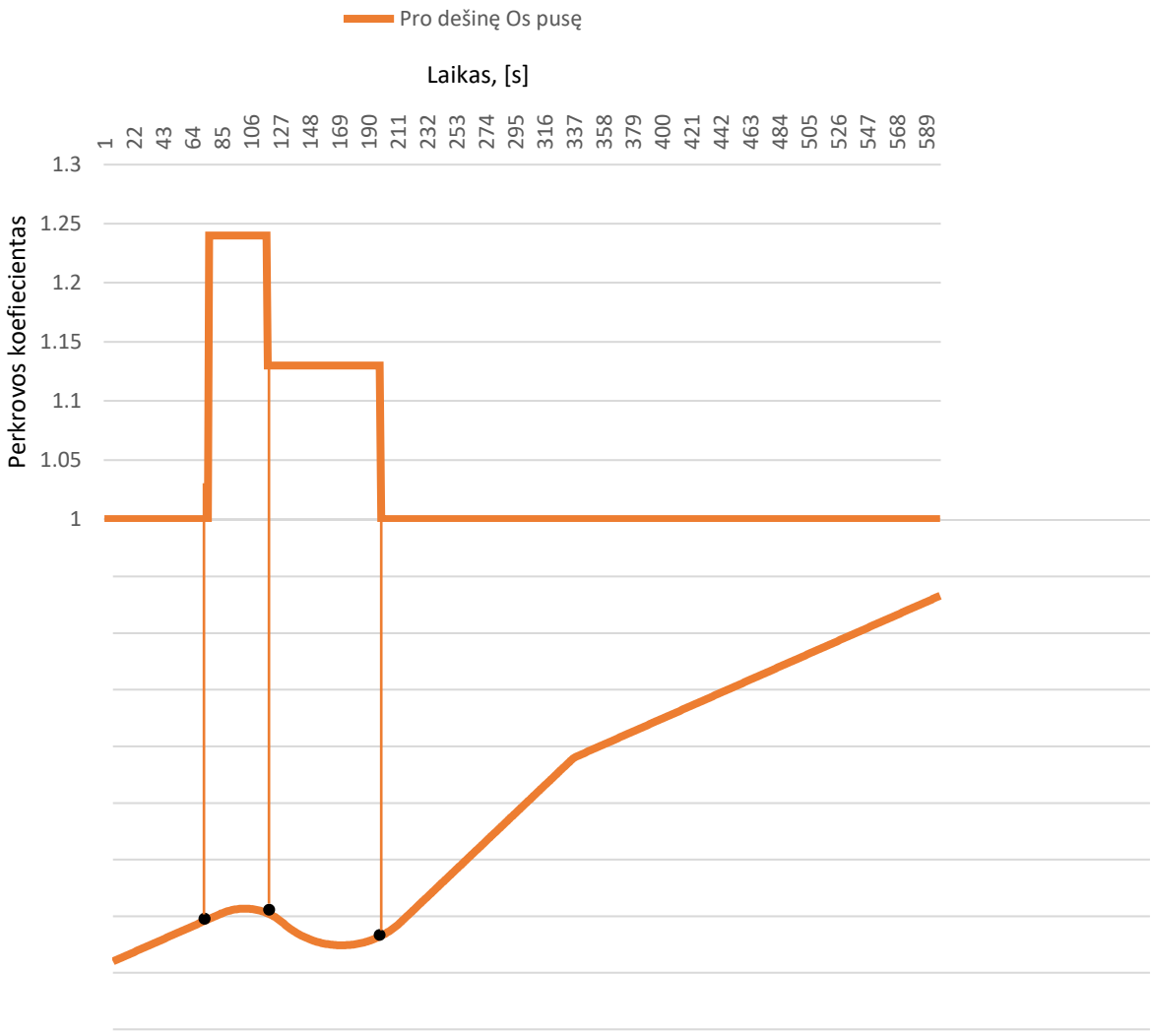
Trumpiausias atstumas užtikrinantis minimalią reikalaujamą saugą tarp orlaivių yra gaunamas kai $r_{Os}$= 6,9 jūrmylės. Trajektorijos ilgis yra 48,18 jūrmylės arba 346,90 sekundės, kas prideda papildomus 285,03 kilogramų degalų sąnaudų.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 50° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami 16 lentelėje.

**16 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{Os} > 15$ | 1,11 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 81,08 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 41,73 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 122,81 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 33 paveiksle.

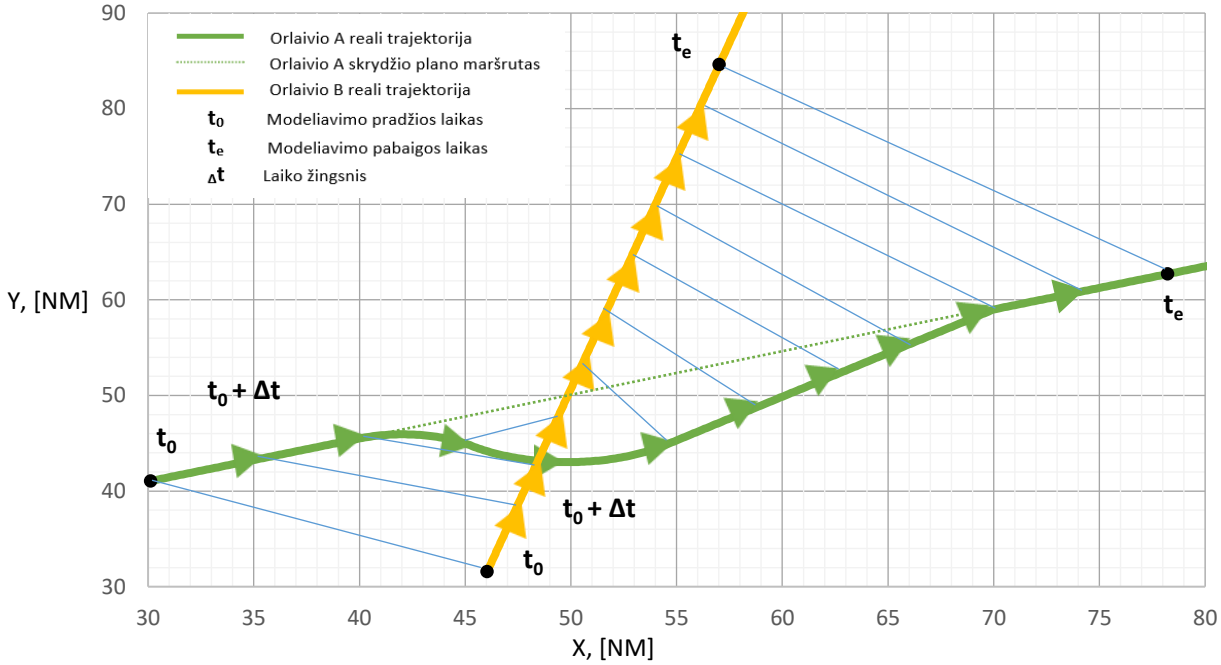



**33 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešinąja puse atvaizdavimas esant 50° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

Esant 50° kampui, skrydis apskritimų $O_1$ ir $O_S$ perimetrais užtrunka 122,81 sekundės, patiriamas perkrovos koeficientas skrendant $O_S$ yra 1,11. Nors ši reikšmė neviršija tyrimui naudojamos ribinės vertės, ji gali būti sumažinama, jei būtų skrendama kairiąja apskritimo puse, tačiau tai būtų mažiau racionali trajektorija.

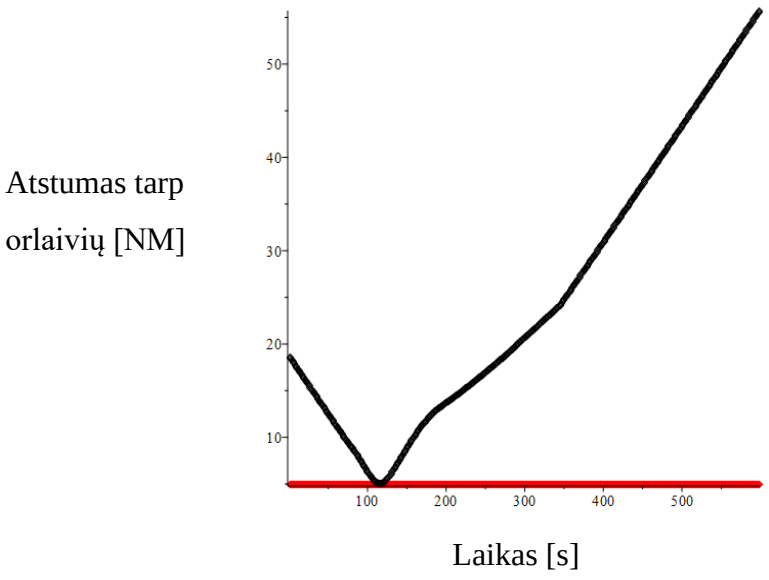
## 3.6 Pradinio kampo 55° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorija eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 55° modeliavimo kampui.




**34 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 55°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Minimalus atstumas tarp orlaivių A ir B modeliavimo metu iliustruojamas 35 paveiksle.




**35 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 55° kampui (sudaryta autorės)

Modeliavimo metu tarp orlaivių A ir B trajektorijų yra pasiekiamas 5,04 jūrmylių suartėjimas. Minimalaus saugaus reikalaujamo atstumo sąlyga yra išlaikoma.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 55° kampui:

**17 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{O_S} > 15$ | 47,68 |
| Laikas [s] | $r_{O_S} > 15$ | 343,30 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{O_S} > 15$ | 282,08 |

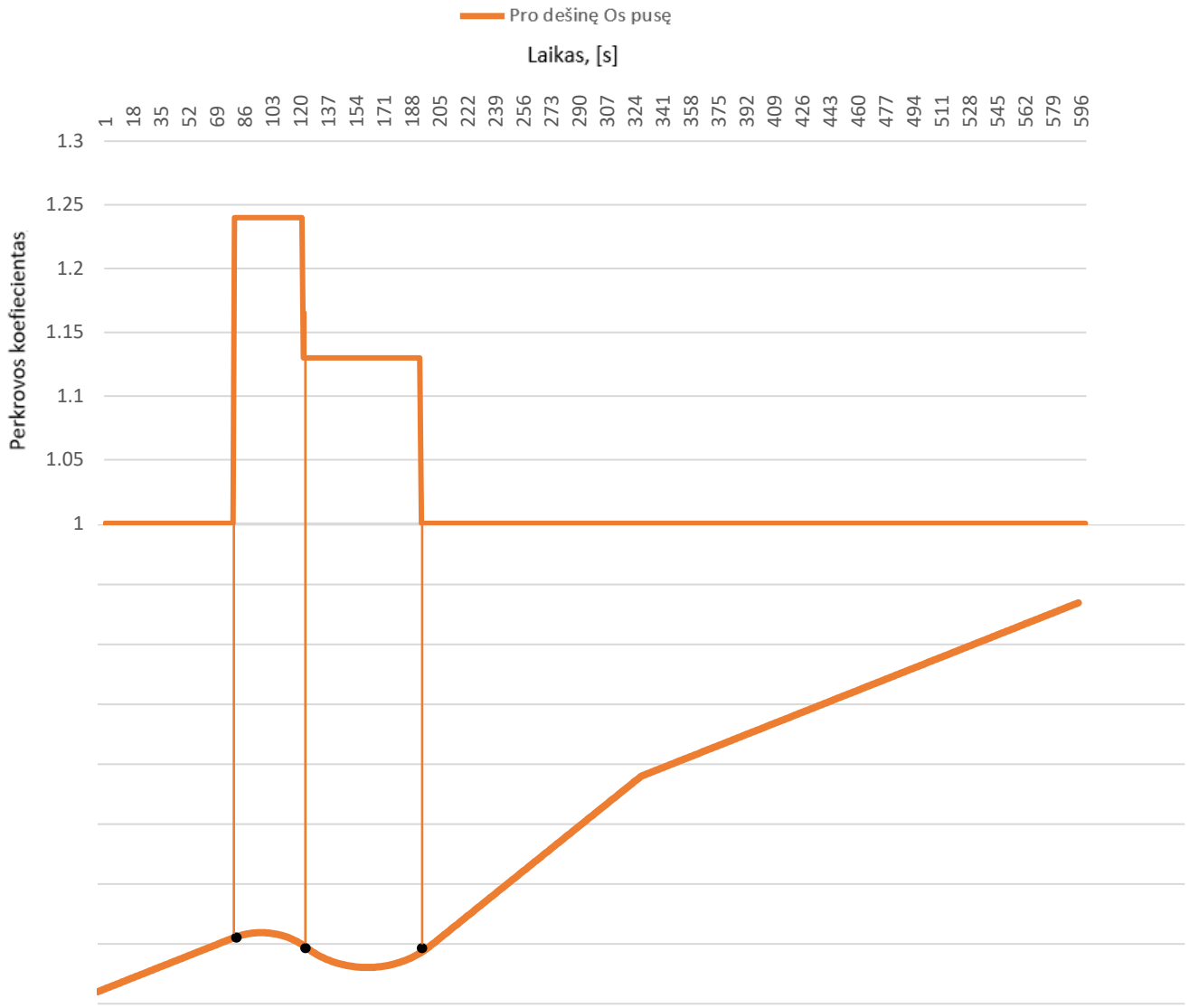
Gaunamas trajektorijos ilgis yra 47,68 jūrmylės, kai apskritimo spindulys yra 6,9 jūrmylės. Maršruto pailgėjimas lygus 343,30 sekundės, papildomos degalų sąnaudos 282,08 kilogramo.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 55° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**18 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{O_S} > 15$ | 1,13 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 72,07 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 40,94 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 113,00 |

Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 36 paveiksle.

