



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Eugenijus Rubinas

**LENGVŲJŲ KOVINIŲ SRAIGTASPARNIŲ TINKAMUMO LIETUVOS
KARIUOMENEI LYGINAMOJI ANALIZĖ
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SUITABILITY OF COMBAT
HELICOPTERS FOR THE LITHUANIAN ARMED FORCES**

Baigiamasis magistro darbas

Skrydžių valdymo studijų programa, valstybinis kodas 6011EX002

Skrydžių valdymo specializacija

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Eugenijus Rubinas

**LENGVŲJŲ KOVINIŲ SRAIGTASPARNIŲ TINKAMUMO LIETUVOS
KARIUOMENEI LYGINAMOJI ANALIZĖ
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SUITABILITY OF COMBAT
HELICOPTERS FOR THE LITHUANIAN ARMED FORCES**

Baigiamasis magistro darbas

Skrydžių valdymo studijų programa, valstybinis kodas 6011EX002

Skrydžių valdymo specializacija

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Vytautas Rimša

Konsultantė

lekt. Laura Gudelevičiūtė

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Skrydžių valdymo studijų programa, valstybinis kodas 6011EX002

Skrydžių valdymo specializacija

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei) Eugenijui Rubinui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Lengvųjų kovinių sraigtasparnių tinkamumo Lietuvos kariuomenei lyginamoji analizė (angl. *Comparative Analysis of the Suitability of Combat Helicopters for the Lithuanian Armed Forces*)

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 20.....m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Apžvelgti ir įvertinti mokslinę literatūrą, susijusią su tyrimo tema.
2. Nustatyti lengvųjų kovinių sraigtasparnių vertinimo kriterijus Lietuvos kariuomenės operacinių poreikių kontekste.
3. Pritaikyti du skirtingus daugiakriterinius sprendimų priėmimo metodus sraigtasparnių modeliams vertinti.
4. Identifikuoti optimalų sraigtasparnio modelį pagal nustatytus kriterijus.
5. Palyginti taikytų vertinimo metodų rezultatus ir atlikti jautrumo analizę.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

lekt. Laura Gudelevičiūtė

(Moksl. laipsnis/pedagoginis vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

doc. dr. Vytautas Rimša

(Moksl. laipsnis/pedagoginis vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

Eugenijus Rubinas

(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos technologijų katedra

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

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

Pavadinimas

Lengvųjų kovinių sraigtasparnių tinkamumo Lietuvos kariuomenei lyginamoji analizė

Autorius

Eugenijus Rubinas

Vadovas

doc. dr. Vytautas Rimša

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekama septynių NATO valstybėse naudojamų lengvųjų kovinių sraigtasparnių modelių tinkamumo Lietuvos kariuomenei analizė. Tyrimo tikslas – nustatyti optimalų sraigtasparnio modelį, geriausiai atitinkantį Lietuvos kariuomenės poreikius. Tyrime taikomi du daugiakriterinio vertinimo metodai – AHP-TOPSIS ir WASPAS. Šie metodai taikomi objektyviam alternatyvų vertinimui pagal devynis ekspertų nustatytus kriterijus, apimančius techninius, eksploatacinius ir kovinius parametrus. Atlikus kriterijų svorių nustatymą, duomenų normalizavimą, sprendinių reitingavimą bei jautrumo analizę, identifikuotas optimalus sraigtasparnio modelis. Gauti abiejų metodų rezultatai palyginti koreliacine analize, patvirtinusia jų suderinamumą ir vertinimo rezultatų stabilumą.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, teorinė daugiakriterinės analizės apžvalga, vertinimo metodologija, sraigtasparnių modelių tyrimas, išvados ir literatūros sarašas.

Darbo apimtis: 65 p. teksto be priedų, 16 iliustracijų, 21 lentelė, 77 bibliografiniai šaltiniai.

Priedami darbo priedai.

Reikšminiai žodžiai: daugiakriterinė analizė, AHP-TOPSIS, WASPAS, Lietuvos kariuomenė, NATO, jautrumo analizė.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo
bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Eugenijus Rubinas, 20210117

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Antano Gustaičio aviacijos institutas

(Fakultetas)

Skrydžių valdymas, SVIfkau20

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

20____ m. _____ d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „Lengvųjų kovinių
sraigasparnių tinkamumo Lietuvos kariuomenei lyginamoji analizė“

patvirtintas 20____ m. _____ d. dekanų potvarkiu Nr. _____,
parašytas savarankiškai. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai
ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane
mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Vytautas Rimša, lekt. Laura Gudelevičiūtė.

Mano darbo (projekto) vadovas: docentas daktaras Vytautas Rimša.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų
nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

EUGENIJUS RUBINAS

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	8
ĮVADAS	10
1. DAUGIAKRITERINĖS ANALIZĖS IR OPTIMIZAVIMO METODŲ TEORINIAI PAGRINDAI	11
1.1 Optimizacija: samprata ir taikymo sritys	11
1.2 Daugiakriterinė analizė	16
1.3 Daugiakriterinio vertinimo metodų palyginimas ir taikymo pavyzdžiai.....	16
1.4 Daugiakriterinių metodų taikymas sraigtasparnių ir ginkluotės vertinimui.....	22
1.5 Pirmojo skyriaus išvados.....	24
2. LENGVŲJŲ KOVINIŲ SRAIGTASPARNIŲ VERTINIMO METODOLOGIJA	25
2.1 WASPAS metodas: struktūra ir taikymas	25
2.2 AHP-TOPSIS metodas: kriterijų analizė ir sprendimo priėmimas	28
2.3 Alternatyvos - lengvieji koviniai sraigtasparniai	31
2.4 Kriterijai ir ekspertų apklausa	37
2.5 Metodų rezultatų palyginimas ir įvertinimas	38
2.6 Antrojo skyriaus išvados	40
3. SRAIGTASPARNIŲ MODELIŲ VERTINIMO TYRIMAS.....	41
3.1 WASPAS metodo taikymas sraigtasparnių vertinimui	41
3.2 AHP-TOPSIS metodo rezultatai	45
3.3 Daugiakriterinių metodų rezultatų lyginamoji analizė.....	48
3.3.1 Kriterijų svorių palyginimas	49
3.3.2 Alternatyvų reitingų analizė.....	50
3.3.3 Reitingų koreliacijos vertinimas	51
3.3.4. Rezultatų jautrumo analizė esant kriterijų svorių pokyčiams	53
3.4 Trečiojo skyriaus išvados	56
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	57
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	58
PRIEDAI	66
A priedas. Ekspertų vertinimo anketos šablonas.....	66
B priedas. Ekspertinis kriterijų svarbos vertinimas.....	69
C priedas. Ekspertų porinio palyginimo matricos	70
D priedas. Kokybinių kriterijų ekspertiniai vertinimai	73

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

MCDA – daugiakriterinė sprendimų analizė (angl. *Multi-Criteria Decision Analysis*)

LK – Lietuvos kariuomenė

KOP – Karinės oro pajėgos

SOP – Specialiųjų operacijų pajėgos

NATO – Šiaurės Atlanto sutarties organizacija (angl. *North Atlantic Treaty Organization*)

AHP – analitinio hierarchinio proceso metodas (angl. *Analytic Hierarchy Process*)

TOPSIS – artumo idealiam sprendiniui metodas (angl. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*)

CR – nuoseklumo santykis (angl. *Consistency Ratio*)

WSM – svertinės sumos metodas (angl. *Weighted Sum Method*)

WPM – svertinės sandaugos metodas (angl. *Weighted Product Method*)

WASPAS – svertinio sumos ir sandaugos vertinimo metodas (angl. *Weighted Aggregated Sum Product Assessment*)

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Iškilųjų ir neiškilųjų aibių pavyzdžiai (Boyd & Vandenberghe, 2004).....	12
1.2 pav. Pareto fronto pavyzdys (Ye et al., 2024)	14
2.1 pav. Reitingavimo tikslumas (Zavadskas et al., 2012)	27
2.2 pav. WASPAS metodo schema (sudaryta autoriaus, remiantis de Assis et al., 2023)	28
2.3 pav. AHP-TOPSIS metodo schema (sudaryta autoriaus, remiantis Sharma et al., 2020) ..	31
2.4 pav. AH-6 Little Bird (Boeing, 2022)	32
2.5 pav. AgustaWestland AW109 TrekkerM (Leonardo Helicopters, 2023).....	33
2.6 pav. Vokietijos ginkluotųjų pajėgų BO105 (Airbus Helicopters, 2017)	33
2.7 pav. BELL 407GT (Airforce Technology, 2018).....	34
2.8 pav. Vokietijos karinių oro pajėgų H145M (Airbus Helicopters, 2022)	35
2.9 pav. OH-58D (US Army, 2015)	36
2.10 pav. Aérospatiale SA342M Gazelle (Gaba, 2001)	36
3.1 pav. Santykiniai kriterijų svoriai (AHP).....	46
3.2 pav. Santykinų kriterijų svorių palyginimas.....	49
3.3 pav. Optimalių galutinių įverčių Q_{opt} reikšmės keičiant kriterijų svorius (WASPAS metodas)	54
3.4 pav. Artumo koeficientų C_i reikšmės keičiant kriterijų svorius (AHP-TOPSIS metodas) ..	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodų palyginimas (sudaryta autoriaus pagal Arslan & Cebi, 2024; Baydaş & Elma, 2021; Behzadian et al., 2012; Brans & Vincke,