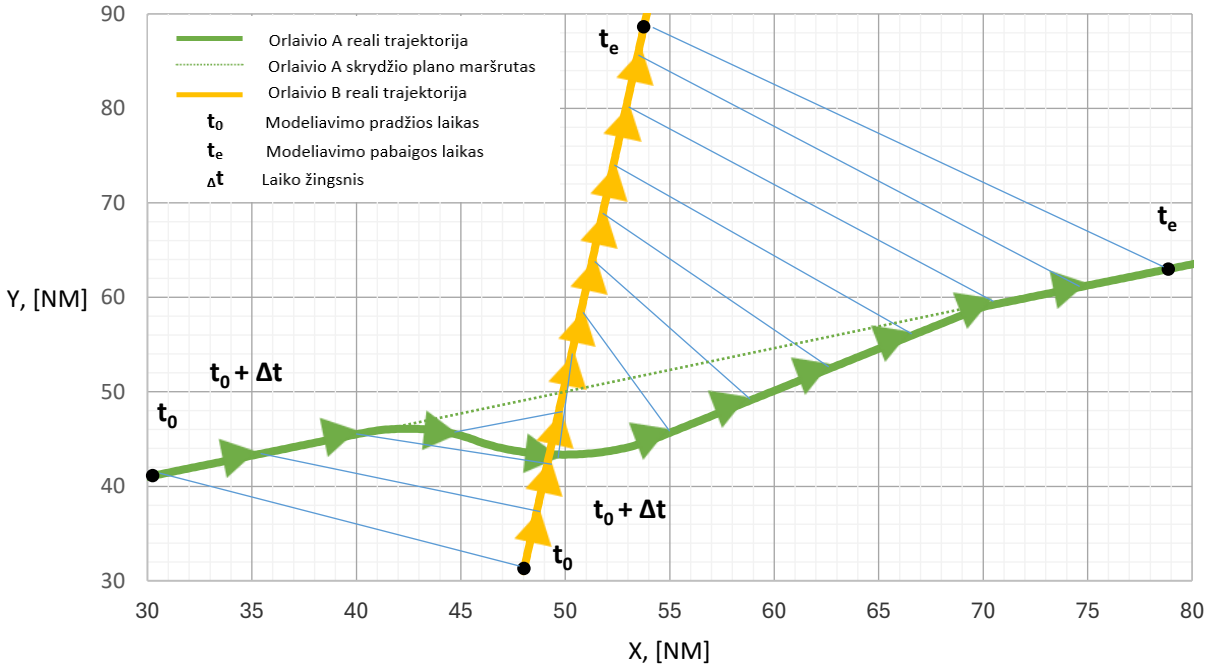



**36 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 55° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

Perkrovos koeficiento reikšmė esant 55° kampui, dešiniąja apskritimo $O_S$ puse yra lygi 1,13 bei neviršija 60 sekundžių, todėl konflikto sprendimo atveju ji yra priimtina.

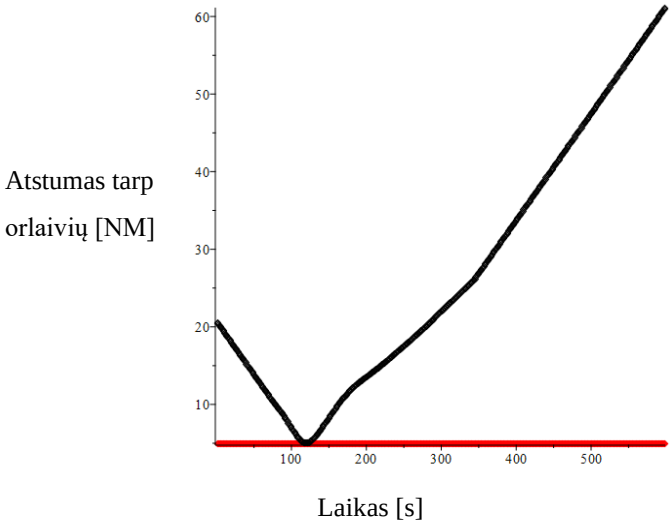
## 3.7 Pradinio kampo 60° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorija eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 60° modeliavimo kampui.




**37 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 60°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Orlaivių trajektorijų suartėjimą modeliavimo metu galima matyti 38 paveiksle.




**38 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 60° kampui (sudaryta autorės)

Dešiniąja apsikritimo dalimi skrendant mažiausias atstumas yra 5 jūrmylės. Orlaiviui skrendant dešiniąja apskritimo $O_S$ pusę yra išlaikomas 5 jūrmylių atstumas tarp orlaivių.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 60° kampui:

**19 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{Os} > 15$ | 47,44 |
| Laikas [s] | $r_{Os} > 15$ | 341,59 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{Os} > 15$ | 280,66 |

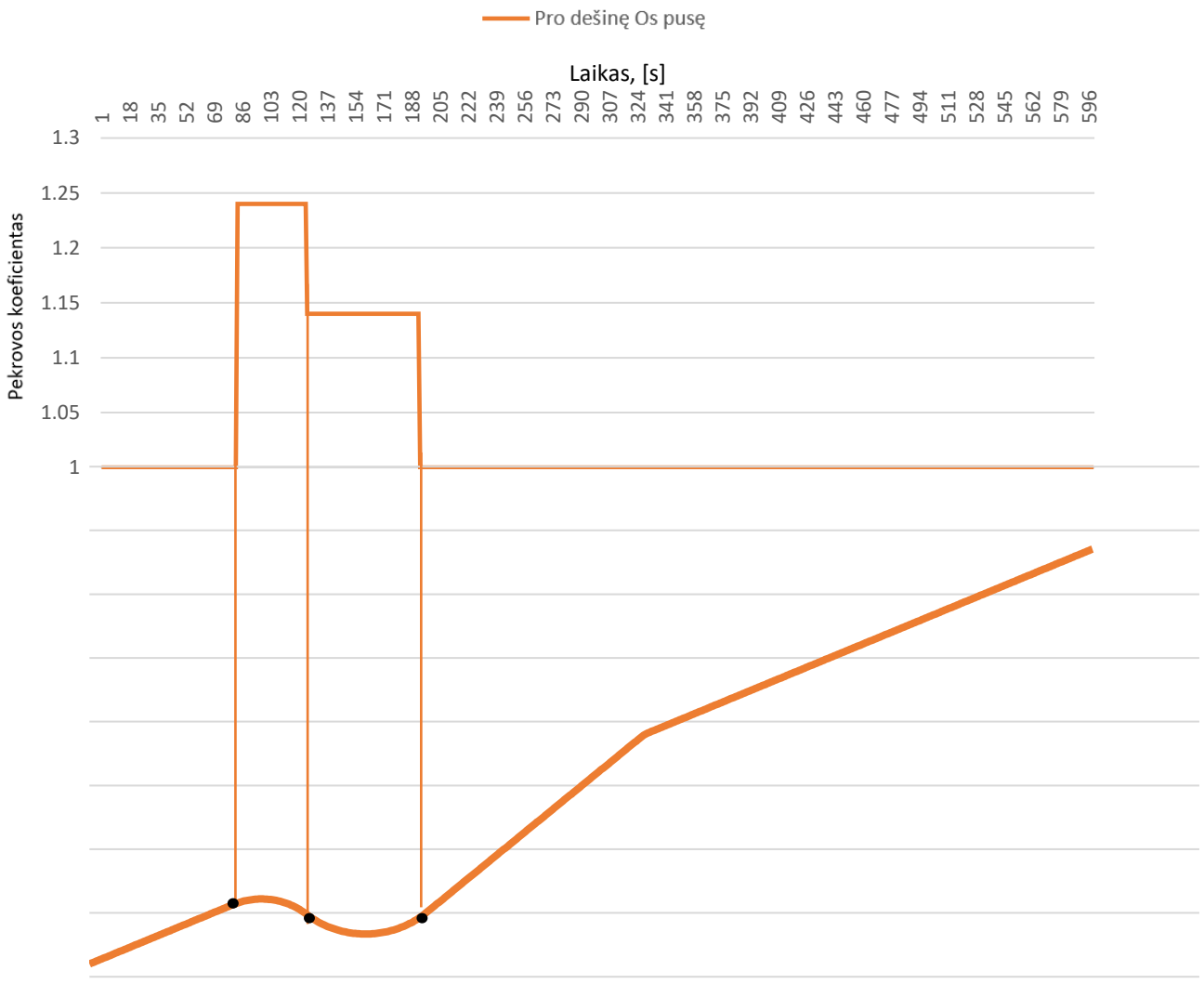
Nukreipiant orlaivį pro dešiniąja apskritimo $O_S$ pusę, mažiausias saugą užtikrinantis spindulys yra 6,6 jūrmylės. Skrydžio maršrutas pailgėja 47,44 jūrmylėmis arba 341,59 sekundėmis, kas sudaro papildomas degalų sąnaudos 280,66 kilogramais.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 60° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**20 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{Os} > 15$ | 1,14 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 67,73 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 40,70 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 108,43 |

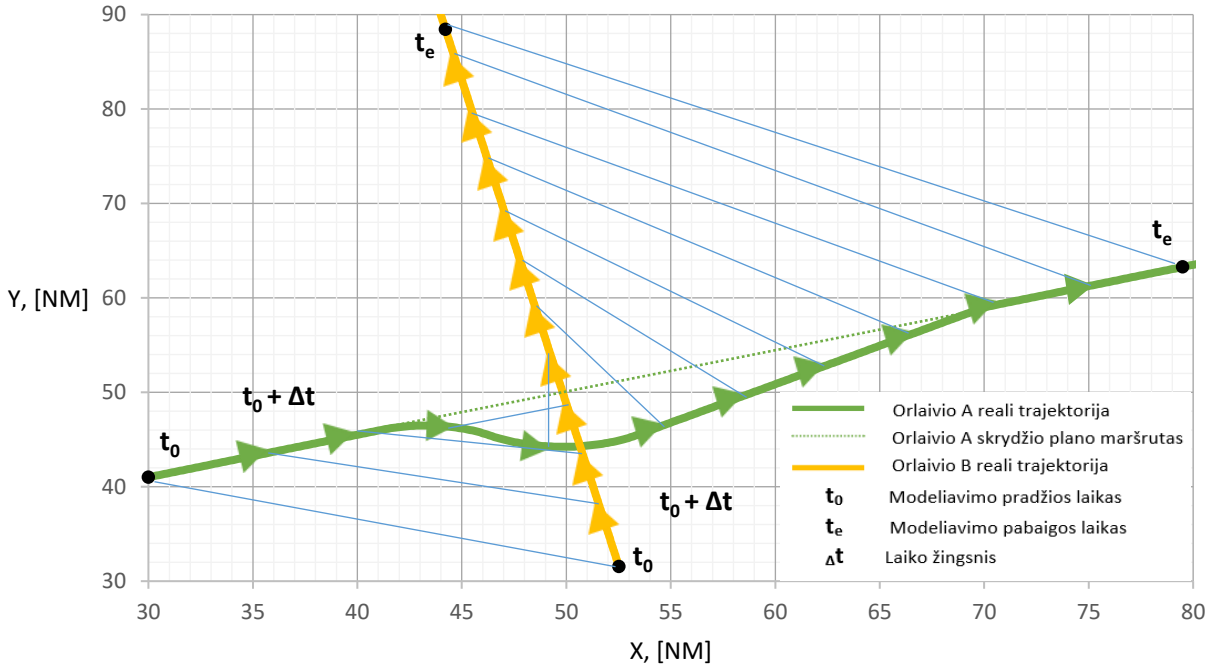
Perkrovos koeficiento reikšmė lygi 1,14, laikas praleistas skrendant $O_S$ lygus 67,73 sekundėms, kas neviršija komforto ribos. Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 39 paveiksle.




**39 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 60° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

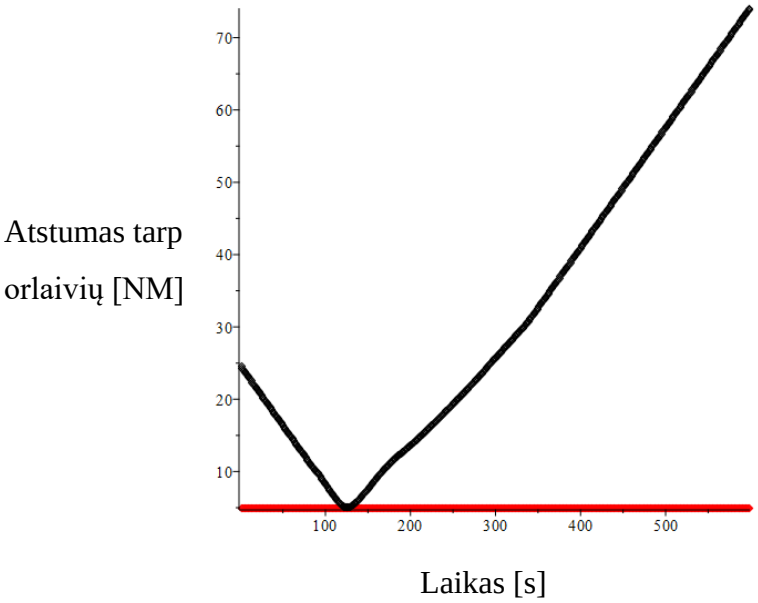
## 3.8 Pradinio kampo 70° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 70° modeliavimo kampui.




**40 pav**. Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 70°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Tarp orlaivių A ir B mažiausias pasiekiamas atstumas yra 5,06 jūrmylės. Minimalus saugus atstumas tarp orlaivių yra užtikrinamas viso modeliavimo metu esant 70° kampui.




**41 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 70° kampui (sudaryta autorės)

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 70° kampui.

**21 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{O_S} > 15$ | 46,97 |
| Laikas [s] | $r_{O_S} > 15$ | 338,90 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{O_S} > 15$ | 277,88 |

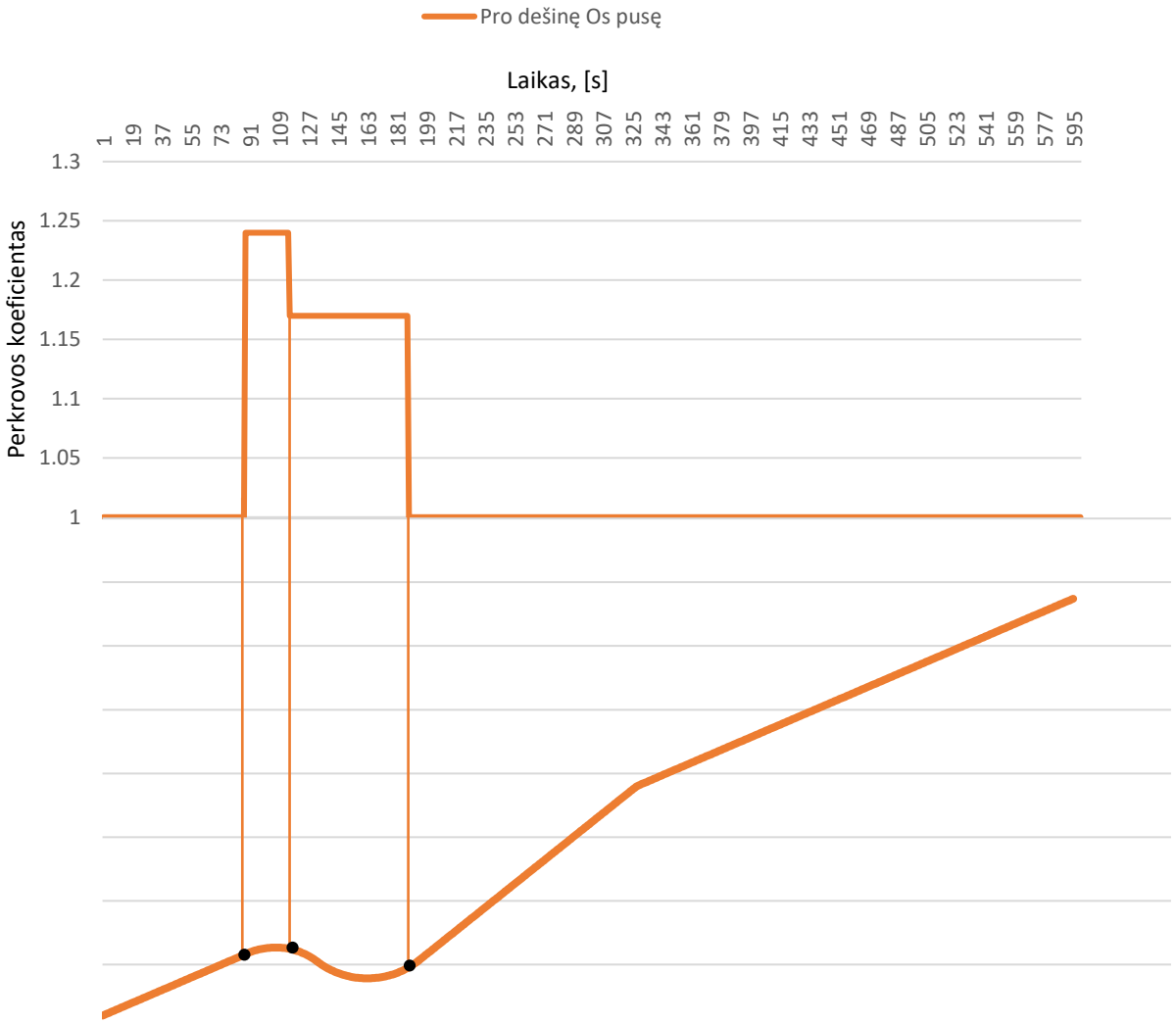
Atstumo pailgėjimas lygus 46,97 jūrmylės, gaunamas $O_S$ spindulys lygus 6 jūrmylėms. Degalų sąnaudos padidėtų 277,88 kilogramais.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 70° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**22 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{O_S} > 15$ | 1,17 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 59,17 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 39,56 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 98,73 |

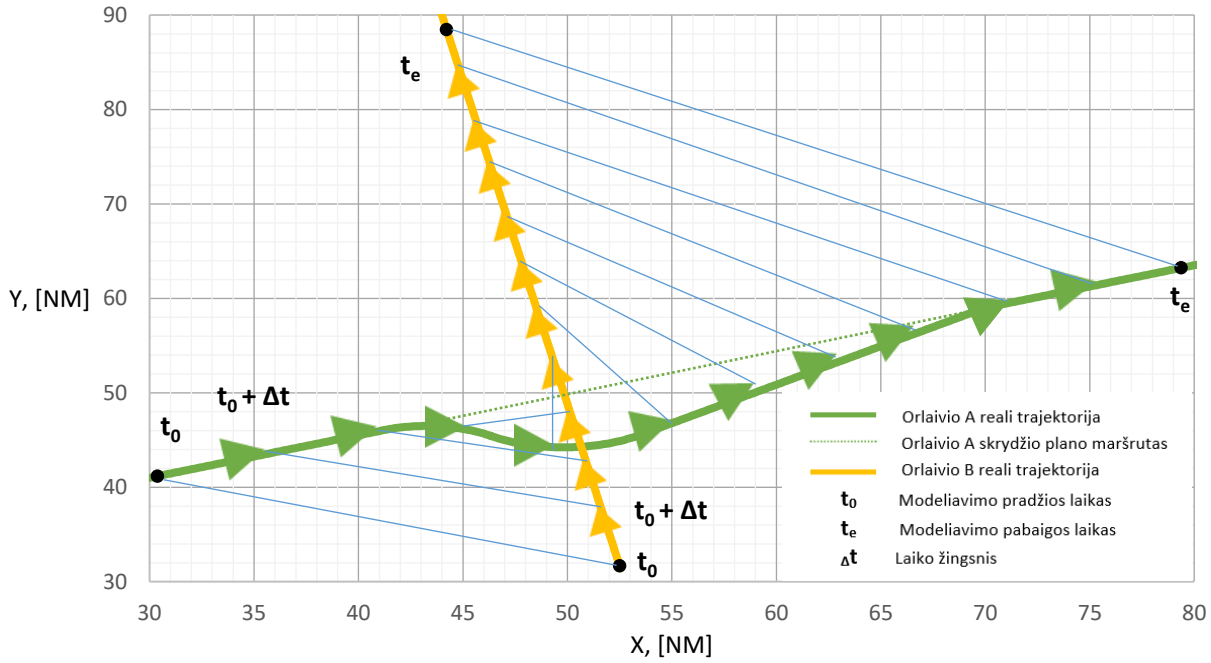
Perkrovos koeficiento reikšmė lygi 1,17, artėjanti link komforto ribinės vertės, tačiau laikas praleistas patiriant perkrovą nesiekia 60 sekundžių, todėl trajektorijos nukreipimas pro dešinę puse laikomas priimtinu keleivių patogumui. Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 42 paveiksle.




**42 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 70° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

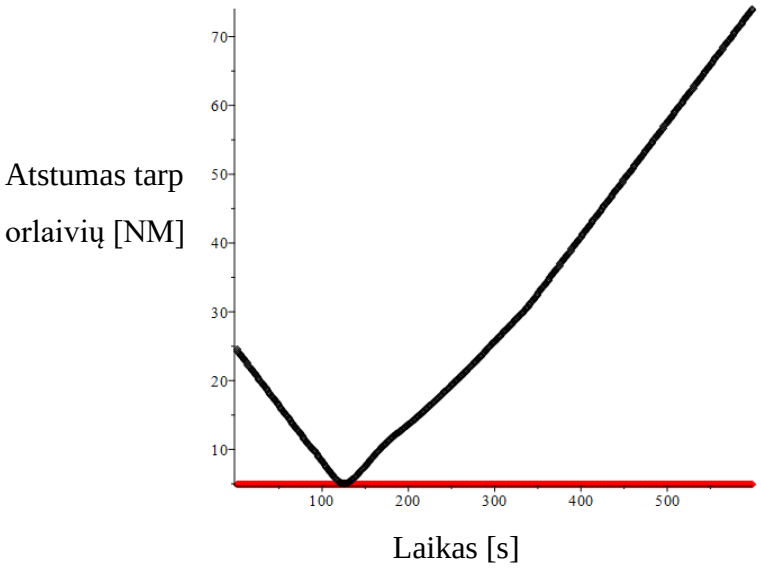
## 3.9 Pradinio kampo 75° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 75° modeliavimo kampui.




**43 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 75°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Minimalus saugus reikalaujamas atstumas yra užtikrinamas, nes mažiausias atstumas tarp orlaivių yra 5,03 jūrmylės.




**44 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 75° kampui (sudaryta autorės)

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 75° kampui.

**23 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{O_S} > 15$ | 46,75 |
| Laikas [s] | $r_{O_S} > 15$ | 336,60 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{O_S} > 15$ | 276,57 |

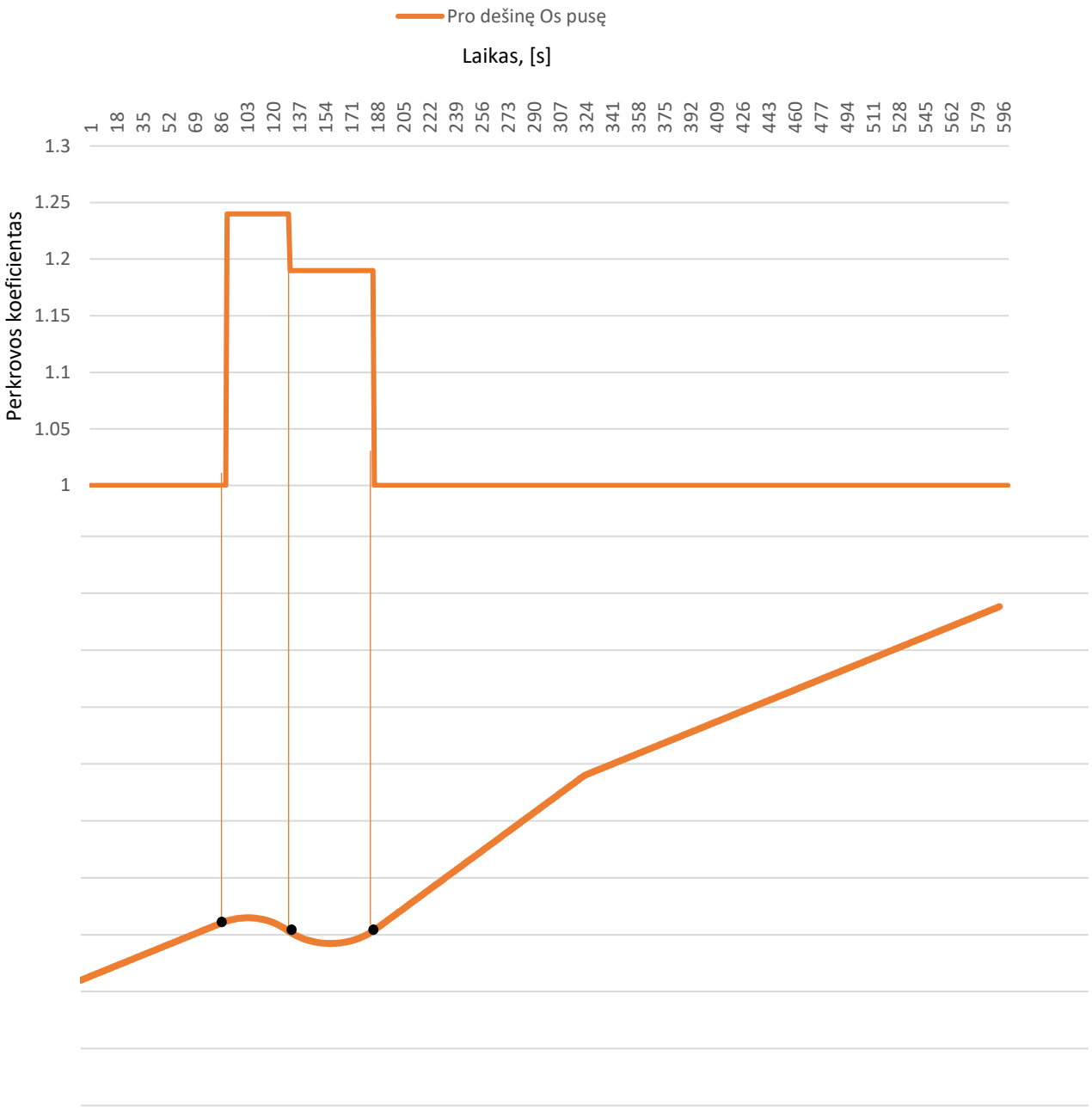
Dešiniąja trajektorija skrendant apskritimo spindulys lygus 5.7 jūrmylėms, maršrutas pailgėja 46,75 jūrmylėmis, 336,60 sekundėmis, papildomos degalų sąnaudos 276,57 kilogramai.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 75° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**24 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{O_S} > 15$ | 1,19 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 55,05 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 39,04 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 94,10 |

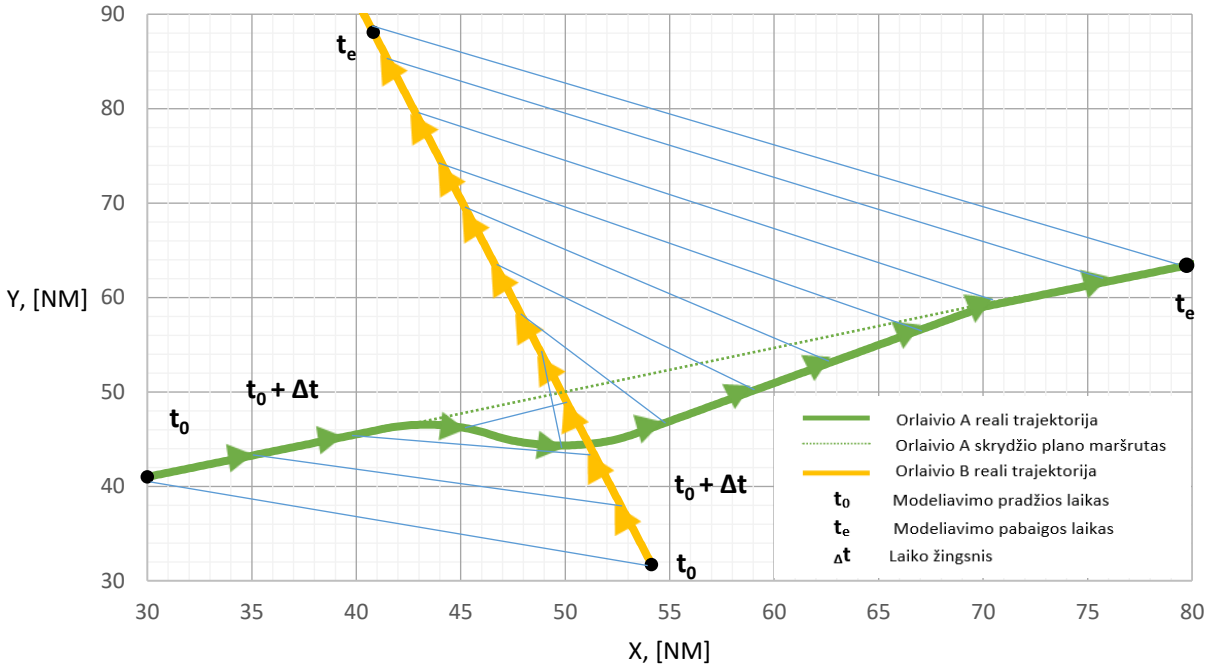
Duomenys rodo, jog esant 75° kampui, dešiniąja apskritimo puse, konfliktui išvengti turi būti atliekamas gilus posūkis, kuriuo metu perkrovos koeficiento reikšmė bus lygi 1,19, tačiau laiko trukmė, patiriant šią apkrova, bus mažesnė nei 60 sekundžių, todėl ji laikoma priimti keleivių patogumui. Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 45 paveiksle.