1985; Hwang & Yoon, 1981; Opricovic & Tzeng, 2004; Rane et al., 2023; Roy, 1968; Saaty, 1980; Sotoudeh-Anvari, 2022; Vaidya & Kumar, 2006; Zavadskas et al., 2012).....	22
2.1 lentelė. Tyrimui atrinkti kriterijai	37
2.2 lentelė. Atrinktų sraigtasparnių modelių techniniai duomenys (Airbus Helicopters, 2021; Airforce Technology, 2014; Army Recognition, 2023; Boeing, 2022; Leonardo Helicopters, 2023; Military Factory, 2024)	38
3.1 lentelė. Tyrimui atrinktos alternatyvos ir kriterijai.....	41
3.2 lentelė. Sraigtasparnių vertinimo matrica.....	42
3.3 lentelė. Sraigtasparnių vertinimo matrica normalizuotomis vertėmis	42
3.4 lentelė. Kriterijų svorio matrica.....	43
3.5 lentelė. Svertinės sumos metodo (WSM) matrica	43
3.6 lentelė. Svertinės sandaugos metodo (WPM) matrica.....	44
3.7 lentelė. Galutinis alternatyvų reitingas	44
3.8 lentelė. Subendrinta AHP porinio kriterijų palyginimo matrica.....	45
3.9 lentelė. Ekspertų porinių palyginimų nuoseklumo rodikliai	46
3.10 lentelė. Normalizuota AHP porinio kriterijų palyginimo matrica.....	47
3.11 lentelė. Normalizuota TOPSIS alternatyvų vertinimo matrica.....	47
3.12 lentelė. Idealių ir anti-idealių sprendinių vertės	47
3.13 lentelė. Alternatyvų atstumai nuo idealaus ir anti-idealaus sprendio bei artumo koeficientai C_i (TOPSIS metodas)	48
3.14 lentelė. Galutinių rezultatų palyginimo lentelė WASPAS atžvilgiu	50
3.15 lentelė. Reitingų skirtumų kvadratai Spearmano koeficientui apskaičiuoti	51
3.16 lentelė. Reitingų porų suderinamumas pagal Kendallo analizę.....	52
3.17 lentelė. Optimalūs galutiniai įverčiai Q_{opt} , keičiant svarbiausių kriterijų svorius (WASPAS)	53
3.18 lentelė. Artumo koeficientų C_i reikšmės keičiant svarbiausių kriterijų svorius (AHP-TOPSIS metodas)	54

IVADAS

Tyrimo aktualumas. Įgyvendindama NATO 3 straipsnio nuostatas, Lietuvos kariuomenė modernizuoja ir plečia gynybinius pajėgumus, siekdama užtikrinti nacionalinį ir regioninį saugumą. Viena iš identifikuotų spragų – kovinės paramos ir greitojo reagavimo pajėgumų trūkumas.

Tyrimo problema. Lietuvos kariuomenė šiuo metu neturi lengvųjų sraigtasparnių, pritaikytų kovinės paramos ir puolimo užduotims vykdyti. Nors UH-60 „Black Hawk“ sraigtasparniai sustiprins transporto pajėgumus, jų galimybės teikti ugnies paramą yra ribotos. Ši spraga riboja kariuomenės operatyvų reagavimą į konvencines ir hibridines grėsmes, todėl būtina įvertinti specializuotų lengvųjų kovinių sraigtasparnių alternatyvas.

Tyrimo tikslas. Įvertinti lengvųjų kovinių sraigtasparnių tinkamumą Lietuvos kariuomenės poreikiams ir nustatyti operacinius reikalavimus atitinkančią alternatyvą.

Tyrimo objektas. NATO šalyse naudojami lengvųjų kovinių sraigtasparnių modeliai, potencialiai tinkantys Lietuvos kariuomenės operaciniams poreikiams.

Uždaviniai tikslui pasiekti:

1. Apžvelgti ir įvertinti mokslinę literatūrą, susijusią su tyrimo tema.
2. Nustatyti lengvųjų kovinių sraigtasparnių vertinimo kriterijus Lietuvos kariuomenės operacinių poreikių kontekste.
3. Pritaikyti du skirtingus daugiakriterinius sprendimų priėmimo metodus sraigtasparnių modeliams vertinti.
4. Identifikuoti optimalų sraigtasparnio modelį pagal nustatytus kriterijus.
5. Palyginti taikytų vertinimo metodų rezultatus ir atlikti jautrumo analizę.

Tyrimo metodai. Šio darbo uždaviniams pasiekti taikomi literatūros analizė, lyginamoji analizė, ekspertinė apklausa bei skaitiniai daugiakriteriniai vertinimo metodai.

Tyrimo naujumas. 2018 m. Vilniaus Gedimino technikos universiteto Antano Gustaičio aviacijos instituto studento J. Petrošiaus baigiamajame darbe buvo nagrinėjamos SOP poreikiams tinkamos sraigtasparnių alternatyvos, taikant sveikaskaitinio programavimo metodą (Petrošius, 2018). Šiame tyrime vertinimas išplėstas – analizuojamos pačios platformos, atsižvelgiant į Lietuvos kariuomenės operacinius poreikius ir taikant du daugiakriterinius metodus (AHP-TOPSIS ir WASPAS). Vertinimas grindžiamas ekspertų įžvalgomis, apima kiekybinius ir kokybinius parametrus, o jautrumo analizė leidžia įvertinti sprendimų stabilumą.

1. DAUGIAKRITERINĖS ANALIZĖS IR OPTIMIZAVIMO METODŲ TEORINIAI PAGRINDAI

1.1 Optimizacija: samprata ir taikymo sritys

Optimizacija yra mokslinė ir praktinė veikla, kurios tikslas – surasti geriausią sprendimą iš visų galimų alternatyvų, atsižvelgiant į nustatytus kriterijus. Ji apima metodų ir algoritmų taikymą, siekiant maksimizuoti arba minimizuoti tam tikras funkcijas, dažniausiai susijusias su sąnaudomis, efektyvumu ar našumu (Rao, 2019). Optimizacijos procesas ypač reikšmingas sprendimų priėmimo situacijose, kai galimų sprendimų aibė yra plati ir sudėtinga. Šis metodologinis įrankis leidžia racionaliai pagrįsti sprendimus, remiantis kiekybiniais ir kokybiniais rodikliais.

Optimizacija taikoma įvairiose srityse. Inžinerijoje ji naudojama tobulinant gamybos procesus ir projektuojant konstrukcijas, siekiant sumažinti sąnaudas bei padidinti patikimumą (Gan, 2022). Transporto ir logistikos sektoriuje optimizuojami maršrutai ir tiekimo grandinės, ypač karinių operacijų metu, optimizuojant degalų sąnaudas ir pristatymo laiką (Andrii et al., 2024). Ekonomikoje optimizacija padeda paskirstyti išteklius taip, kad būtų maksimaliai padidinta investicijų grąža, ypač ilgalaikiuose gynybos pramonės projektuose (Dağıstanlı et al., 2024). Kariuomenėje ir gynybos pramonėje optimizacija pasitelkiama planuojant operacijas, tobulinant ginkluotę bei logistikos sistemas, pavyzdžiui, optimizuojant karinės technikos diegimą ir išdėstymą (Amorim et al., 2019).

Matematiškai optimizavimo uždavinys formuluojamas taip:

$$\min_{x \in X} f(X), \quad (1.1)$$

Esant apribojimams:

$$g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.2)$$

$$h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (1.3)$$

Čia: $\min$ – ieškomas funkcijos $f(X)$ minimumo taškas; $f(X)$ – tikslo funkcija, kuri optimizuojama; $x \in X$ – funkcijos reikšmės x priklauso leistinajai sričiai X ; X – leistino sprendinio aibė; $g_i(x)$ – nelygybiniai apribojimai; $h_j(x)$ – lygybiniai apribojimai;

Optimizavimo teorijoje itin svarbi iškilumo savybė. Ji užtikrina, kad optimizavimo problema turėtų globalų sprendinį ir neturėtų lokalių minimų, kurie nebūtų globalūs, kai tikslo funkcija ir sprendinių aibė yra iškilios (Boyd & Vandenberghe, 2004).

Iškilioji tikslo funkcija $f(x)$ tenkina sąlygą:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2), \text{ kur } \lambda \in [0,1] \quad (1.4)$$

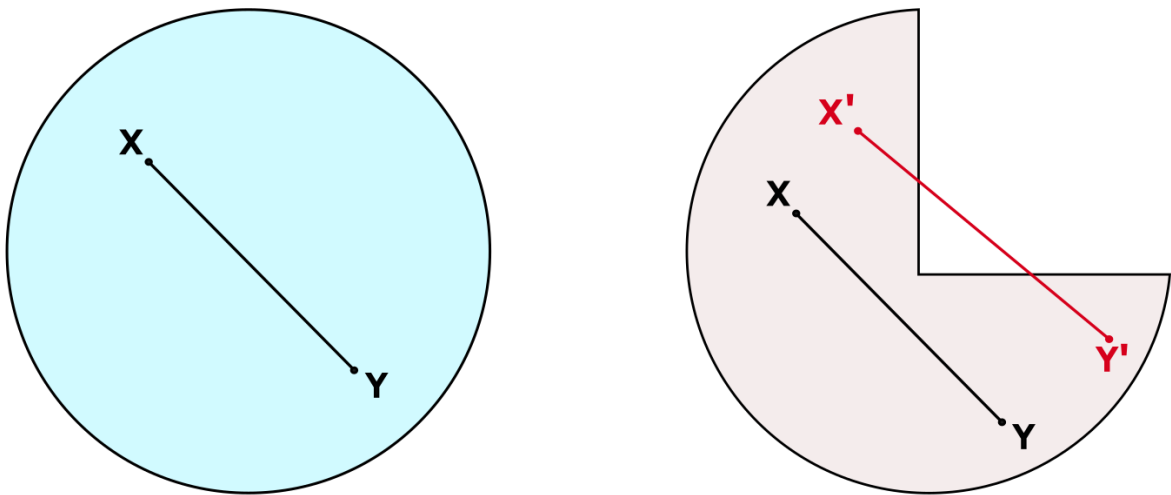
čia: $f(x)$ – tikslo funkcija, kuri optimizuojama; x_1, x_2 – sprendinių erdvės taškai; λ – svorio koeficientas, nusakantis linijinį taškų derinį.