**45 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniaja puse atvaizdavimas esant 75° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

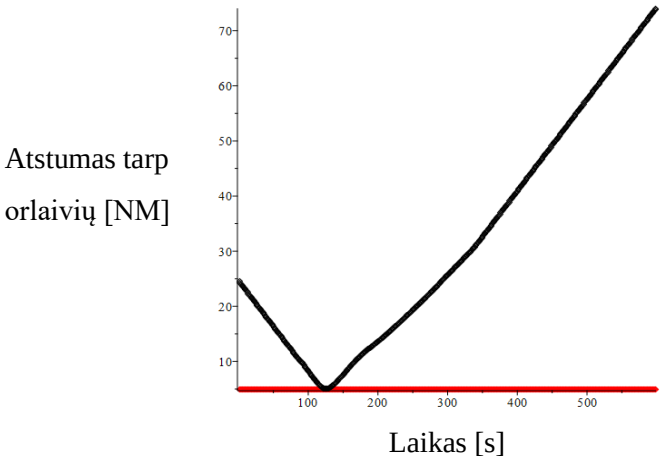
## 3.10 Pradinio kampo 80° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 80° modeliavimo kampui.




**46 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 80°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Mažiausias atstumas tarp orlaivių yra lygus 5,03 jūrmylės. Orlaiviai išlaiko saugą viso konflikto vengimo manevro metu.




**47 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 80° kampui (sudaryta autorės)

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 80° kampui:

**25 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{Os} > 15$ | 46,67 |
| Laikas [s] | $r_{Os} > 15$ | 336,02 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{Os} > 15$ | 276,10 |

Dešiniąja trajektorija skrendant apskritimo spindulys lygus 5,6 jūrmylėms, maršrutas pailgėja 46,67 jūrmylėmis, 336,02 sekundėmis, papildomos degalų sąnaudos 276,10 kilogramai.

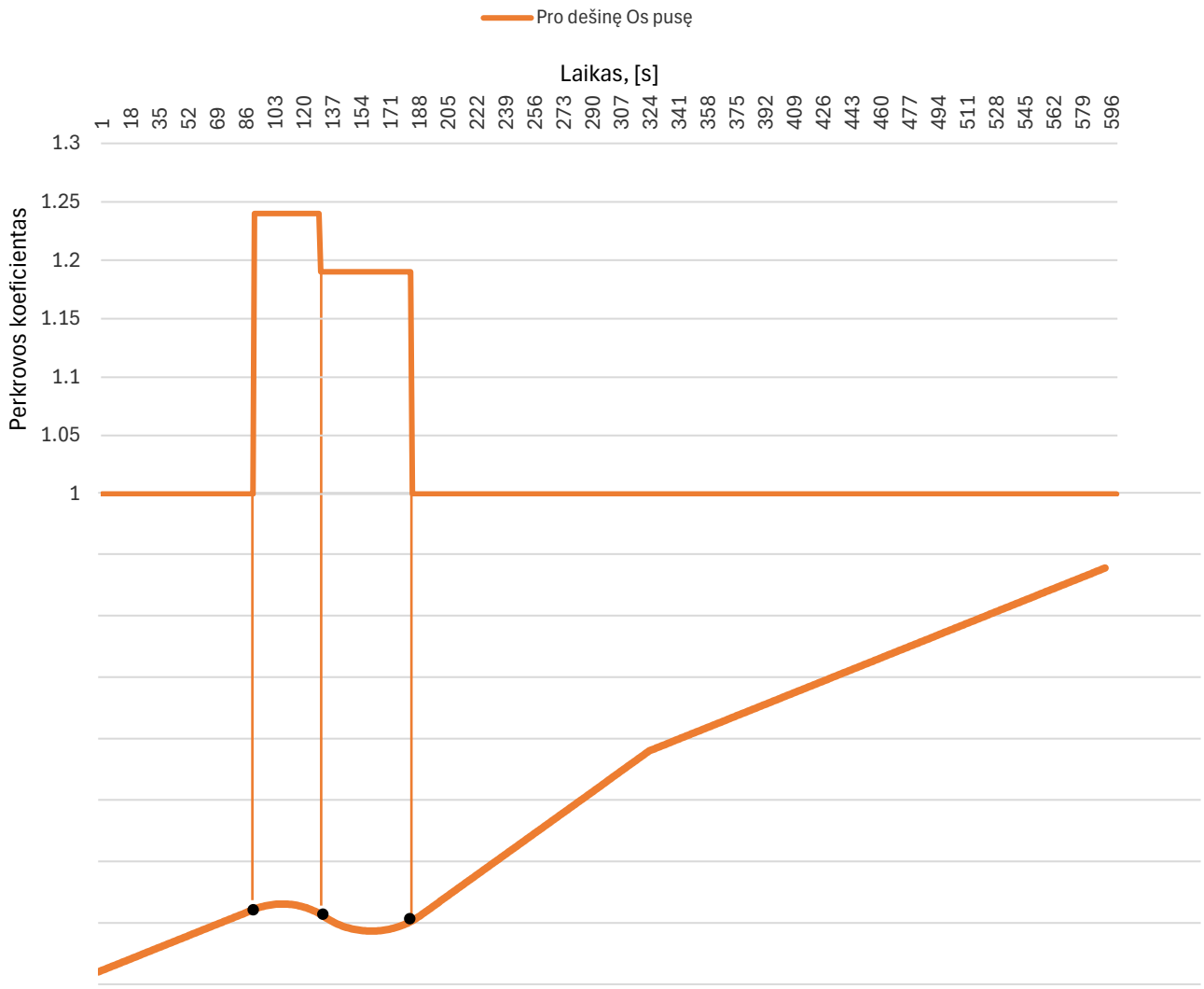
Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 80° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami 26 lentelėje.

**26 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{Os} > 15$ | 1,19 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 53,70 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 38,87 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{Os} > 15$ | 92,56 |

Dešinioji apskritimo lanko trajektorija yra laikoma priimta nors perkrovos reikšmė lygi 1,19 G, nes laikas praleista patiriant perkrovą yra lygus 53,70 sekundėms. Perkrovos koeficiento

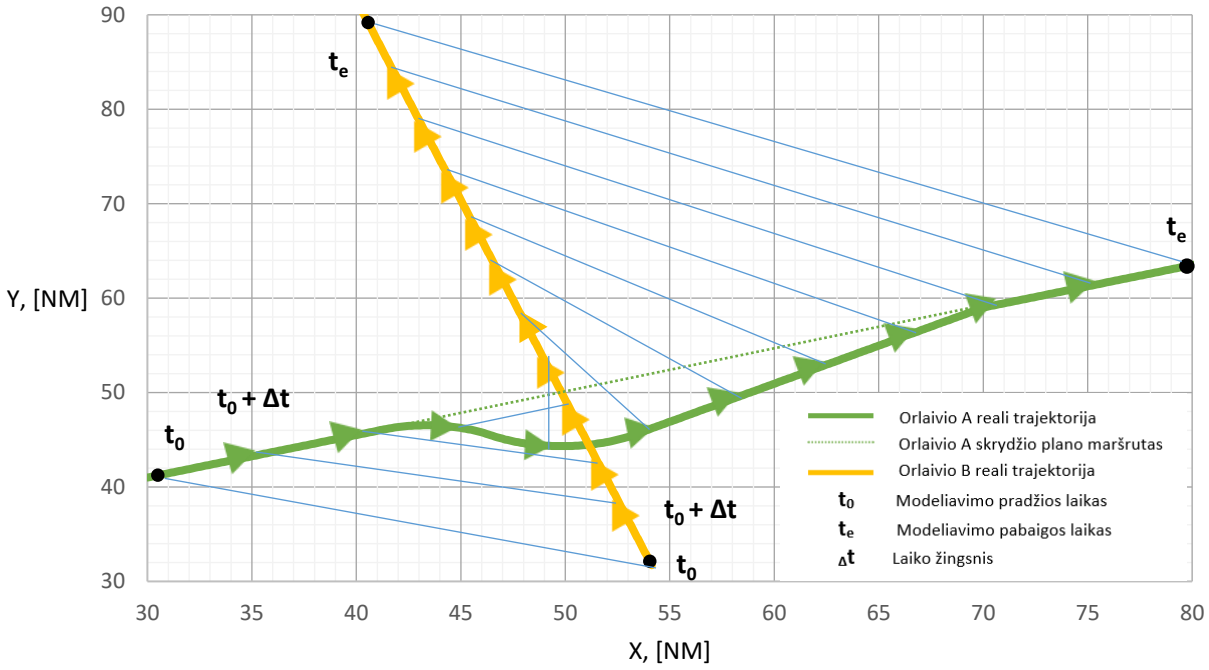
pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 48 paveiksle.




**48 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 80° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

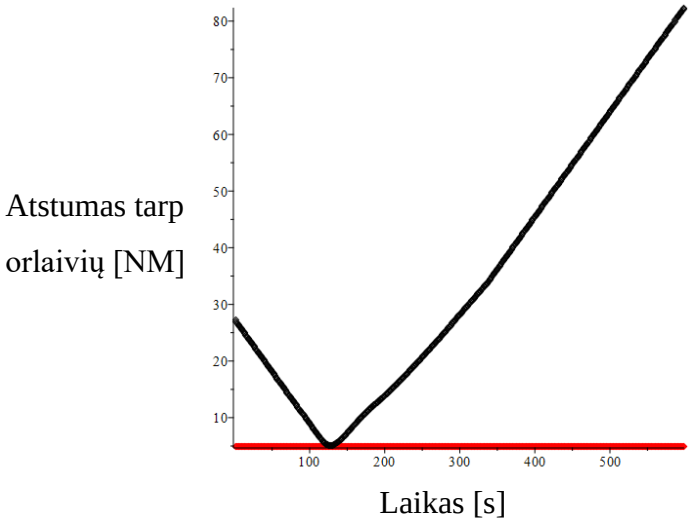
## 3.11 Pradinio kampo 85° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis. Grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 85° modeliavimo kampui.




**49 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 85°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)

Orlaivių trajektorijų suartėjimą modeliavimo metu galima matyti 50 paveiksle.




**50 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniąja apskritimo puse, esant 85° kampui (sudaryta autorės)

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 85° kampui.

**27 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{O_S} > 15$ | 46,60 |
| Laikas [s] | $r_{O_S} > 15$ | 335,20 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{O_S} > 15$ | 275,69 |

Orlaiviui skrendant dešiniąja apskritimo $O_S$ puse, mažiausias trajektorijos pailgėjimas gaunamas esant $r_{O_S} = 5{,}5$ jūrmylės ir jis lygus 46,60 jūrmylės. Laiko atžvilgiu trajektorija tampa ilgesnė 335,20 sekundėmis, papildomai sunaudojama 275,69 kilogramai degalų.

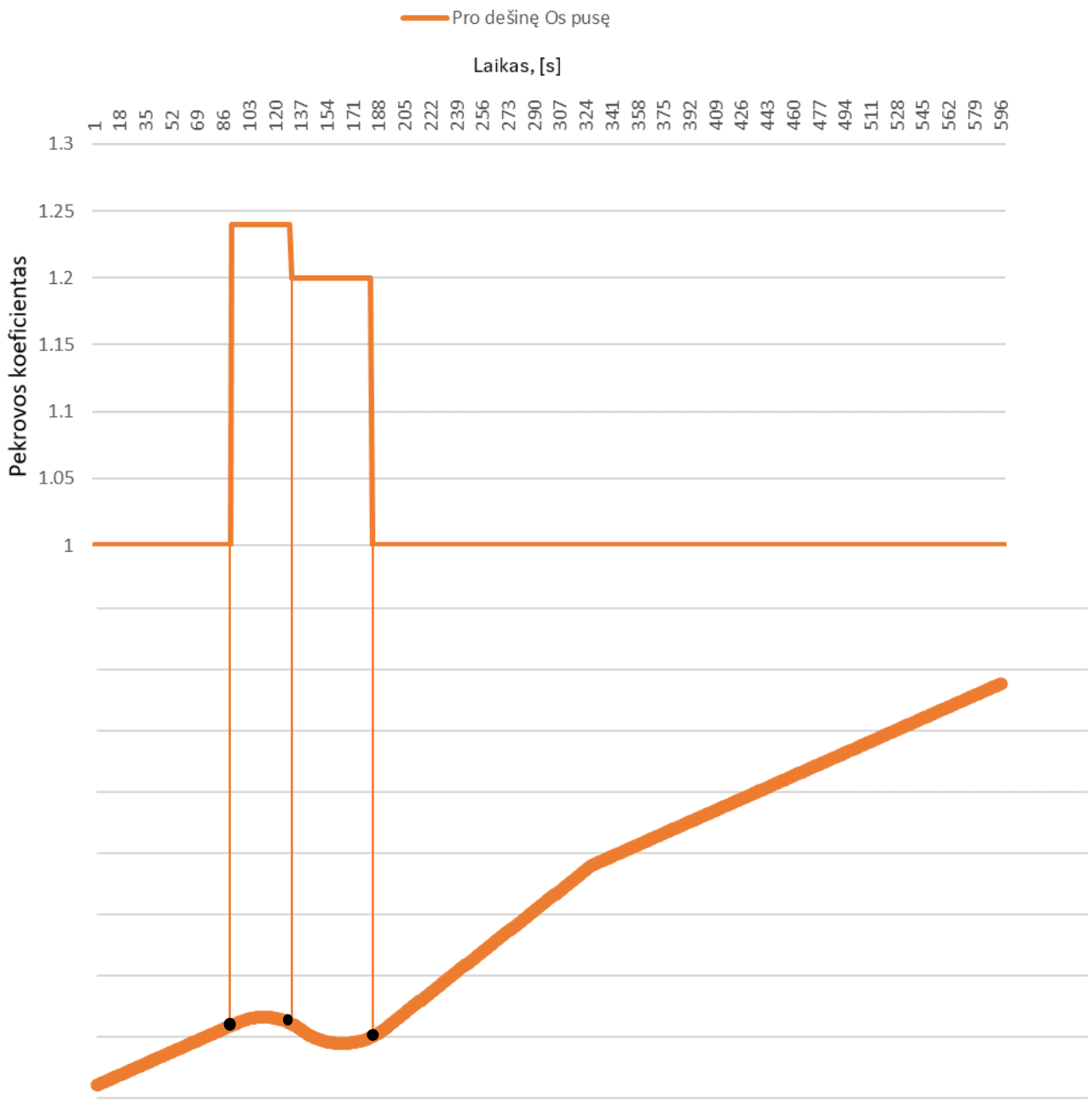
Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 85° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**28 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju $O_S$ apskritimo perimetru, esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{O_S} > 15$ | 1,20 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 52,35 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 38,68 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 91,03 |

Esant 85° kampui, nors ir esama perkrovos koeficiento reikšmė yra lygi 1,20, laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško gaunamas 52,35 sekundės, todėl dešiniojo apskritimo lanko trajektorija

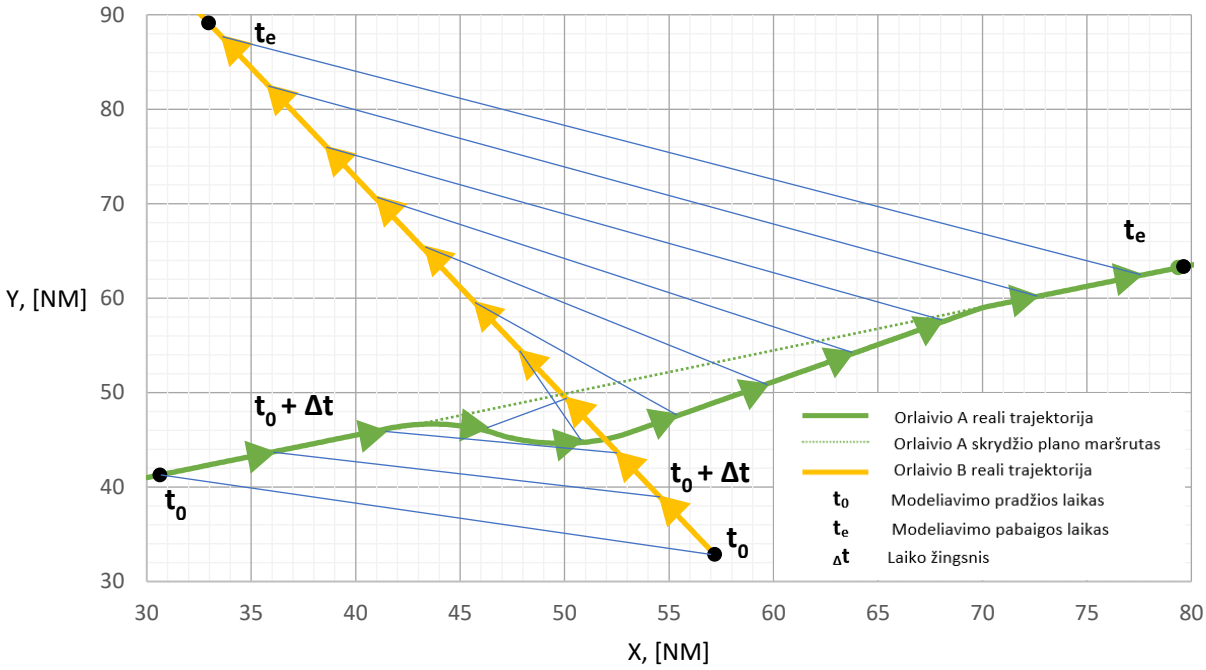
nesukeltų didelio diskomforto keleiviams. Perkrovos koeficiento pasiskirstymas, orlaiviui skrendant Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo lanku gali būti atvaizduojamas grafiškai 51 paveiksle.



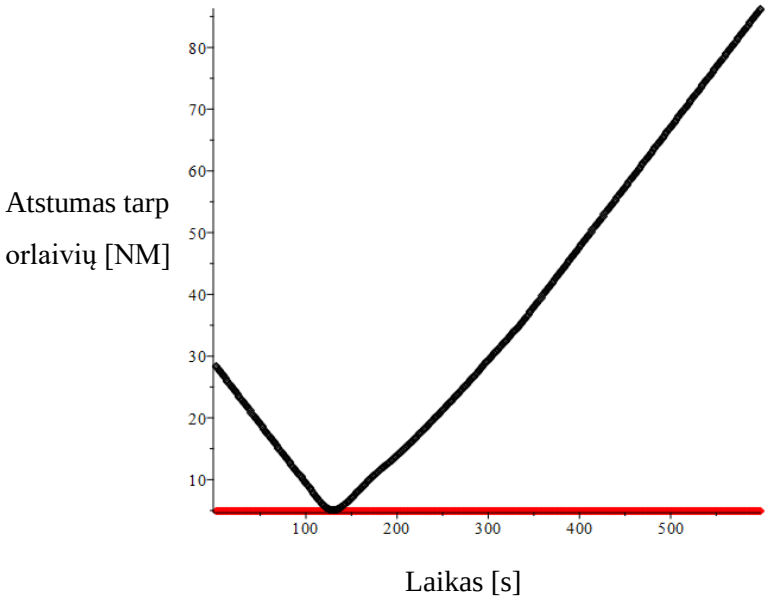

**51 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 85° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

## 3.12 Pradinio kampo 90° tarp skrydžio trajektorijų analizė

Saugos kriterijui įvertinti pateikiamas grafinis orlaivių trajektorijų susikirtimo sprendimo tyrimas taikant Dubinso metodą, kai trajektorijos eina apskritimo dešiniuoju perimetru, esant 90° modeliavimo kampui.




**52 pav.** Orlaivio A ir B trajektorijos, kai pradinis kampas yra 90°, dešiniuoju apskritimo perimetru (sudaryta autorės)




**53 pav**. Atstumas tarp orlaivių, kai skrendama dešiniaja apskritimo puse, esant 90° kampui (sudaryta autorės)

Gaunamas mažiausias atstumas tarp orlaivių yra 5,01 jūrmylės, vadinasi sugeneruota trajektorija atitinka saugos reikalavimus.

Antrasis vertinamas kriterijus yra trajektorijos racionalumas. Lentelėje pateikiami trajektorijos atstumo, skrydžio laiko, degalų sąnaudų duomenys orlaiviui skrendant pro dešiniąja apskritimo pusę esant 90° kampui.

**29 lentelė**. Orlaivio A skrydžio Dubinso trajektorija dešiniuoju apskritimo perimetru, esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui, racionalumo parametru duomenys (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | $r_{O_S} > 15$ | 46,46 |
| Laikas [s] | $r_{O_S} > 15$ | 334,51 |
| Degalų sąnaudos [kg] | $r_{O_S} > 15$ | 274,86 |

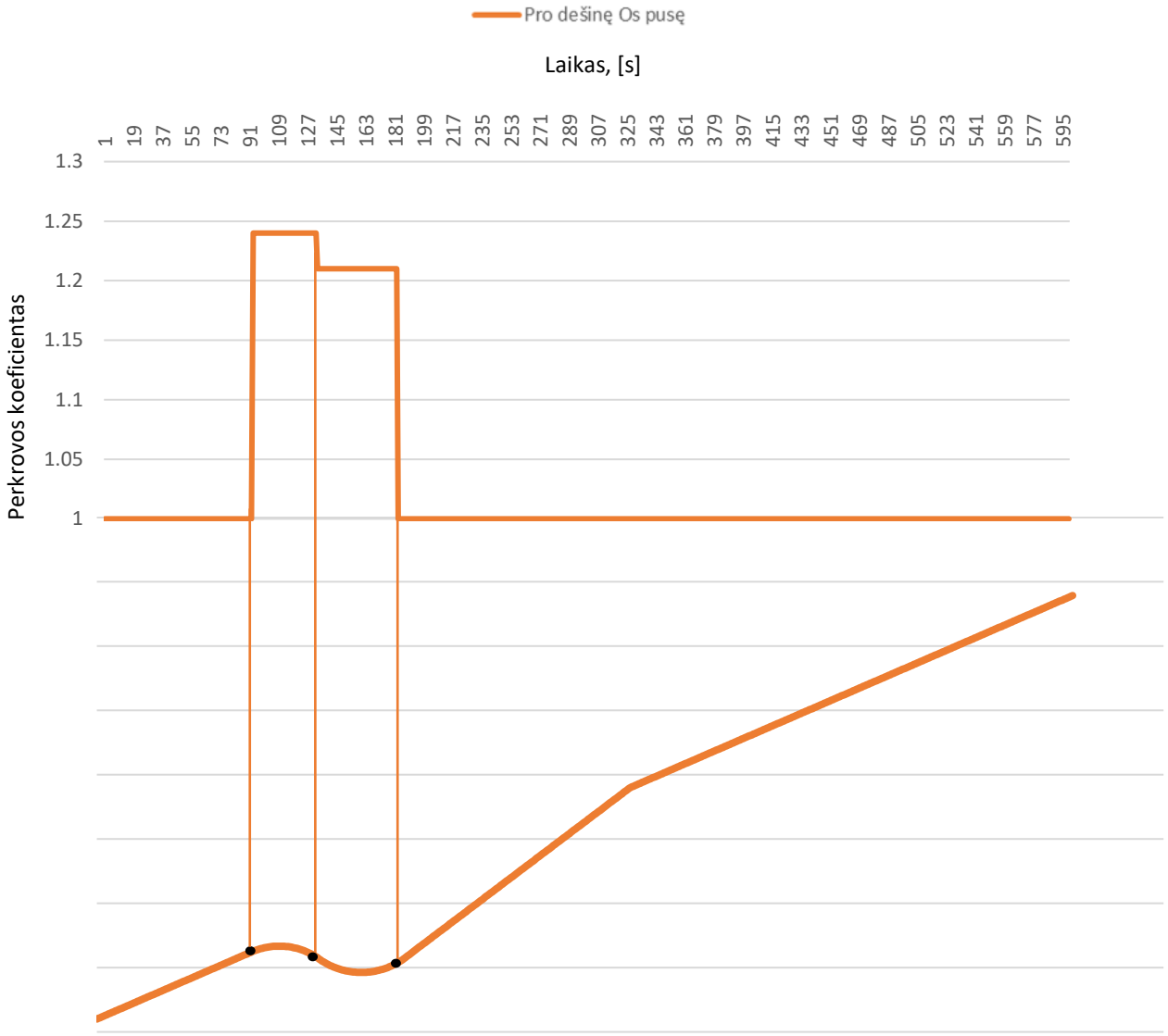
Dešiniąja trajektorija, apskritimo $O_S$ spindulys lygus 5,3 jūrmylės, maršrutas pailgėja 46,46 jūrmylės arba 334,51 sekunde. Degalų sąnaudos padidėja 274,86 kilogramais.

Žinant $O_S$ apskritimo spindulio duomenis, galima įvertinti keleivių komforto kriterijų. Perkrovos koeficiento patiriamo skrendant $O_S$ apskritimu ir laiko praleisto skrendant $O_1$ ir $O_S$ perimetrais, duomenys esant 90° kampui skrendant dešiniąja apskritimo puse pateikiami lentelėje.

**30 lentelė.** Perkrovos ir laiko, praleisto patiriant perkrovą, duomenys orlaiviui A skrendant dešiniuoju OS apskritimo perimetru, esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

| | Pro kairę | Pro dešinę |
|---|---|---|
| Perkrova (nuo 2 iki 3 būdingo taško) | $r_{O_S} > 15$ | 1,21 |
| Laikas, praleistas skrendant nuo 2 iki 3 taško [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 49,69 |
| Laikas, praleistas skrendant $O_1$ [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 38,30 |
| Bendras laikas skrendant apskritimų perimetrais [sekundės] | $r_{O_S} > 15$ | 88,00 |

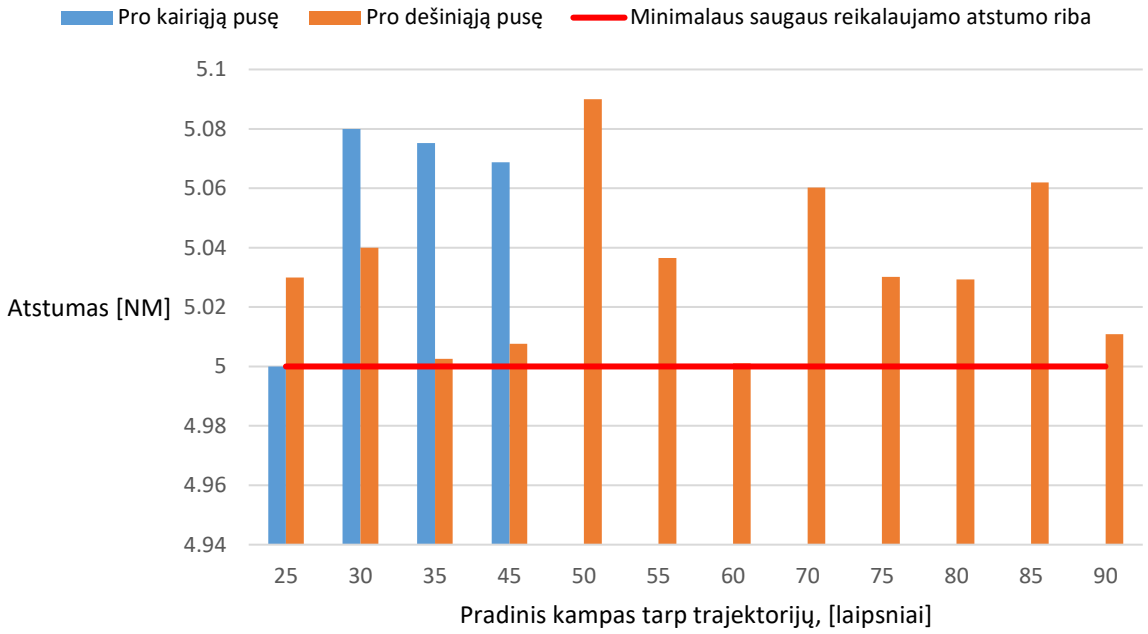
Esant 90° kampui trajektorijų susikirtimo kampui, konflikto vengimo metu būtų patiriama 1,21 perkrova, kuri truktu 49,69 sekundes, kas yra laikoma priimtina keleivių komfortui.