Tai reiškia, kad jei pasirinkti du sprendiniai priklauso tinkamų sprendimų aibei, visi tarpiniai variantai tarp jų taip pat yra tinkami. Toks savybių išlaikymas padeda užtikrinti, kad optimalaus sprendinio paieška apima visą galimų sprendimų spektrą ir leidžia rasti globalų optimumą. Dėl to optimizacijos algoritmai, tokie kaip gradientinio nusileidimo metodas, leidžia greitai pasiekti sprendinį. Iškilioji sprendinių erdvė X yra apibrėžiama kaip aibė, kurioje bet kurių dviejų taškų $x_1, x_2 \in X$ tiesinis derinys taip pat priklauso X :

$$\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \in X, \forall x_1, x_2 \in X, \lambda \in [0,1] \quad (1.5)$$

Čia: X – leistinų sprendinių aibė; x_1, x_2 – bet kurie du taškai sprendinių erdvėje X ; λ – svorio koeficientas, kuris reguliuoja, kiek svorio suteikiama kiekvienam taškui linijiniame derinyje.

Ši savybė reiškia, kad jei du taškai x_1 ir x_2 priklauso aibei X , tai visi tarp jų esantys taškai taip pat priklauso aibei X . Tai užtikrina sprendinių erdvės vientisumą.



1.1 pav. Iškilųjų ir neiškilųjų aibių pavyzdžiai (Boyd & Vandenberghe, 2004)

Iškiliosios aibės iliustracijoje (žr. 1.1 pav.), kairėje pusėje matyti, kad bet kuri tiesė, sujungta tarp dviejų taškų aibėje, visiškai priklauso šiai aibei. Dešinėje pusėje, neiškiliosios aibės pavyzdyje, tiesė tarp taškų x' ir y' išeina už aibės ribų, parodant, kad ši aibė nėra iškiloji.

Optimumas – tai sprendinys, kuris, atsižvelgiant į nustatytus apribojimus ir tikslus, yra geriausias tarp visų galimų alternatyvų. Tai gali būti minimali tam tikrų sąnaudų reikšmė arba maksimali nauda. Optimumas gali būti vietinis (lokalus), kai sprendinys yra geriausias tik tam tikroje srities dalyje, arba globalus, kai sprendinys yra geriausias visoje galimų sprendinių

srityje. Ekonomikos teorijoje optimumo sampratą ir matematinį jos pagrindimą plėtojo T. C. Koopmans, kuris analizavo gamybos ir paskirstymo veiklų optimizavimą (Koopmans, 1951).

Daugiakriterinis optimumas dažniausiai siejamas su Pareto optimumu, kurį XIX a. pabaigoje pristatė Vilfredo Pareto savo darbe apie ekonominę pusiausvyrą (Pareto, 1896). Sprendinys laikomas Pareto optimaliu, jei nė vieno kriterijaus negalima pagerinti, nepabloginant bent vieno kito kriterijaus. Šis principas tapo esminiu daugiakriterinės optimizacijos pagrindu ir buvo vėliau išplėtotas G. Debreu veikale apie ekonominę vertę ir pusiausvyrą (Debreu, 1959).

Vienas pagrindinių daugiakriterinio optimizavimo konceptų yra Pareto frontas. Jis apibūdina sprendinių aibę, kurioje nė vienas sprendinys negali būti pagerintas pagal vieną kriterijų, nebloginant kitų. Matematiškai, sprendinys x^* priklauso Pareto frontui, jei nėra kito sprendinio x , kuris tenkintų:

$$f_i(x) \leq f_i(x^*), \quad \forall i, \quad (1.6)$$

ir egzistuočių bent vienas j , kuriam galioja nelygybė:

$$f_j(x) \leq f_j(x^*), \quad (1.7)$$

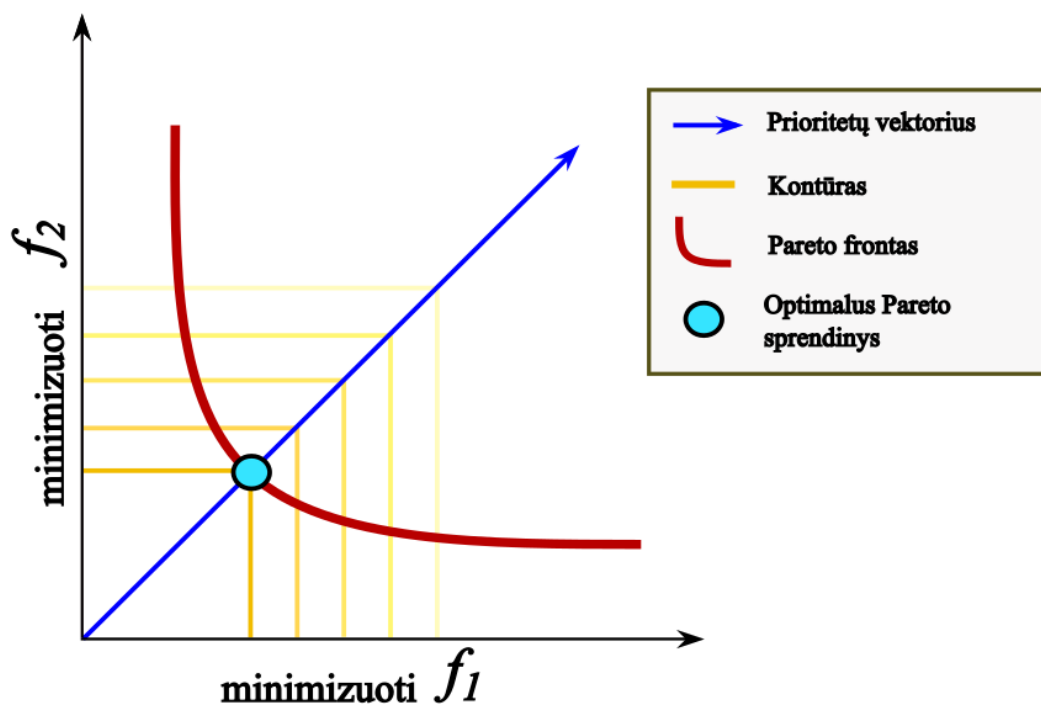
Čia: $f_i(x)$ yra i -ojo kriterijaus tikslo funkcijos reikšmė. Pareto frontas dažnai vaizduojamas grafiškai: dviejų kriterijų atveju jis atrodo kaip kreivė, o turint daugiau kriterijų – sudėtingesnės formos paviršius.

Praktikoje Pareto frontas naudojamas sprendžiant įvairius inžinerinius ir logistikos uždavinius, kur reikia suderinti prieštaringus tikslus, pavyzdžiui, kaštų mažinimą ir kokybės didinimą. Pavyzdžiui, inžineriniuose projektuose Pareto frontas leidžia sprendimų priėmėjams pasirinkti geriausią variantą, derinant našumą, estetiką ir gamybos išlaidas. Analizuojant šią sprendinių aibę, galima rasti variantą, kuris labiausiai atitinka konkrečius prioritetus ir apribojimus.

Kadangi daugelis realiųjų optimizavimo uždavinių yra sudėtingi ir apima neišskilias funkcijas, Pareto frontui skaičiuoti dažnai naudojami specializuoti metodai:

- Genetiniai algoritmai, kurie imituoja evoliucijos procesą, siekiant optimizuoti daugybinius tikslus (Deb et al., 2002).
- Svorijų pritaikymo metodai, kuriais alternatyvos vertinamos pagal įvairių kriterijų svertines reikšmes (Marler & Arora, 2004).
- Mokymosi algoritmai, skirti didelio masto optimizavimo uždaviniams su netiksliais ar neapibrėžtais duomenimis (Yang, 2011).

Šie metodai yra plačiai taikomi tokiose srityse, kaip energijos efektyvumo didinimas, transporto logistikos optimizavimas ir kompleksinių projektavimo uždavinių sprendimas. Pavyzdžiui, Yang (2011) savo darbuose pabrėžė, kad Pareto frontas suteikia sprendimų priėmėjams galimybę pasirinkti tinkamiausią sprendinį, subalansuojant kaštus, efektyvumą ir patikimumą.



1.2 pav. Pareto fronto pavyzdys (Ye et al., 2024)

1.2 paveiksle vaizduojamas Pareto frontas daugiakriterinėje optimizacijoje, kur siekiama minimizuoti du konkuruojančius tikslus: f_1 ir f_2 . Horizontalioji ašis nurodo pirmojo kriterijaus reikšmes, kurias reikia minimizuoti, o vertikalioji ašis – antrojo kriterijaus reikšmes, kurias taip pat reikia minimizuoti. Raudona kreivė žymi Pareto frontą – tai sprendinių riba, kurioje nė vieno sprendinio negalima pagerinti pagal vieną kriterijų, nepabloginant kito. Kitaip tariant, visi sprendiniai ant šios kreivės yra optimalūs. Šviesiai mėlynas taškas žymi konkretų sprendinį iš Pareto fronto. Šis sprendinys atitinka optimizacijos tikslus pagal tam tikrus vartotojo prioritetus ar preferencijas. Mėlynas vektorius rodo pageidaujamą optimizacijos kryptį. Oranžinės linijos atspindi tikslo funkcijų lygiagretę – jos žymi sprendinius, kurie turi vienodą tikslo funkcijų reikšmę. Šios linijos padeda vizualizuoti, kaip sprendiniai yra išsidėstę pagal kriterijų reikšmes (Ye et al., 2024).