**54 pav.** Grafinis perkrovos koeficiento patiriamo skrendant apskritimo $O_S$ dešiniąja puse atvaizdavimas esant 90° trajektorijų susikirtimo kampui (sudaryta autorės)

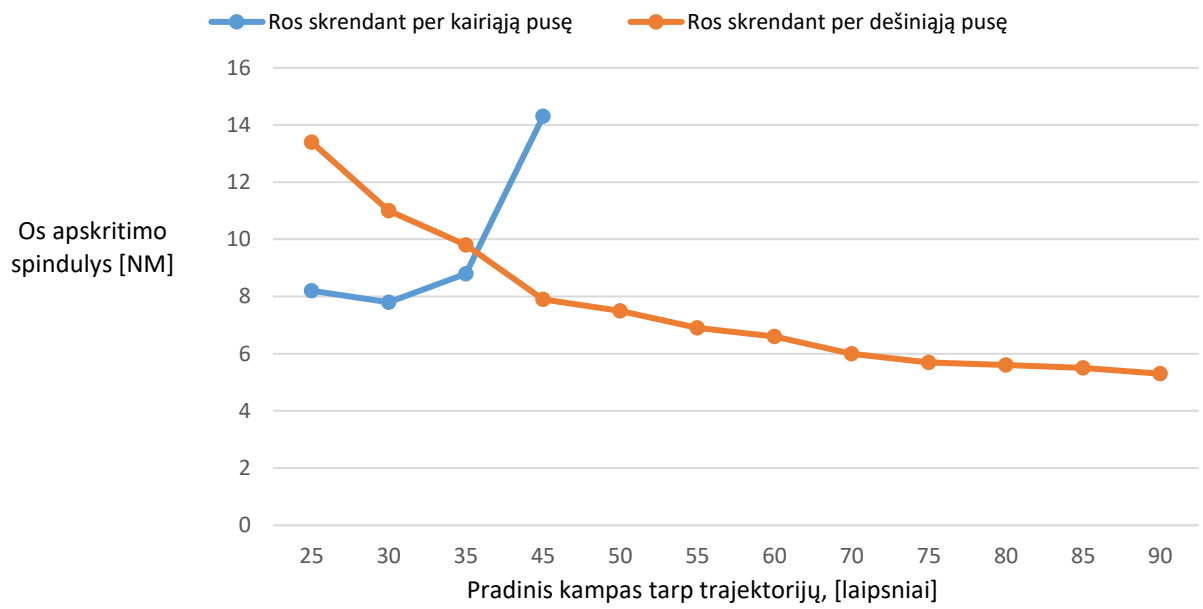
## 3.13 Bendra kampų analizė

Remiantis duomenimis, gautais prie kiekvieno tiriamojo pradinio kampo tarp dviejų orlaivių skrydžio trajektorijų, galima vertinti, kaip kinta minimalus atstumas tarp orlaivių, konflikto spendimo manevro metu. Visais modeliavimo atvejais kodo apskaičiuojamas mažiausias atstumas tarp orlaivių buvo didesnis nei reikalaujamas minimalus saugus 5 jūrmylių atstumas.

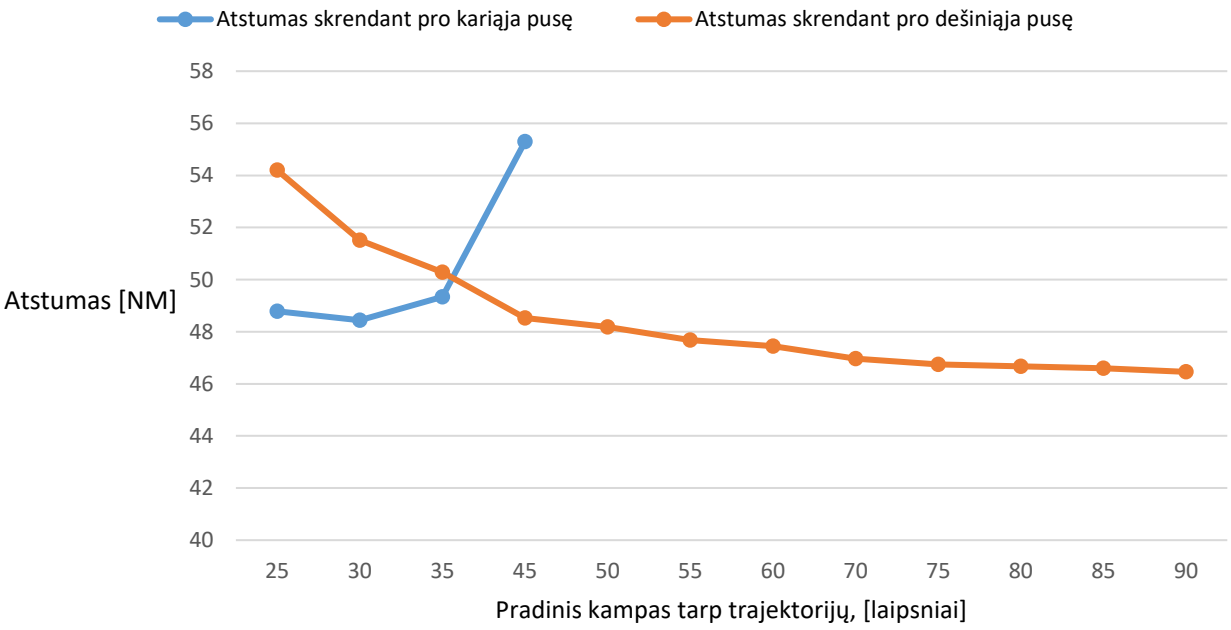



**55 pav.** Mažiausias atstumas tarp orlaivių prie kiekvieno tiriamojo pradinio kampo tarp skrydžio trajektorijų (sudaryta autorės)

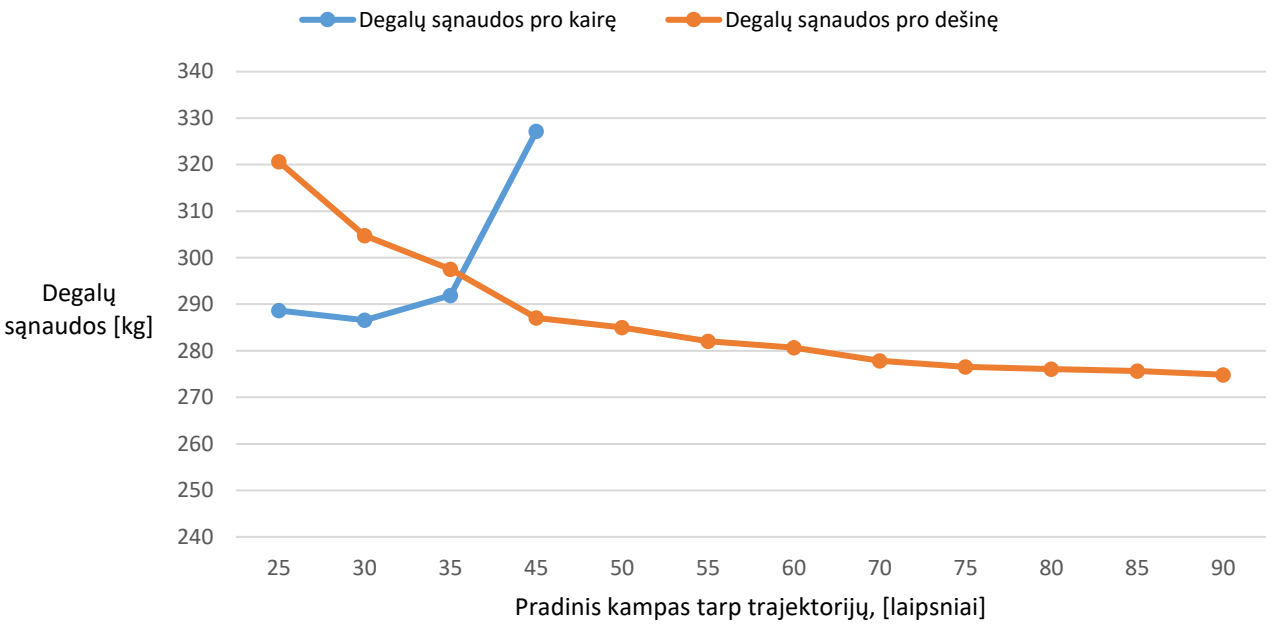
Remiantis atskirų kampų analizės metu gautais minimalaus atstumo tarp orlaivių grafikais, orlaivio nukreipimas dešiniuoju apskritimo perimetru apskritimo užtikrina didesnę saugą, nes kai orlaivis yra nukreipiamas paskui kitą konflikte dalyvaujantį orlaivį, gaunamas tik vienas suartėjimas tarp trajektorijų, o skrendant kairiąja trajektorija, modeliavimo metu orlaivių trajektorijos priartėja du kartus.




**56 pav.** $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)



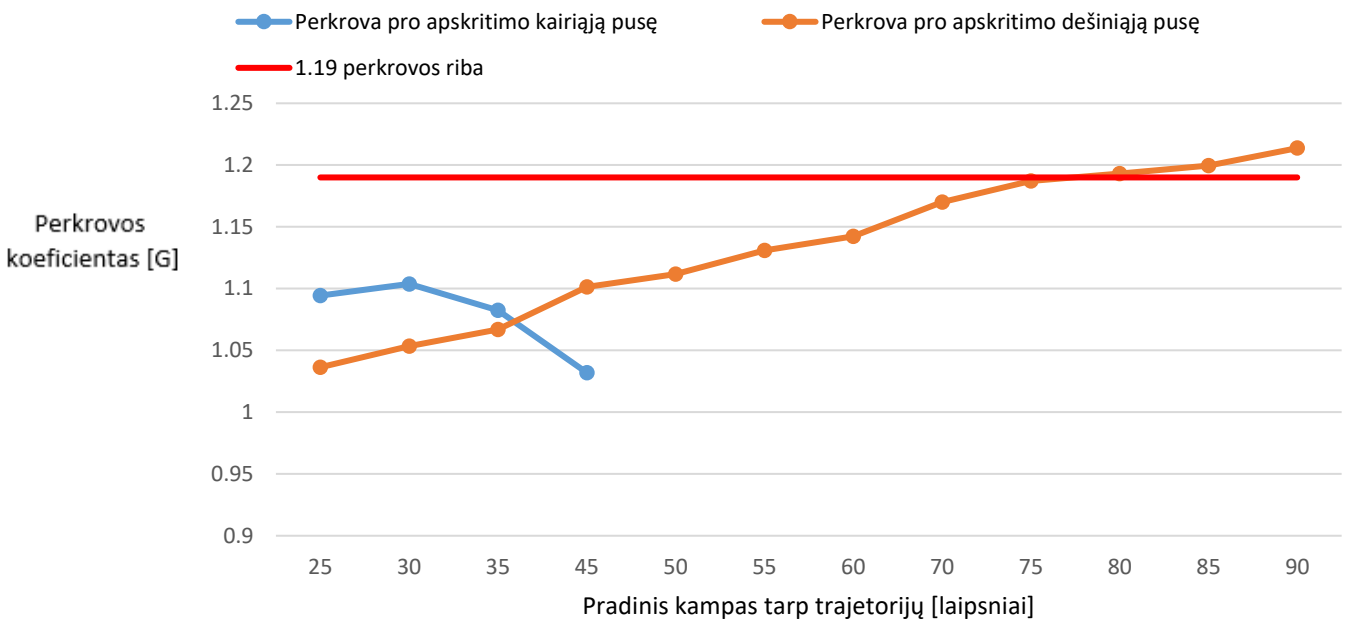

**57 pav**. Atstumo pailgėjimo priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)



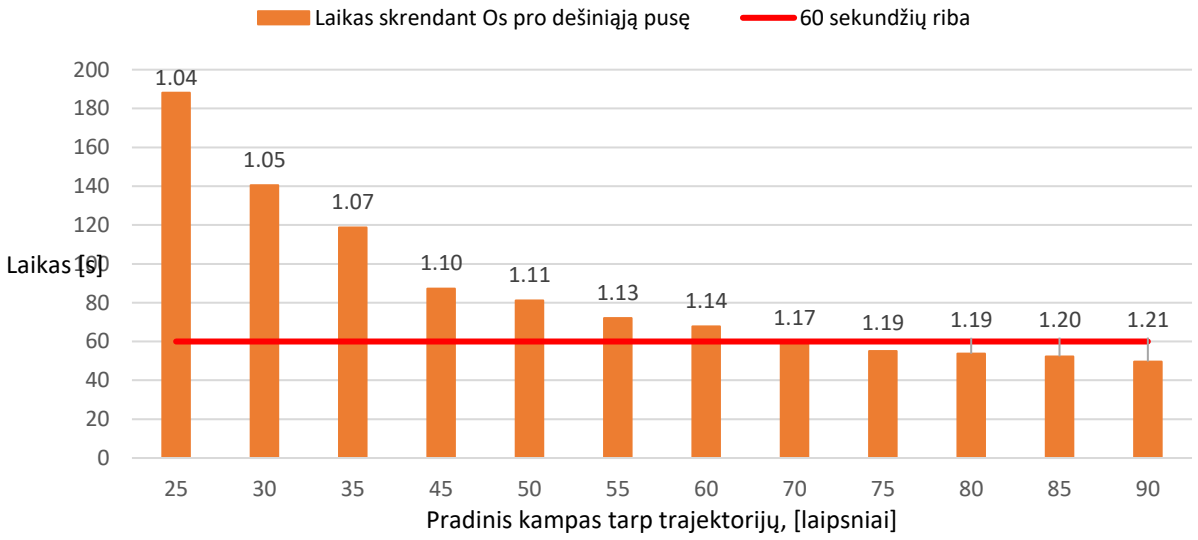

**58 pav.** Papildomų degalų sąnaudų priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų, skrendant kairiąja bei dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

56 – 58 paveikslai rodo labai panašią parametrų kitimo tendenciją, keičiantis orlaivių trajektorijų susikirtimo kampui. Didėjant susikirtimo kampui skrydžio dešiniąja trajektorija metu, apskritimo spindulys, atstumas bei degalų sąnaudos eksponentiškai mažėja. Žymus nuolydis pastebimas 25° – 45° intervale, kuris sulėtėja nuo 45° iki 90°. Trajektorija pro apskritimo kairiąją pusę neturi tokios aiškios tendencijos. Nuo 25° iki 30° laipsnių yra pastebimas parametrų sumažėjimas visuose trijuose grafikuose. Nuo 30° iki 35° vaizduojamas nežymus padidėjimas, kuris išauga tarp 35° iki 45°. Nuo 45° duomenys nėra pateikiami, apskritimo spindulys viršija 15 jūrmylių. Norint suprasti šį duomenų nepastovumą trajektorijos kairiąja apskritimo puse, buvo atlikta papildomų kampų analizė (27° ir 33°). Esant 27° kampui, $O_S$ spindulys sumažėja iki 7,7 jūrmylių ir esant 33° padidėja iki 8,5 jūrmylių. Viena iš priežasčių gali būti netikslumai skaičiuojant pradines bei galines taškų koordinates, trūkstamos komandos kode.