Optimizacijos metodai dažniausiai skirstomi į vienakriterinius ir daugiakriterinius. Vienakriterinė optimizacija orientuota į vienos tikslo funkcijos maksimizavimą, arba minimizavimą, pavyzdžiui, gamybos sąnaudų mažinimą. Daugiakriterinė optimizacija

sprendžia problemas, kuriose reikia derinti kelis tarpusavyje konkuruojančius tikslus, pavyzdžiui, produkto kokybę, kainą ir gamybos laiką vienu metu (Hwang & Yoon, 1981).

Daugiakriterinis optimizavimas (angl. *Multi-Objective Optimization*) yra optimizavimo metodas, taikomas situacijose, kai sprendimų priėmimas priklauso nuo keleto tarpusavyje susijusių ir dažnai prieštaraujančių kriterijų. Tokiais atvejais paprastai neegzistuoja vienas absoliučiai geriausias sprendimas, todėl būtina ieškoti kompromiso tarp skirtingų tikslų. Praktikoje daugiakriterinio optimizavimo būtinybė išryškėja situacijose, kai, pavyzdžiui, vienas sprendimas pasižymi ekonominiu efektyvumu, tačiau reikalauja sudėtingų techninių sprendimų, o kitas variantas yra technologiškai paprastesnis, bet susijęs su didesnėmis sąnaudomis. Daugiakriterinis optimizavimas suteikia galimybę sprendimų priėmėjui objektyviai įvertinti alternatyvas, įvertinant kiekvieno sprendimo stipriąsias ir silpnąsias puses, bei pasirinkti subalansuotą sprendimą, geriausiai atitinkantį keliamus reikalavimus (Deb, 2001). Šis metodas plačiai taikomas įvairiose srityse, įskaitant energetiką, aplinkosaugą, transportą, infrastruktūros vystymą ir verslo valdymą, kur būtina suderinti ekonominius, techninius, ekologinius bei kitus reikšmingus kriterijus.

Inžinerijos srityje optimizavimas yra plačiai taikomas kuriant naujus produktus, didinant sistemų efektyvumą ir mažinant poveikį aplinkai. Daugiakriterinėje optimizacijoje tikslas yra suderinti kelias tikslo funkcijas, kurių kiekviena gali būti sulygintos naudojant linijinę normalizaciją (Deb et al., 2016):

$$f'_i = \frac{f_i(x) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \text{ jei } f_i(x) \text{ yra minimizuojama,} \quad (1.8)$$

Čia: f'_i - normalizuota i -tosios tikslo funkcijos reikšmė; $f_i(x)$ – i -toji tikslo funkcija nuo sprendinio x ; $f_i^{\min}$ – mažiausia (geriausia) reikšmė, kurią gali įgyti i -toji tikslo funkcija nagrinėjamoje sprendinių aibėje; $f_i^{\max}$ – didžiausia (blogiausia) reikšmė, kurią gali įgyti i -toji tikslo funkcija nagrinėjamoje sprendinių aibėje.

$$f'_i = \frac{f_i^{\max} - f_i(x)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \text{ jei } f_i(x) \text{ yra maksimizuojama} \quad (1.9)$$

Čia: $f_i^{\min}$ – mažiausia (blogiausia) reikšmė, kurią gali įgyti i -toji tikslo funkcija nagrinėjamoje sprendinių aibėje; $f_i^{\max}$ – didžiausia (geriausia) reikšmė, kurią gali įgyti i -toji tikslo funkcija nagrinėjamoje sprendinių aibėje.

Normalizuotų funkcijų vertės gali būti svertinamos, siekiant atsižvelgti į jų svarbą:

$$S(x) = \sum_{i=1}^k w_i f'_i(x), \quad (1.10)$$

Čia: $S(x)$ – bendras sprendinio x įvertinimas pagal visas k tikslo funkcijas; w_i - kiekvieno kriterijaus svoris, tenkinantis sąlygą $\sum_{i=1}^k w_i = 1$.

Optimizavimo metodai taikomi ne tik sudėtingų inžinerinių problemų sprendimui, bet ir kasdienėse situacijose, tokiose kaip sąnaudų mažinimas ar darbo procesų tobulinimas. Šių metodų taikymas leidžia priimti pagrįstus sprendimus ir užtikrinti racionalų išteklių paskirstymą, taip gerinant veiklos rezultatus.

1.2 Daugiakriterinė analizė

Daugiakriterinė sprendimų analizė (angl. *Multi-Criteria Decision Analysis* - MCDA) yra metodų visuma, kai sprendimai priklauso nuo kelių dažnai prieštaraujančių kriterijų. Tokie atvejai dažni praktikoje – pavyzdžiui, kai reikia pasirinkti projektą, suderinti ekonominius kaštus, poveikį aplinkai ir socialinę naudą. Metodai struktūruoja sprendimų priėmimo procesą, leidžiantį vertinti alternatyvas pagal ekonominius, techninius, aplinkosauginius ir socialinius kriterijus (Linkov & Moberg, 2011).

Šių metodų taikymo pradžia siejama su XX a. viduriu, kai buvo kuriami metodai sudėtingiems sprendimams priimti. Metodų populiarumas augo kartu su didėjančiu poreikiu įtraukti įvairių interesų grupių požiūrius bei objektyviai įvertinti sprendinių pasekmes (Roy, 1968; Saaty, 1980). Lietuvoje daugiakriterinę analizę reikšmingai plėtojo Edmundas K. Zavadskas, kuris kartu su kolegomis prisidėjo prie naujų metodų, tokių kaip WASPAS ir ARAS, kūrimo bei jų taikymo sprendžiant statybos projektų valdymo, transporto infrastruktūros, būsto modernizavimo ir kitus inžinerinius klausimus (Mardani et al., 2015; Stojčić et al., 2019; Zavadskas et al., 2012a, 2014).

MCDA metodų naudojimas ypač išaugo aplinkosaugos, sveikatos priežiūros, infrastruktūros plėtros ir viešojo administravimo srityse (Dehe & Bamford, 2015; Goetghebeur et al., 2012; Huang et al., 2011; Reddy et al., 2016; Zheng et al., 2016). Tai patvirtina MCDA metodų svarbą sprendimų paramos sistemose.

1.3 Daugiakriterinio vertinimo metodų palyginimas ir taikymo pavyzdžiai

Daugiakriteriniai metodai padeda vertinti alternatyvas pagal skirtingus kriterijus, leidžia suderinti kiekybinius ir kokybinius rodiklius, sprendžiant kompleksinius uždavinius, kur kriterijai dažnai yra tarpusavyje prieštaraujantys. Šių metodų universalumas ir lankstumas užtikrina jų platų taikymą įvairiose srityse, pabrėžiant sistemingą ir objektyvų požiūrį į sprendimų priėmimą. Šiame skyriuje aptariami pagrindiniai metodai, jų teoriniai pagrindai, privalumai ir trūkumai.

Analitinio hierarchinio proceso (AHP) metodas, sukurtas Thomas L. Saaty, yra viena plačiausiai taikomų daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodikų. Šis metodas leidžia sudėtingas sprendimų priėmimo problemas suskaidyti į hierarchinę struktūrą, kurią sudaro sprendimo tikslas, kriterijai ir alternatyvos (Saaty, 1980). AHP metodo esmė – porinis alternatyvų ir kriterijų palyginimas, naudojantis santykinę svarbos skalę (nuo 1 iki 9), leidžiančia nustatyti kiekvieno elemento svarbą santykiniais pagrindais.

Vienas didžiausių AHP metodo privalumų yra tai, kad jis suteikia galimybę integruoti tiek kiekybinius, tiek kokybinius vertinimo kriterijus į bendrą sprendimų priėmimo procesą. Tai ypač aktualu, kai vertinamos alternatyvos turi skirtingus vertinimo matmenis arba kai ne visi kriterijai gali būti išreikšti skaičiais (Vaidya & Kumar, 2006). Be to, AHP metodas yra lankstus ir gali būti taikomas įvairiose srityse – nuo inžinerijos iki vadybos ir politikos formavimo (Forman & Gass, 2001).

Svarbus AHP metodo pranašumas yra tai, kad jis pateikia aiškią ir struktūruotą problemos analizės schemą, leidžiančią priimti sprendimus remiantis sistemiškai gautais svorio koeficientais. Ši savybė leidžia geriau suprasti kriterijų ir alternatyvų tarpusavio santykius, kas padeda išvengti chaotiško ar intuityvaus sprendimų priėmimo (Ishizaka & Labib, 2011).

Tačiau AHP metodas turi ir reikšmingų trūkumų. Vienas jų – didelis subjektyvumo lygis, kadangi porinius palyginimus atlieka ekspertai, o jų vertinimai gali būti paveikti individualių nuostatų, patirties ar net psichologinių faktorių (Dyer, 1990). Ši subjektyvumo problema tampa dar ryškesnė, kai vertinime dalyvauja daug ekspertų, turinčių skirtingas nuomones. Tai gali lemti vertinimų nenuoseklumą, kurį būtina tikrinti nuoseklumo santykiu (CR). Nors CR leidžia įvertinti suderinamumą, praktikoje net ir atitikimas šiam rodikliui negarantuoja visiškai objektyvių sprendimų (Saaty, 2003).

Dar vienas metodo trūkumas yra jo sudėtingumas ir imlumas laikui, ypač jei sprendimo problema apima daug kriterijų ir alternatyvų. Kadangi kiekvienas porinis palyginimas reikalauja individualaus ekspertų įsitraukimo, vertinimo procesas gali tapti ilgas ir sudėtingas, o tai apsunkina metodo taikymą praktikoje (Ishizaka & Labib, 2011). Be to, didėjant kriterijų ir alternatyvų skaičiui, vertinimo procesas gali tapti ne tik sudėtingesnis, bet ir labiau pažeidžiamas neatitikimų bei klaidų (Al-Harbi, 2001).

Apibendrinant, AHP metodas yra vertingas sprendimų priėmimo įrankis, leidžiantis vertinti daug kriterijų ir derinti kiekybinius bei kokybinius duomenis. Tačiau jo taikymas reikalauja kruopščios ekspertų atrankos ir vertinimų suderinamumo užtikrinimo, nes subjektyvumas ir proceso sudėtingumas gali sumažinti rezultatų tikslumą bei patikimumą.

Artumo idealiam sprendiniui metodas (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* – TOPSIS), pasiūlytas Hwang ir Yoon (1995) yra vienas plačiau taikomų daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodų. Metodo esmė slypi prielaidoje, kad geriausia alternatyva yra ta, kuri yra arčiausiai idealios sprendimo alternatyvos ir tuo pačiu toliausiai nuo blogiausios (Hwang & Yoon, 1981). Idealus sprendinys – tai alternatyva, kur kiekvienas kriterijus pasiekia geriausią įmanomą reikšmę, o blogiausias sprendinys – kai visi kriterijai pasiekia blogiausias reikšmes.

TOPSIS metodas ypač tinkamas situacijoms, kai reikia išlaikyti aiškią vertinimo struktūrą ir efektyviai atlikti skaičiavimus. Tai aktualu tiekimo grandinės valdymo, inžinierinių projektų optimizavimo, transporto sektoriaus ir kitose srityse, kur svarbu tiksliai ir greitai priimti sprendimus (Behzadian et al., 2012; Yoon & Hwang, 1995).

Vienas svarbiausių TOPSIS metodo privalumų yra jo paprastumas ir aiškumas. Metodas suteikia galimybę lengvai suprasti ir paaiškinti vertinimo procesą, todėl jis yra patrauklus tiek praktikams, tiek mokslininkams (Shih et al., 2007). Be to, TOPSIS metodas gali efektyviai apdoroti didelius alternatyvų ir kriterijų kiekius, todėl jis taikytinas sprendimų priėmimui kompleksiškuose projektuose (Behzadian et al., 2012). Dar vienas metodo privalumas – jis leidžia vertinti tiek teigiamus, tiek neigiamus kriterijus, o tai užtikrina visapusišką ir objektyvesnį alternatyvų palyginimą (Yoon & Hwang, 1995).

Nepaisant metodo pranašumų, jis turi ir trūkumų. Viena esminių problemų yra tai, kad galutiniai rezultatai labai priklauso nuo pasirinkto normalizacijos metodo. Net maži duomenų pokyčiai gali reikšmingai paveikti sprendinį, ypač jei alternatyvų vertinimo skirtumai yra minimalūs (Zavadskas et al., 2016). Taip pat kritikuotina, kad TOPSIS metodas laikosi prielaidos, jog visi kriterijai yra tarpusavyje nepriklausomi, kas realiose situacijose ne visada atitinka tikrovę. Kriterijai neretai yra tarpusavyje susiję, todėl toks supaprastinimas gali lemti netikslius sprendimus (Wang & Elhag, 2006).

Apibendrinant, TOPSIS metodas yra galingas ir plačiai naudojamas sprendimų paramos įrankis, ypač tinkamas didelėms daugiakriterinėms problemoms spręsti. Tačiau, norint užtikrinti rezultatų patikimumą, reikėtų kruopščiai pasirinkti normalizacijos metodą ir įvertinti kriterijų tarpusavio priklausomybes.

Suderintų prioritetinių santykių eliminavimo ir pasirinkimo metodas (pranc. *Élimination Et Choix Traduisant la REalité* – ELECTRE) yra daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodas, kurį 1965 m. sukūrė Bernard Roy. Šis metodas priskiriamas prioritetinių santykių (outranking) grupei, kurių esmė – vertinti, kiek viena alternatyva yra pranašesnė už kitą pagal daugelį kriterijų vienu metu (Taherdoost & Madanchian, 2023a).

ELECTRE metodo esmė – kiekviena alternatyva lyginama poromis, įvertinant atitikimo indeksą, rodantį, kiek kriterijų palaiko vienos alternatyvos pranašumą prieš kitą, ir neatitikimo indeksą, rodantį, kiek kuris nors kriterijus stipriai prieštarauja šiam pranašumui. Alternatyva laikoma dominuojančia tik tada, jei ji atitinka nustatytas atitikimo ir neatitikimo sąlygas.

Vienas didžiausių ELECTRE metodo privalumų – tinkamumas spręsti problemas, kai kriterijai yra prieštaraujantys, o sprendimas reikalauja kompromiso. Metodas leidžia įvertinti tiek kiekybinius, tiek kokybinius duomenis ir tinka neapibrėžtose situacijose (Rane et al., 2023).

Kitas svarbus pranašumas – metodo gebėjimas nagrinėti sudėtingus santykius tarp alternatyvų ir kriterijų, todėl jis dažnai taikomas aplinkosaugos, inžinerijos, transporto ir statybos sektoriuose (Jagtap & Karande, 2023).

Tačiau ELECTRE metodas turi ir reikšmingų trūkumų. Pirmiausia, jis yra gana sudėtingas ir reikalauja didelio skaičiavimų tikslumo, ypač kai vertinamas didelis alternatyvų ir kriterijų skaičius. Be to, metodo taikymas reikalauja nustatyti slenkstines reikšmes ir svorius, o tai dažnai būna subjektyvu, tačiau galutinis rezultatas ne visada pateikia aiškų alternatyvų reitingą – dažnai tenka interpretuoti dominavimo santykius, kas gali apsunkinti sprendimo priėmimą (Mohamadghasemi et al., 2020).

Apibendrinant, ELECTRE metodas yra stiprus įrankis sprendžiant sudėtingas daugiakriterines problemas, tačiau jo taikymas reikalauja gilaus metodo suvokimo, o rezultatų interpretacija gali būti sudėtinga.

PROMETHEE (angl. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) metodas yra daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodas, kurį 1982 m. sukūrė Jean-Pierre Brans. Jis priskiriamas prioritetinių santykių (outranking) metodų grupei ir yra plačiai naudojamas sprendimų paramos sistemose, kai reikia nustatyti alternatyvų eiliškumą pagal kelis, neretai prieštaraujančius kriterijus (Baydaš & Elma, 2021). Metodo esmė – porinis alternatyvų palyginimas pagal kiekvieną kriterijų, įvertinant jų pranašumą arba trūkumą. Vertinimo rezultatai pateikiami per teigiamą ir neigiamą srautus: teigiamas srautas rodo, kiek viena alternatyva dominuoja kitas, o neigiamas srautas parodo, kiek alternatyva yra dominuojama kitų (Uzun et al., 2021).

Reikšmingas PROMETHEE metodo privalumas yra jo aiškumas ir suprantamumas. Sprendimų priėmėjams pateikiami teigiamo ir neigiamo srauto rodikliai yra intuityvūs, o alternatyvų reitingavimo rezultatai paprastai būna lengvai interpretuojami (Baydaš & Elma, 2021). Kitas reikšmingas metodo pranašumas – lankstumas. Jis leidžia kiekvienam kriterijui taikyti skirtingas pirmenybės funkcijas, pritaikant jas prie konkrečių vertinimo situacijų ir

sprendimų priėmėjo nuostatų (Uzun et al., 2021). PROMETHEE taip pat gali būti taikomas tiek kiekybiniais, tiek kokybiniais kriterijams, todėl jis plačiai naudojamas tiekimo grandinės valdyme, finansų analizei, gamybos planavimui ir aplinkosaugos projektų vertinimui (Agrawal, 2022).

Nepaisant metodo lankstumo ir paprastumo, viena dažniausiai įvardijamų PROMETHEE problemų – sprendimų priėmėjo subjektyvumas nustatant pirmenybės funkcijas ir kriterijų svorius. Netinkamai parinktos funkcijos gali lemti iškraipytus rezultatus ir sumažinti sprendimo patikimumą (Baydaş & Elma, 2021). Kita metodo silpnoji pusė – jautrumas svorių pokyčiams. Nedidelės svorių korekcijos gali lemti reikšmingus alternatyvų reitingavimo pokyčius, todėl rezultatų stabilumas ne visada yra užtikrinamas (Agrawal, 2022). Be to, kai skirtumai tarp alternatyvų yra labai nedideli, galutinis reitingas gali būti nepakankamai informatyvus, o tai verčia sprendimų priėmėjus papildomai interpretuoti rezultatus ar pasitelkti kitus metodus (Gul et al., 2018).

Apibendrinant, PROMETHEE metodas yra patogus ir plačiai naudojamas daugiakriterinio sprendimų priėmimo įrankis, kuris pasižymi lankstumu ir aiškiu sprendimų rezultato pateikimu. Tačiau jo taikymas reikalauja atidumo renkantis kriterijų svorius ir pirmenybės funkcijas, nes šie subjektyvūs sprendimai gali lemti aukštą rezultatų jautrumą ir galimą sprendimo neapibrėžtumą.