Iš tiriamųjų kampų, didžiausias skirtumas tarp kairiosios ir dešiniosios trajektorijos yra kai kampas tarp trajektorijų yra 45°, kur ΔS = 6,77 jūrmylės, Δt = 48,74 sekundės, degalų sąnaudų skirtumas lygus 40,05 kilogramo. Galima daryti išvadą, jog šis skirtumas didėtų, jei būtų tęsiami skaičiavimai, kai $R_{O_S}$ > 15 jūrmylių. Mažiausias skirtumas gaunamas, kai yra 35° kampas, ΔS = 0,95 jūrmylės, Δt = 6,86 sekundės, degalų sąnaudų skirtumas lygus 5,64 kilogramo.



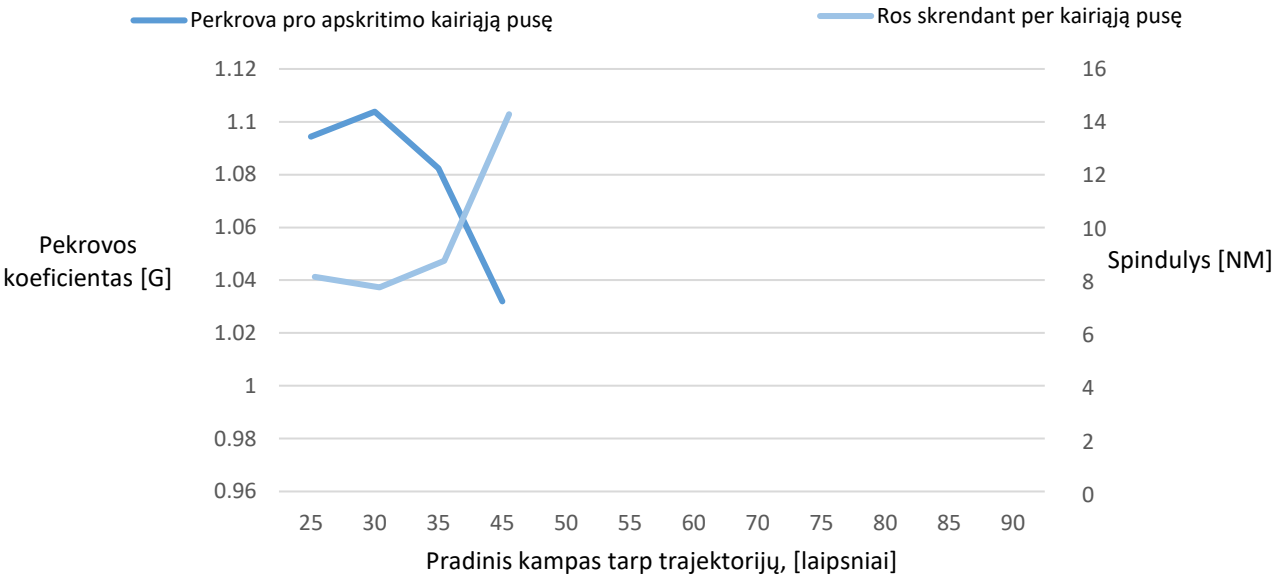

**59 pav.** Perkrovos koeficiento priklausomybė nuo kampo tarp trajektorijų dešiniąja ir kairiąja apskritimo puse (sudaryta autorės)



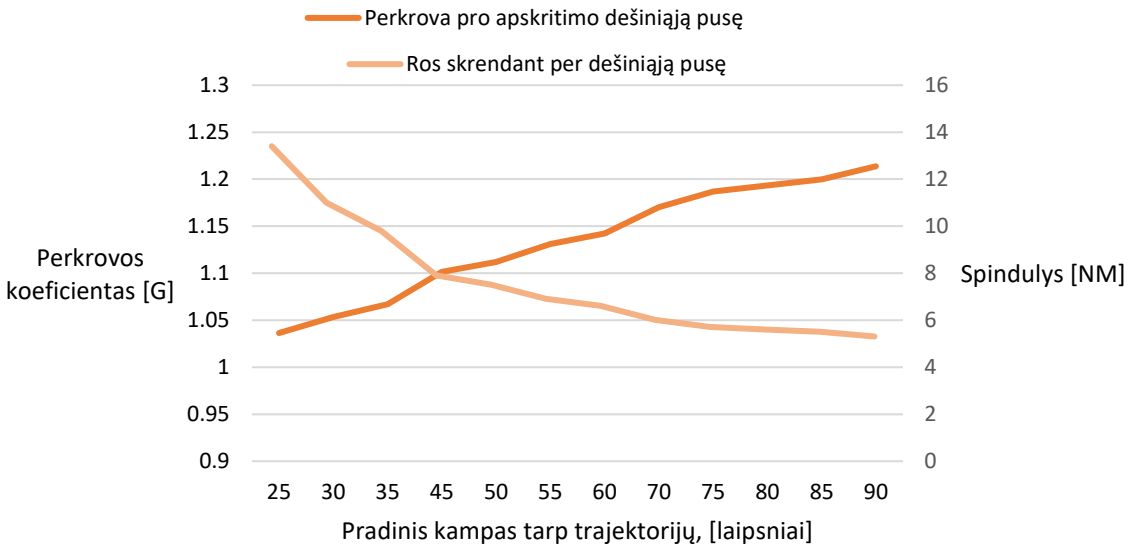

**60 pav.** Skrydžio trukmė skrendant dešiniąja apskritimo $O_S$ perimetru kintant kampui tarp trajektorijų (sudaryta autorės)

Orlaiviui skrendant kairiąja apskritimo $O_S$ puse, perkrovos koeficientas niekada neviršija 1,19 reikšmės. Skrendant dešiniąja trajektorija, 1,19 reikšmė yra viršijama arba lygi nuo 75° kampo ($r_{O_S}$ = 5,7 jūrmylės). Tačiau 59 paveiklo duomenys rodo, jog esant 75° kampui, skrydžio trukmė, patiriant perkrovą, nesiekia 60 sekundžių, ir didėjant orlaivių trajektorijų susidūrimo kampui, laikas vis

trumpėja, todėl galima teigti, jog visos trajektorijos nagrinėtos šiame tyrime atitinka keleivių komforto reikalavimus. Kadangi skaičiuojant perkovos koeficientą, vienintelis kintamasis yra $r_{O_S}$, kuris yra atvirkščiai proporcingas pačiam perkrovos koeficientui, grafike matomos tendencijos priešingos pavaizduotoms 60 paveiksle. Didėjant $O_S$ apskritimo spinduliui, perkrovos koeficiento reikšmė mažėja ir atvirkščiai.




**61 pav.** Perkrovos koeficiento ir $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų kairiąja apskritimo puse (sudaryta autorės)




**62 pav.** Perkrovos koeficiento ir $O_S$ apskritimo spindulio priklausomybė nuo kampo tarp skrydžio trajektorijų dešiniąja apskritimo puse (sudaryta autorės)

## 3.14 Lūžio taško radimas

Atliekant individualią kairiosios ir dešiniosios apskritimo perimetro trajektorijos esant atitinkamam susidūrimo kampui analizę, iš gautų duomenų galima daryti prielaidą, jog tarp 35° ir 45° laipsnių kampo yra lūžio taškas, nuo kurio labiau apsimoka lėktuvą nukreipti dešiniuoju apskritimo lanku nei kairiuoju. Norint atrasti šį kampą, bus apskaičiuojami nuo 35° iki 45° intervalo kampai, kol bus randamas lūžio taškas.

**31 lentelė.** Lūžio taško radimo duomenys (sudaryta autorės)

| Kampas tarp trajektorijų laipsniais | Kairiąja apskritimo puse | | | Dešiniąja apskritimo puse | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $O_s$ spindulys, [jūrmylės] | Bendras atstumas, [jūrmylės] | Minimalus atstumas, [jūrmylės] | $O_s$ spindulys, [jūrmylės] | Bendras atstumas, [jūrmylės] | Minimalus atstumas, [jūrmylės] |
| 35° | 8,8 | 49,34 | 5,08 | 9,8 | 50,29 | 5,00 |
| 36° | 8,8 | 49,34 | 5,08 | 9,6 | 50,10 | 5,06 |
| **37°** | **9,4** | **49,90** | **5,07** | **9,3** | **49,81** | **5,01** |
| 38° | 9,7 | 50,19 | 5,05 | 9,0 | 49,52 | 5,05 |

Iš 31 lentelėje pateiktų duomenų, galima daryti išvadą, jog 37° yra lūžio taškas nuo kurio trajektorijos nukreipimas dešiniąja apskritimo puse nulemtų mažesnį bendrą įveiktą atstumą, tačiau gaunamas skirtumas tarp kairiosios ir dešiniosios trajektorijos yra nedidelis, 0,09 jūrmylės arba 0,65 sekundės. Didesnis minimalus atstumas yra užtikrinamas orlaiviui skrendant kairiąja puse, 5,07 jūrmylės. Įvertinant nedidelį skirtumą tarp kairiosios ir dešiniosios trajektorijų bei minimalų gautą atstumą, galima teigti, jog konflikto sprendimo atveju esant 37° kampui saugesnė yra kairioji trajektorija. Analizuojant 38° kampo duomenis kairiąja ir dešiniąja trajektorijomis, yra gaunamas vienodas minimalus atstumas tarp orlaivių ir 0,67 jūrmylėmis mažesnis bendras atstumas dešiniąja trajektorija, todėl esant šiam kampui tarp trajektorijų, racionalesnis yra dešiniosios trajektorijos pasirinkimas. Apibendrinant, orlaivio trajektorijos, esančios aplink lūžio tašką, ištirtame pradinių kampų intervale (35° – 38°) neturi reikšmingo skirtumo bendro atstumo pailgėjimo atžvilgiu (didžiausias gautas skirtumas yra 0,95 jūrmylės). Visos trajektorijos užtikrina minimalų saugų

reikalaujamą atstumą tarp orlaivių bei nepažeidžia keleivių komforto sąlygos, todėl pasirinkimas tarp kairiosios ir dešiniosios konflikto sprendimo trajektorijos galėtų būti sprendžiamas atsižvelgiant į pasirinktos trajektorijos poveikį aplinkiniam oro eismui.

## 3.15 35° kampo susidūrimo trajektorijos palyginimas su A. Dudoit disertacija

Šiame tyrime atliktą 35° kampo Dubinso metodo dešiniojo perimetro trajektoriją galima palyginti su Dudoit (2022) atliktu tyrimu, kuriame Dubinso metodas kairiuoju apskritimo lanku buvo lyginamas su 3HC metodu esant 35° susidūrimo kampui.

**32 lentelė.** Palyginimas su Dudoit (2022) disertacijos rezultatais (sudaryta autorės)

| | Dubinso metodas pro kairiąją pusę (Dudoit, 2022) | Naujai siūlomas Dubinso scenarijus (Pro $O_S$ dešiniąją pusę) | Dudoit (2022) disertacijos 3HC scenarijus (Pro Os kairiąją pusę) |
|---|---|---|---|
| Atstumas [jūrmylės] | 49,34 | 50,29 | 49,45 |
| Minimalus saugus atstumas [jūrmylės] | 5,08 | 5,00 | 5,01 |

Esant 35° kampui naujai siūloma trajektorija yra 0,95 jūrmylėmis ilgesnė už kairiąją trajektoriją bei 0,84 jūrmylėmis ilgesnė už 3HC metodą, atitinkamai ir skrydžio trukmė bei degalų sąnaudos bus didesnės. Visos trajektorijos užtikrina minimalų saugų reikalaujamą atstumą tarp orlaivių. Kadangi šis trajektorijos pailgėjimas nėra didelis, konflikto sprendimo atveju visi sprendimo metodai yra priimtini, esant daugiau nei dviejų orlaivių konfliktui, būtų galima panaudoti ne pačią racionaliausią trajektoriją, jei tai padėtų išvengti „domino“ efekto, papildomų manevrų iš aplinkui esančių orlaivių.

## 3.16 Antrojo skyriaus išvados

1. Tyrime buvo vertinami trys algoritmo kriterijai: sauga, racionalumas ir keleivių komfortas. Algoritmas geba užtikrinti minimalų reikalaujamą saugų atstumą visais analizuojamais atvejais. Intervale nuo 25° iki 35° kampų, orlaivio nukreipimas kairiąja apskritimo puse yra racionalesnis dėl mažesnio papildomo atstumo, kurį orlaiviui tektų įveikti lyginant su dešiniąja trajektorija. Atitinkamai, skrydžio trukmė bus trumpesnė bei degalų sąnaudos mažesnės. Duomenys rodo, jog 45° – 90°

kampų intervale, racionalesnė trajektorija yra pro dešiniąja apskritimo pusę. Siūlomi konflikto vengimo manevrai nesukeltų keleiviams didelio diskomforto, nes nei vienu atveju nėra viršijamos nustatytos ribinės perkrovos koeficiento bei skrydžio trukmės, patiriant perkrovą reikšmės.

2. Lūžio taškas, t.y. kampas nuo kurio orlaivio nukreipimas pro dešiniąja apskritimo $O_S$ yra racionalesnis, gaunamas kai kampas tarp trajektorijų lygus 37°.

## BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atsižvelgiant į oro erdvės užimtumo, eismo plėtrą, yra poreikis tobulinti, ieškoti naujų konfliktų spendimo metodų, gebančių užtikrinti saugos bei racionalumo kriterijus. Konflikto sprendimo algoritmai galėtų padėti standartizuoti susidūrimo vengimo manevrus, tai užtikrintų tinkamiausio spendimo parinkimą esamam konflikto scenarijui. Atlikus literatūros analizę, galima teigti, jog šis algoritmas galėtų būti paremtas Dubinso metodu, konfliktams horizontalioje plokštumoje spręsti.

2. Analizuojamame pradinių kampų tarp skrydžio trajektorijų intervale 25° – 90° mažiausias gautas minimalus atstumas tarp orlaivių yra 5 jūrmylės, didžiausias – 5,09 jūrmylės, tai rodo efektyvų oro erdvės išnaudojimą konfliktui spręsti. Pastebėta, kad orlaivio nukreipimas dešiniąja puse užtikrina didesnę saugą dėl mažesnio orlaivių trajektorijų priartėjimo kartų. Pradinių kampų 25° – 36° intervale orlaivio nukreipimas kairiąja apskritimo puse yra racionalesnis. Vidutinės degalų sąnaudos kairiąja puse šiame intervale yra 15,08 kilogramo mažesnės nei dešiniąja puse, atstumas trumpesnis 2,55 jūrmylėmis, o didžiausia perkrovos koeficiento reikšmė lygi 1,09, skrendant dešiniąja puse – 1,07, keleivių komforto sąlyga nėra pažeidžiama.

3. Nustatyta, kad pradinis kampas tarp skrydžio trajektorijų, nuo kurio bendras įveikiamas atstumas yra mažesnis skrendant dešiniuoju apskritimo perimetru lyginant su kairiąja trajektorija, yra 37°. Taip pat pažymėtina, kad nuo 50° kampo kairiosios trajektorijos duomenų nėra gaunama dėl per daug neracionalaus trajektorijos pailgėjimo. Analizuojamame 37° – 90° kampų intervale, racionalesnis yra orlaivio nukreipimas dešiniuoju apskritimo perimetru. Vidutinės degalų sąnaudos dešiniąja puse šiame intervale yra 24.28 kilogramo mažesnės nei kairiąja puse, bendras nuskristas atstumas trumpesnis 4,1 jūrmyle. Kampų 75° – 90° intervale perkrovos koeficiento reikšmė didesnė nei 1,19, tačiau ilgiausia skrydžio trukmė yra 55,05 sekundės. Skrendant kairiąja puse didžiausia perkrovos koeficiento reikšmė – 1,07, keleivių komforto sąlyga 37° – 90° intervale nėra pažeidžiama.

4. Tolesniam darbo plėtojimui yra siūlomas orlaivių trajektorijų konflikto sprendimas Dubinso metodu, kai susikirtimo tarp orlaivių kampas yra didesnis nei 90°. Galima išsamesnė Dubinso trajektorijos kitimo analizė 25° – 45° kampų intervale, kuriame pastebimas netendencingas

trajektorijos kitimas. Dešinioji trajektorija pasižymi pastoviu $O_S$ apskritimo spindulio mažėjimu, o kairiąja trajektorija 25° – 30° intervale spindulys mažėja, 30° – 45° vėl pastebimas didėjimas.

5. Taip pat siūloma tyrimą praplėsti įvertinant aerodinamines savybes posūkio metu (viražo metu reikia didesnės traukos).

# LITERATŪROS SĄRAŠAS


Airbus. (2018). Getting to grips with surveillance. *Airbus Flight Operations, 2*, 27–66. https://abrapac2015.files.wordpress.com/2019/09/getting-to-gripps-with-surveilance.pdf

Alam, S., Lokan, C. J., Abbass, H.A., Ellejmi, M.; Kirby, S. (2009). An Evolutionary Computational Analysis of Tactical Controller Tool. *Aviation Information Technology Engineering and Management Conference,* New Orleans, Louisiana, USA.

Archambault, A. (2004). Speed uncertainty and speed regulation in conflict detection and resolution in Air Traffic Control. *1st International Conference on Research in Air Transportation,* Zilina, Slovakia.

Arumugam, S., Jermaine, C. (2006). Closest-Point-of-Approach Join for Moving Object Histories, *22nd International Conference on Data Engineering*, Atlanta, USA, 86 – 86. doi: 10.1109/ICDE.2006.36.

Belgium. Air Incident Investigation Unit. (2020). Safety investigation report: Air Europa Express, Deutsches Lufthansa, ERJ195LR, A320-214, Brussels TMA, February 23, 2018. Brussels, Air Incident Investigation Unit. https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/domain/Aviation/Veiligheid/Verslagen%20voorvallen/2018/6.pdf.

Blin, K. (2000). Stochastic Conflict Detection for Air Traffic Management. Eurocontrol Experimental Centre Publications Office, France. https://doi.org/10.2514/6.2000-4270.

Breil, R., Delahaye, D., Lapasset, L., Féron, E. (2016). Multi-agent Systems for Air Traffic Conflicts Resolution by Local Speed Regulation and Departure Delay. *35th Digital Avionics Systems Conference*, Sacramento, CA, United States.

Busyairah, S. A., Ochieng, W., Schuster, W., Majumdar, A., Chiew, T. (2015). A safety assessment framework for the Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) system. *Safety Science*. 78, 91–100. 10.1016/j.ssci.2015.04.011.

Cetek, C. (2009). Realistic Speed Change Maneuvers for Air Traffic Conflict Avoidance and their Impact on Aircraft Economics. *International Journal of Civil Aviation, 1*(1), 62–73.

Chaboud, T., Pralet, C., Schmidt, N. (2020). Tackling Air Traffic Conflicts as a Weighted CSP : Experiments with the Lumberjack Method. *arXiv (Cornell University).* https://doi.org/10.48550/arxiv.2001.11390.

Chitsaz, H., LaValle, S. M. (2007). Time-optimal paths for a Dubins airplane. *46th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, LA, USA, doi:10.1109/CDC.2007.4434966.

Donciu, B., Cristian-Emil, C., Pleter, O. (2011). A case study in air traffic management automation. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering,* 73 (3), ISSN 14542358, 55–70, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full58925.pdf.

DSNA. (2022). Technical modernisation of the French ATM system for en-route control centres. leaflet_4_FLIGHT_juin_2022.pdf (ecologie.gouv.fr).

Erzberger, H., Lauderdale, T. A., Chu, Y. (2011). Automated conflict resolution, arrival management, and weather avoidance for air traffic management. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G, Journal of Aerospace Engineering, 226(8),* 930–949. https://doi.org/10.1177/0954410011417347.

EUROCONTROL (2022). ACAS Guide – Airborne Collision Avoidance Systems. Eurocontrol. Brussels, Belgium. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-03/eurocontrol-safety-acas-guide-4-1.pdF.

EUROCONTROL. (2002). EATMP HMI TCAS RA. Eurocontrol Human Machine Interface Service. https://www.slideserve.com/Gabriel/eatmp-hmi-tcas-ra-draft.

EUROCONTROL. (2007). Specification for Short Term Conflict Alert, Eurocontrol, Brussels, Belgium.

EUROCONTROL. (2009). TCT Real Time Simulation Evaluation Report, Technical Report 09-110142-C, Eurocontrol Experimental Centre, Brtigny-surorge, France.

EUROCONTROL. (2010). Specification for Medium-Term Conflict Detectio*n*, EUROCONTROL-SPEC-139, Ed. 1, Brussels, Belgium.

EUROCONTROL. (2022). BADA. https://www.eurocontrol.int/model/bada.

European Union. (2017). Komisijos įgyvendinimo reglamentas (ES) 2017/373. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=celex%3A32020R0469

Europos Komisija. (2022) *Tarybos pasiūlymas dėl pozicijos, kurios ES vardu turi būti laikomasi ICAO tarybos 25-ojoje sesijoje, dėl numtomo Tarptautinės civilinės aviacijos konvencijos 1 priedo 178 pakeitimo, 6 oriedo I dalies 47 pakeitimo, 6 priedo II dalies 40 pakeitimo, 6 priedo III dlies 24 pakeitimo, 7 priedo 7 pakeitimo 8 priedo 109 pakeitimo, 10 priedo IV tomo 91 pakeitimo1 14 priedo I tomo 17 pakeitimo, 17 priedo 18 pakeitimo ir 9 priedo 29 pakeitimo priėmimo.*

Flämig, S., Graefenhan, M., Schiffmann, W. (2023). Modelling of aircraft trajectories for emergency landing using kinematoid chains. CEAS Aeronautical Journal, 14(3), 679–692. https://doi.org/10.1007/s13272-023-00667-w.

FlySafe Project. (2011). TCAS integrated in Navigation Display (ND). Tcas EU-Flysafe.jpg - Wikimedia Commons.

Ghadiry, W., Habibi, J., Aghdam A. G., Zhang, Y. (2021). Optimal Path Tracking With Dubins' Vehicles, *IEEE Systems Journal*, *15*(1), 466–477, doi: 10.1109/JSYST.2020.3006990.

Girnytė, D. (2004). *Kompiuterinių matematinių sistemų animacijos tyrimas* [Magistro darbas, Vilniaus pedagoginis universitetas].

Guleria, Y., Durand, N., Phu N T., Duc-Thinh, P., Alam, S. (2021). A Machine Learning Framework for Predicting ATC Conflict Resolution Strategies for Conformal Automation. *11th SESAR Innovation Days*, France.

Haghighi, H., Delahaye, D., Asadi, D. (2022). Performance-based emergency landing trajectory planning applying meta-heuristic and Dubins paths. *Applied Soft Computing*, *117*, 108453. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108453.

Hamdan, S., Jouini, O., Cheaitou, A., Jemai, Z., Granberg, T. A. (2022). On the binary formulation of air traffic flow management problems. *Annals of Operation Research/Annals of Operations Research*, *321*(1–2), 267–279. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04740-1.

Hoekstra, J.M., Ellerbroek J., Rudnyk, J. (n.d.). Trajectory Prediction for Medium Term Conflict Detection. https://cs.lr.tudelft.nl/atm/projects/trajectory-prediction-for-medium-term-conflict-detection/.

Humm, E., Abate, C. (2022). Human Factors Analysis of the Impact of Providing Probabilistic Risk Information in Real Time. https://innaxis-comm.s3.eu-central-1.amazonaws.com/SafeOPS/D3.3.pDF.

Yardimci, A., Karpuz, C. (2019). Shortest path optimization of haul road design in underground mines using an evolutionary algorithm. *Applied Soft Computing*. 83. 10.1016/j.asoc.2019.105668.

ICAO. (2012). New Collision Avoidance System. ICAO Appendix D. 12th Air Navigation Conference, Montréal, Canada. https://www.icao.int/Meetings/anconf12/AN%20Conf12%20Working%20Papers%20Library/ANConf.12.WP.12.4.1.en.app.pdF.

ICAO. (2014) Separation Minima and Airspace Capacity. Combined Forth Meeting of the South Asia/Indian Ocean ATM Coordination Group (SAIOACG/4) and Twenty-First Meeing of the South East Asia ATS Coordination Group (SEAACG/21) (p.2). Hong Kong: ICAO.

ICAO. (2014). Annex 10 Aeronautical telecommunications, Volume IV Surveillance and collision avoidance systems. International Civil Aviation Organization, July 2014.

Jakučionis, A. (2007). Radionavigacinės sistemos ir įranga: mokomoji knyga. Technika.

Kiselev, M. A., Levitsky, S. V., Moroshkin, D. V. (2021). Scientific basis for the trainer aircraft anti-g equipment requirements. Naučnyj Vestnik MGTU GA, 24(5), 49–59. https://doi.org/10.26467/2079-0619-2021-24-5-49-59.

Krozel, J., Peters, M. E., Hunter, G. (1997). Conflict Detection and Resolution for Future Air Transportation Management Seagull Technology.

Kuenz, A. (2015). *High performance conflict detection and resolution for Multi-Dimensional objects*. https://doi.org/10.15488/8500.

Kwangyeon, K., Deshmukh, R., Hwang, I. (2021). Development of data-driven conflict resolution generator for en-route airspace. Aerospace *Science and Technology, Volume 114,* https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106744.

Norén, B.O., Hansson, J., Midtgaard, B., Nysvend, J.A. (2004). *STCA – an aircraft conflict alert system*. https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:19627/FULLTEXT01.pdf.

Noskievič, T. Kraus, J. (2017). Air Traffic Control Tools Assessment. MAD - *Magazine of Aviation Development*. https://doi.org/10.14311/MAD.2017.02.01.

Pérez-Castán, J. A., Pérez-Sanz, L., Serrano-Mira, L., Saéz-Hernando, F. J., Rodríguez Gauxachs, I., Gómez-Comendador, V. F. (2022). Design of an ATC Tool for Conflict Detection Based on Machine Learning Techniques. *Aerospace, 9*(2). http://dx.doi.org/10.3390/aerospace9020067.

Pileckas, E. (2006). *Skrydžių valdymo radiolokacinės sistemos: mokomoji knyga*. Technika.

Plyasovskikh, A., Eshmuradov, D. (2023). Science and innovation experiment on measuring the observed rate of a moving clock. 2. 169–188. 10.5281/zenodo.7767737.

Reckhouse, W.J. (2010). Optimisation of short term conflict alert safety related systems.

Savickas, A. (2017). *Orlaivių navigacijos prietaisai: vadovėlis*. Technika. https://doi.org/10.20334/2017-040-S.

Savickas, A. (2017). *Elektroninės orlaivių navigacijos sistemos: vadovėlis*. Technika. https://doi.org/10.20334/2017-037-S.

Savickas, A. (2020). *Aviacinės ryšio sistemos: vadovėlis*. Technika.

Shanmugavel, M., Tsourdos, A., White, B. A., Żbikowski, R. (2007). Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs. ASME. *Journal of dynamic systems, measurement and control*. https://doi.org/10.1115/1.2767657.

Single European Sky Air Traffic Management Research Joint Undertaking (SESAR JU). (2016). *Enhanced STCA with down-linked parameters.* https://data.europa.eu/data/datasets/sesar-solutions-enhanced-stca-with-down-linked-parameters?locale=lt.

Skačkauskas, P. (2021). *Autonominės kelių transporto priemonės adaptyvios valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas* [Daktaro disertacija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas].

Stephens, S. S. (2021). A Real-time Algorithm to Achieve Precise Coordinated Arrival Times in a Time-variant Environment. https://scholar.afit.edu/etd/5093.

Stonkus, R., Aleknavičius, K., Drimba, M., ir Sereikienė, K. (2022*).* Vaikų aviacijos teorijos kursas: mokomoji knyga.

Szabo, G. (2020). Increasing capacity through new ATC concept. PowerPoint Presentation https://www.hungarocontrol.hu/download/9e5b19a8d452e14f157af7f7b1702c3f.wac-agt-matias-tct-szg-002-en.pdf.

Tang, J. (2019). Conflict Detection and Resolution for Civil Aviation: A literature survey. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, *34*(10), 20–35. https://doi.org/10.1109/maes.2019.2914986.

Voshell, M. (2004). *High Acceleration and the Human Body*. (PDF) High Acceleration and the Human Body (researchgate.net).

Weisstein, E. W. (2019). Line-Line Intersection. Line-Line Intersection -- from Wolfram MathWorld.

Zhang, J., Huang, H. (2021). Occlusion-Aware UAV path planning for reconnaissance and surveillance. *Drones*, *5*(3), 98. https://doi.org/10.3390/drones5030098.