VIKOR (serb. *VIseKriterijumska Optimizacija i KOmpromisno Resenje*) metodas yra daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodika, kurią 1998 m. pasiūlė Serafim Opricovic. Šis metodas priskiriamas kompromisinių sprendimų paieškos metodams. VIKOR išsiskiria tuo, kad jo tikslas yra rasti sprendimą, kuris geriausiai subalansuoja įvairių kriterijų vertes ir užtikrina kuo mažesnę „nepasitenkinimą“ tarp blogiausiai įvertintų kriterijų. Metodas remiasi artumo idealiam sprendiniui principu, tačiau skirtingai nei TOPSIS, VIKOR akcentuoja kompromisinį sprendimą, kuris gali būti ypač vertingas, kai nėra aiškiai dominuojančios alternatyvos (Taherdoost & Madanchian, 2023b).

VIKOR metodo esmė – įvertinamos kiekvienos alternatyvos artumo reikšmės pagal geriausią ir blogiausią kriterijų vertes. Metodas apskaičiuoja trijų dydžių rodiklius: S – agreguotas nuokrypis pagal visus kriterijus, R – didžiausias „nepasitenkinimas“ pagal bet kurį kriterijų ir Q – kompromisinis sprendimo rodiklis, kuris leidžia įvertinti bendrą alternatyvos efektyvumą. Galutinis sprendimas parenkamas pagal Q reikšmę, tačiau kartu analizuojami ir S bei R rodikliai, siekiant nustatyti, ar nėra stiprios dominuojančios alternatyvos (Rane et al., 2023). Vienas svarbiausių VIKOR metodo privalumų – jo gebėjimas pasiūlyti kompromisinį sprendimą, kuris gali būti ypač naudingas situacijose, kai nėra viena alternatyva nėra akivaizdžiai

geriausia visais kriterijais. Be to, metodas leidžia įvertinti skirtingų suinteresuotų šalių poreikius ir siekia sumažinti „nepasitenkinimą“ blogiausiai įvertintais kriterijais. Todėl VIKOR metodas dažnai taikomas sprendžiant sudėtingas optimizavimo problemas, ypač kai sprendimo priėmėjai nori subalansuoti kompromisinius rezultatus (Sotoudeh-Anvari, 2022).

Tačiau šis metodas turi ir trūkumų. Vienas jų – metodo jautrumas kriterijų svoriams. Net nedideli svorių pokyčiai gali reikšmingai paveikti galutinį sprendimą. Be to, VIKOR metodas, skirtingai nei kai kurie kiti daugiakriterinio vertinimo metodai, nesiekia rasti absoliučiai geriausios alternatyvos, o siekia kompromisinio sprendimo, kuris ne visada atitinka sprendimų priėmėjo lūkesčius. Kritikuojama ir tai, kad metodo sprendimo taisyklė nėra tokia intuityvi kaip, pavyzdžiui, TOPSIS ar AHP metodų, todėl rezultatų interpretacija gali būti sudėtingesnė, ypač mažiau patyrusiems sprendimų priėmėjams (Uzun et al., 2021).

VIKOR metodas plačiai taikomas įvairiose srityse: medžiagų parinkimo, tiekimo grandinės valdymo, tvarios plėtros, transporto sistemų optimizavimo, energetikos ir sveikatos priežiūros sprendimų priėmimo srityse. Jis dažnai naudojamas kartu su kitais MCDA metodais, tokiais kaip AHP ar TOPSIS, formuojant hibridines vertinimo sistemas, siekiant sumažinti pavienių metodų trūkumus ir pagerinti sprendimų patikimumą (Bhaskar & Khan, 2022).

Svertinės sumos ir sandaugos vertinimo metodas (angl. *Weighted Aggregated Sum Product Assessment* – WASPAS) yra daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodas, kurį pasiūlė Zavadskas, Turskis ir Antuchevičienė (2012b). Jis jungia dviejų klasikinių metodų – svertinės sumos metodo (WSM) ir svertinės sandaugos metodo (WPM) – savybes. Šis metodas laikomas vienu patikimiausių sprendimų paramos įrankių dėl savo integruoto požiūrio, kuris leidžia sumažinti rezultatų jautrumą duomenų svyravimams (Arslan & Cebi, 2024).

WASPAS metodo esmė yra apskaičiuoti kiekvienos alternatyvos reikšmės pagal WSM ir WPM metodus, o gautus rezultatus apjungti svorio koeficientu λ . Šis koeficientas leidžia sprendimų priėmėjui reguliuoti kiekvieno metodo įtaką galutiniam sprendimui, atsižvelgiant į problemos pobūdį (Handayani et al., 2023).

Vienas didžiausių WASPAS metodo privalumų – jo tikslumas ir lankstumas. Dviejų vertinimo metodų derinimas sumažina rezultatų jautrumą duomenų paklaidoms ir leidžia sprendimų priėmėjui koreguoti sprendimo formulę, pritaikant ją konkrečiam kontekstui (Radomska-Zalas, 2023). Be to, WASPAS metodas sėkmingai naudojamas įvairiose srityse, tokiose kaip technologiniai procesai, švietimas ir pramoninė gamyba, nes jis geba vienodai gerai vertinti ir kiekybinius, ir kokybinius kriterijus (Handayani et al., 2023).

Tačiau WASPAS metodas turi ir trūkumų. Vienas pagrindinių – kriterijų svorių nustatymo subjektyvumas, nes dažnai jis priklauso nuo ekspertų vertinimų. Netinkamai

parinktas λ koeficientas taip pat gali iškraipyti sprendimo rezultatus. Normalizacijos klaidos arba netikslūs duomenys gali reikšmingai paveikti galutinius sprendimus (Arslan & Cebi, 2024).

Pastaraisiais metais WASPAS metodas buvo pritaikytas ne tik gamybos valdymo, bet ir technologinių procesų vertinimo, tiekimo grandinės valdymo ir net švietimo sektoriuose (Handayani et al., 2023; Radomska-Zalas, 2023).

1.1 lentelė. Daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodų palyginimas (sudaryta autoriaus pagal Arslan & Cebi, 2024; Baydaş & Elma, 2021; Behzadian et al., 2012; Brans & Vincke, 1985; Hwang & Yoon, 1981; Opricovic & Tzeng, 2004; Rane et al., 2023; Roy, 1968; Saaty, 1980; Sotoudeh-Anvari, 2022; Vaidya & Kumar, 2006; Zavadskas et al., 2012)

Metodas	Privalumai	Trūkumai	Taikymo sritys
AHP	- Galimybė derinti kiekybinius ir kokybinius kriterijus - Aiški struktūra ir vizualizacija - Nuoseklumo tikrinimas mažina vertinimų klaidas	- Subjektyvumas ekspertų vertinimuose - Sudėtinga taikyti, kai daug kriterijų, alternatyvų - Didelės laiko sąnaudos	- Strateginis planavimas - Projektų valdymas - Viešieji pirkimai
TOPSIS	- Aiškus matematinis pagrindas - Paprastumas ir skaičiavimo greitis - Gali apdoroti didelius duomenų kiekius	- Jautrus normalizacijos metodui - Priklausomybė nuo kriterijų nepriklausomumo prielaidos	- Transporto optimizavimas - Logistika - Inžineriniai projektai
ELECTRE	- Tinka prieštaringsiems kriterijams - Atsparus neapibrėžtumui - Gali atmesti nepriimtinas alternatyvas	- Sudėtingas - Reikalingos slenkstinės reikšmės ir ekspertų vertinimai - Dažnai dviprasmiški rezultatai	- Aplinkosaugos sprendimai - Statybos projektai - Energetika
PROMETHEE	- Lankstumas - Skirtingos pirmenybės funkcijos - Lengva interpretuoti rezultatus	- Jautrus svorių pokyčiams - Subjektyvumas renkant funkcijas	- Finansų analizė - Gamybos planavimas - Investicijų rizikos vertinimas
VIKOR	- Tinka kompromisui esant prieštaringsiems kriterijams - Galima analizuoti kompromiso laipsnį - Pritaikomas įvairiose srityse	- Jautrus svorių pokyčiams - Neranda vienareikšmio sprendimo	- Medžiagų parinkimas - Teritorijų planavimas - Sveikatos apsauga
WASPAS	- Didelis tikslumas - Mažina rezultatų jautrumą duomenų paklaidoms - Itin lankstus taikymas	- Jautrus svorių pokyčiams - Subjektyvus λ koeficiento parinkimas	- Technologinių procesų vertinimas - Gamybos procesų optimizavimas - Technologijų diegimas

Daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodai pasižymi skirtingais privalumais, trūkumais ir taikymo sritimis, todėl jų pasirinkimas priklauso nuo sprendžiamos problemos. 1.1 lentelėje pateiktas AHP, TOPSIS, ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR ir WASPAS metodų palyginimas, apžvelgiantis pagrindinius privalumus, trūkumus ir taikymo sritis.

1.4 Daugiakriterinių metodų taikymas sraigtasparnių ir ginkluotės vertinimui

Sraigtasparnių tinkamumo vertinimas yra kompleksinis procesas, apimantis techninių, ekonominių ir taktinių aspektų integraciją. Kadangi šie kriterijai dažnai yra tarpusavyje prieštaringi, efektyvių sprendimų priėmimui būtina taikyti struktūrizuotus ir objektyvius vertinimo metodus. Daugiakriteriniai sprendimų priėmimo metodai (MCDA) leidžia įvertinti įvairaus pobūdžio kriterijus, susisteminti ekspertų nuomones ir techninius duomenis, todėl jie plačiai taikomi sprendžiant karinės aviacijos platformų, įskaitant sraigtasparnius, atrankos klausimus.

2020 m. Ispanijoje atliktame tyrime, siekiant įvertinti pažangių treniruočių orlaivių atranką, buvo taikytas neapibrėžtojo atskaitos nuo idealo metodas (FRIM) (Sánchez-Lozano & Rodríguez, 2020). Šis metodas tinkamas sprendžiant daugiakriterines problemas, kuriose vyrauja neapibrėžtumas ar subjektyvūs ekspertiniai vertinimai. FRIM metodas leidžia apjungti ekspertinę patirtį ir techninius duomenis, tad sprendimai gali būti priimami net esant ribotai informacijai. Pagrindinis FRIM pranašumas – gebėjimas apdoroti ribotus ar neišsamius duomenis, o tai itin aktualu karinių orlaivių vertinimo kontekste. Nors tyrimas buvo orientuotas į treniruočių orlaivius, autoriai pažymėjo metodo universalumą ir galimybę jį taikyti atakos sraigtasparniams. Tai aktualu situacijose, kai trūksta išsamios informacijos apie kriterijus, o vertinime dalyvauja skirtingų sričių ekspertai. FRIM gali būti naudojamas atrenkant sraigtasparnius greitojo reagavimo ar specialiosioms pajėgoms, derinant techninius parametrus su operaciniais reikalavimais. Šis metodas išplečia daugiakriterinių vertinimų galimybes karinės aviacijos srityje, prisidedamas prie efektyvesnio išteklių naudojimo ir sprendimų kokybės.

2021 m. tiriant sraigtasparnių pasirinkimo galimybes Brazilijos kariniam laivynui, buvo taikytas hibridinis PROMETHEE-SAPEVO-M1 metodas, suderinantis tiek tvarkinių (ordininių), tiek kiekybinių (kardinalių) duomenų analizę (Moreira et al., 2021). Šis metodas pasirodė itin tinkamas vertinant sudėtingus kriterijus, tokius kaip našumas, kuro sąnaudos, eksploatacinės išlaidos ir tinkamumas karinėms operacijoms. PROMETHEE-SAPEVO-M1 leidžia integruoti sprendimų priėmėjų subjektyvius prioritetus su objektyviais techniniais rodikliais, išlaikant duomenų nuoseklumą net ir esant skirtingos prigimties kriterijams. Tai užtikrina patikimą alternatyvų reitingavimą, net kai duomenys yra riboti ar neapibrėžti.

Vertinant įvairias ginklų pasirinkimo alternatyvas, Karaburun ir Alaykiran (2018) savo tyrime taikė du plačiai naudojamus daugiakriterinius sprendimų priėmimo metodus – AHP ir

TOPSIS. Vertinimas buvo pagrįstas tokiais kriterijais kaip saugos sistemos patikimumas, mechaninės struktūros kokybė, svoris, laikymo patogumas bei kaina. Tyrime AHP metodas buvo naudojamas nustatyti kriterijų svarboms, o TOPSIS – įvertinti alternatyvas pagal atstumą nuo idealaus ir blogiausio sprendimo. Rezultatai atskleidė, kad šių metodų derinimas leidžia sistemiškai ir objektyviai palyginti alternatyvas, suderinti techninius bei ekonominius aspektus ir priimti pagrįstą, strateginiais poreikiais paremtą sprendimą. Tokie metodai gali būti sėkmingai taikomi ir kituose ginkluotės ar karinės technikos vertinimo kontekstuose.

Tuo tarpu 2023 m. Brazilijoje atliktame tyrime buvo pritaikytas svertinės sumos ir sandaugos metodas WASPAS, skirtas įvertinti sraigtasparnius, atitinkančius Rio de Žaneiro valstijos karo policijos veiklos specifiką (de Assis et al., 2023). Tyrime buvo vertinami tokie kriterijai kaip kuro sąnaudos, skrydžio trukmė, priežiūros išlaidos bei misijų universalumas, atspindintys tiek eksploatacinius, tiek taktinius reikalavimus. WASPAS metodas, derinantis svertinės sumos (WSM) ir sandaugos (WPM) modelius, leido ne tik atlikti kiekybiškai pagrįstą vertinimą, bet ir padidinti rezultatų patikimumą. Tyrimas parodė, kad šis metodas yra lankstus ir efektyvus įrankis, padedantis identifikuoti optimalias alternatyvas pagal operacinius poreikius ir galimų sprendimų kokybę. Šis požiūris gali būti pritaikytas ir platesniame karinių sraigtasparnių atrankos kontekste, kai būtina subalansuoti įvairius taktinius ir logistinius aspektus.

1.5 Pirmojo skyriaus išvados

1. Daugiakriteriniai sprendimų priėmimo metodai yra vieni efektyviausių analizuojant sraigtasparnių tinkamumą, nes leidžia įvertinti dažnai prieštarą kylančius kiekybinius ir kokybinius kriterijus.
2. Literatūros analizė ir praktinių tyrimų apžvalga atskleidė, kad daugiakriteriniai metodai sėkmingai taikomi karinių orlaivių vertinimui – nuo treniruočių ir transportinių iki kovinių sraigtasparnių – įvairiose ginkluotosiose pajėgose.
3. Tyrimai parodė, kad AHP-TOPSIS ir WASPAS metodai gali būti sėkmingai pritaikyti ir Lietuvos kariuomenės poreikiams, atsižvelgiant į nacionalinę gynybos strategiją, operacinę aplinką ir logistinius apribojimus.
4. Atsižvelgiant į literatūros analizę ir praktinius tyrimus, šiame darbe pasirinkti AHP-TOPSIS ir WASPAS metodai. AHP-TOPSIS pasižymi ilgamete taikymo patirtimi ir struktūruotu kriterijų bei alternatyvų vertinimu, o WASPAS – augančiu moksliniu pripažinimu bei tikslu ir stabiliu alternatyvų reitingavimu. Abu metodai padeda nuosekliai įvertinti alternatyvas ir leidžia analizuoti vertinimo rezultatų patikimumą bei jų tarpusavio atitiktį.

2. LENGVŲJŲ KOVINIŲ SRAIGTASPARNIŲ VERTINIMO METODOLOGIJA

Šio skyriaus tikslas – pristatyti tyrime taikomą metodologiją, skirtą optimalaus lengvojo kovinio sraigtasparnio tipo parinkimui. Tyrime numatoma naudoti du daugiakriterinius sprendimų priėmimo metodus – analitinį hierarchinį procesą kartu su artumo idealiam sprendiniui metodu (AHP-TOPSIS) bei svertinės sumos ir sandaugos metodą (WASPAS).

Abu metodai pasižymi unikaliais privalumais ir išskirtinėmis savybėmis, leidžiančiomis sistemingai analizuoti prieštarigus kriterijus bei optimizuoti sprendimų priėmimo procesą. WASPAS metodas sujungia svertinės sumos ir sandaugos metodų savybes, suteikdamas galimybę lankščiai pritaikyti balansavimo parametą λ , kuris leidžia reguliuoti skirtingų sprendimų metodų įtaką. Tuo tarpu AHP-TOPSIS metodas išsiskiria savo gebėjimu struktūrizuoti problemą hierarchiniu lygmeniu ir nustatyti alternatyvų artumą idealiam sprendiniui. Šių metodų tarpusavio palyginimas leidžia įvertinti rezultatus iš skirtingų perspektyvų, užtikrinant rezultatų patikimumą ir objektyvumą.

2.1 WASPAS metodas: struktūra ir taikymas

WASPAS metodas yra efektyvus daugiakriterinio sprendimų priėmimo įrankis, apjungiantis svertinės sumos (WSM) ir svertinės sandaugos (WPM) metodų privalumus, suteikdamas galimybę išsamiau ir tiksliau reitinguoti alternatyvas. WASPAS leidžia spręsti daugiakriterines problemas, analizuojant alternatyvas pagal įvairius kriterijus, kurie gali būti tiek kiekybinio, tiek kokybinio pobūdžio.

Kriterijų reikšmingumui nustatyti buvo atlikta ekspertinė apklausa, kurios metu specialistai devynis vertinimo kriterijus įvertino pagal jų svarbą penkiabalėje skalėje (1 – nereikšminga, 5 – labai reikšminga). Ekspertų grupė sudaryta iš karinės aviacijos, logistikos ir inžinerijos specialistų, kurie turi ilgametę patirtį sraigtasparnių vertinime.

Surinkti duomenys buvo normalizuoti, siekiant sumažinti ekspertų vertinimų skirtumų poveikį ir padidinti duomenų palyginamumą. Normalizavimo formulė:

$$W_j = \frac{Score_j}{\sum_{j=1}^n Score_j} \quad (2.1)$$

Čia: W_j – kriterijaus j svoris; $Score_j$ – ekspertų suteikti balai; n – kriterijų skaičius.

Kiekvienas sraigtasparnis (alternatyva) vertinamas pagal kiekvieną kriterijų, o duomenys normalizuojami pagal formules:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \text{ (naudingo kriterijaus atveju) ir} \quad (2.2)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \text{ (nenaudingo kriterijaus atveju)} \quad (2.3)$$

Čia: x_{ij} – alternatyvos i vertinimas pagal j -tą kriterijų; $\bar{x}_{ij}$ – normalizuota x_{ij} vertė.

WSM (svertinės sumos) metodas vertina alternatyvas remiantis kriterijų svoriais, o WPM (svertinės sandaugos) metodas naudoja normalizuotų kriterijų reikšmių daugybą, kad išvestų bendrą vertinimą:

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n x_{ij} w_j \quad (2.4)$$

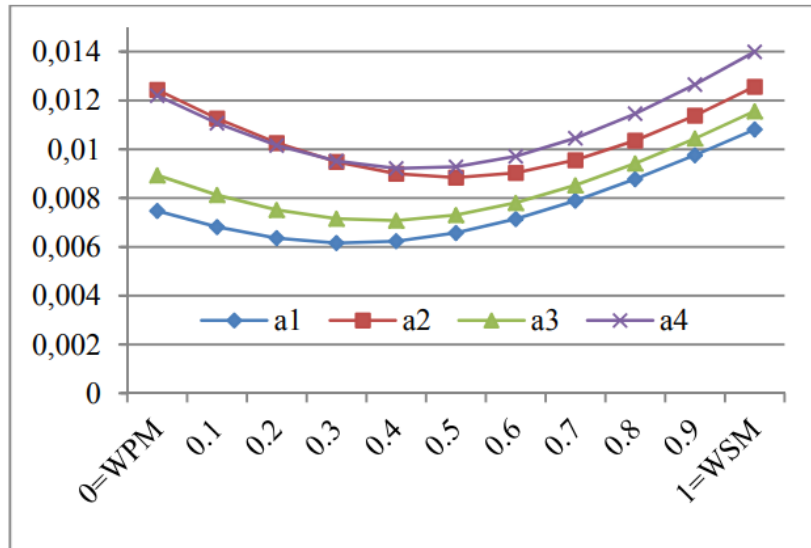
$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x_{ij})^{w_j} \quad (2.5)$$

$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)}, \lambda = 0, \dots, 1. \quad (2.6)$$

Čia: $Q_i^{(1)}$ – svertinės sumos metodu gauta alternatyvos i reikšmė; $Q_i^{(2)}$ – svertinės sandaugos metodu gauta alternatyvos i reikšmė; Q_i – alternatyvos i galutinė reikšmė; λ – parametų balanso koeficientas.

(2.6) formulė su parametų balanso koeficientu λ leidžia lanksčiai reguliuoti svertinės sumos ir svertinės sandaugos metodų įtaką galutiniam sprendimui: kai $\lambda = 1$, WASPAS reikšmė sutampa su svertinės sumos metodo rezultatu, o kai $\lambda = 0$, rezultatas atitinka svertinės sandaugos metodo reikšmę. Tarpinėms λ reikšmėms abu metodai turi proporcingą įtaką.

Literatūroje pabrėžiama, kad siekiant maksimalaus vertinimo tikslumo, λ reikšmė gali būti optimizuojama, įvertinant pradinių kriterijų reikšmių netikslumus ir jų dispersiją. Optimalios λ reikšmės identifikavimas leidžia sumažinti galutinės alternatyvos vertės sklaidą (dispersiją) ir padidinti sprendimo stabilumą, ypač tais atvejais, kai vertinimo duomenys yra neišsamūs ar netikslūs. Optimalios λ reikšmės apskaičiavimas, grindžiamas dispersijos minimizavimo principu, detalai aptartas Zavadskas et al. (2012a), Zavadskas ir Turskis (2014), taip pat naujesniuose WASPAS metodo pritaikymo ir plėtros darbuose (Zavadskas et al., 2016).



2.1 pav. Reitingavimo tikslumas (Zavadskas et al., 2012)

Optimalios λ reikšmės nustatymas dažnai vizualiai iliustruojamas taip, kaip pavaizduota grafike (2.1 pav.). Grafikas atspindi alternatyvų reitingavimo stabilumą, priklausomai nuo λ reikšmės (balanso tarp svertinės sumos metodo (WSM) ir svertinės sandaugos metodo (WPM)). Horizontalioje ašyje pavaizduotos λ reikšmės intervale nuo 0 iki 1. Vertikalioje ašyje vaizduojamas sprendimų tikslumo rodiklis (dispersija), kuris leidžia įvertinti rezultatų stabilumą. Kuo mažesnė dispersija, tuo stabilesnis alternatyvų reitingavimas ir patikimesnis galutinis sprendimas.

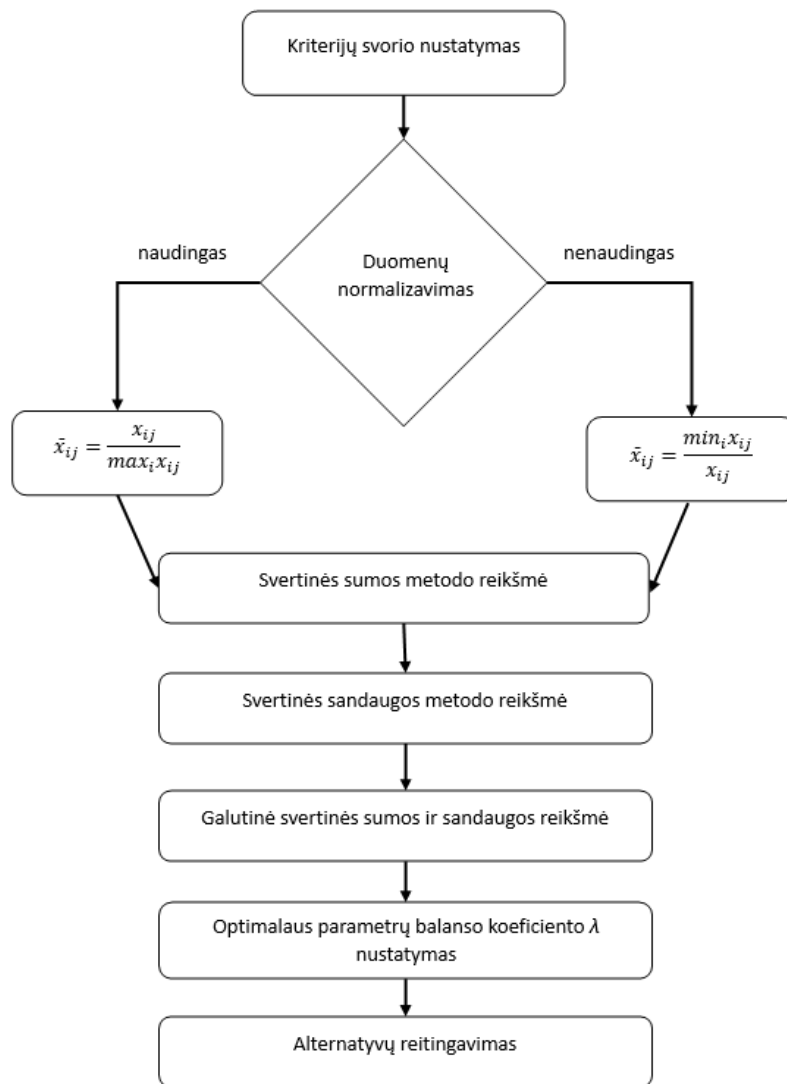
Paprastai, jeigu nėra didelio duomenų neapibrėžtumo, pasirenkama standartinė reikšmė ($\lambda = 0,5$). Tikslios optimalios λ reikšmės paieška atliekama ieškant funkcijos ekstremumo. Funkcijos ekstremumas nustatomas, kai (2.6) lygties išvestinė pagal λ prilyginama nuliui:

$$2\lambda\sigma^2(Q_i^{(1)}) - 2\sigma^2(Q_i^{(2)}) + 2\lambda\sigma^2(Q_i^{(2)}) = 0. \quad (2.7)$$

Iš čia išreiškiama λ_{opt} reikšmė:

$$\lambda_{opt} = \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2(Q_i^{(1)}) + \sigma^2(Q_i^{(2)})} \quad (2.8)$$

Čia: λ_{opt} – optimali balanso koeficiento λ reikšmė konkrečiai alternatyvai; $\sigma^2(Q_i^{(1)})$ – alternatyvos i vertinimo rezultato dispersija, apskaičiuota naudojant svertinės sumos metodą (WSM); $\sigma^2(Q_i^{(2)})$ – alternatyvos i vertinimo rezultato dispersija, apskaičiuota naudojant svertinės sandaugos metodą (WPM).



2.2 pav. WASPAS metodo schema (sudaryta autoriaus, remiantis de Assis et al., 2023)

Optimalaus balanso koeficiento λ_{opt} reikšmė apskaičiuojama kiekvienai alternatyvai individualiai, remiantis svertinės sumos (WSM) ir svertinės sandaugos (WPM) dispersijų santykiu (formulės (2.7) ir (2.8)). Ši reikšmė leidžia sumažinti vertinimo rezultato sklaidą, priklausomai nuo pradinių kriterijų reikšmių neapibrėžtumo kiekvienu konkrečiu atveju. Praktikoje kriterijų reikšmės dažnai būna netikslios arba apytikslės, todėl dispersijos minimizavimu pagrįstas λ_{opt} leidžia sumažinti sprendimų rezultatų jautrumą pradinės informacijos netikslumams.

2.2 AHP-TOPSIS metodas: kriterijų analizė ir sprendimo priėmimas

AHP-TOPSIS metodas sujungia du daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodus: analitinį hierarchinį procesą ir artumo idealiam sprendiniui techniką, suteikdamas galimybę įvertinti alternatyvas pagal svarbiausius kriterijus (Sharma et al., 2020).

Šis hibridinis metodas naudojamas sudėtingiems sprendimų priėmimo uždaviniams spręsti, kai reikia įvertinti alternatyvas pagal daugybę tarpusavyje susijusių kriterijų. AHP metodas leidžia struktūrizuoti problemą hierarchiniu lygmeniu, nustatyti kriterijų svarbą ir išreikšti jų santykinį reikšmingumą. Porinis kriterijų palyginimas leidžia objektyviai nustatyti jų svorius. Tuo tarpu TOPSIS metodas užtikrina efektyvų alternatyvų reitingavimą, remiantis jų artumu prie idealaus ir antiidealaus sprendinio.

Pirmasis AHP-TOPSIS metodo etapas – kriterijų svorio nustatymas naudojant AHP. Šis procesas apima šiuos žingsnius:

- Hierarchijos sudarymas – problema struktūrizuojama į hierarchiją, kurią sudaro tikslas (pagrindinis sprendimas), kriterijai ir alternatyvos.
- Porinis kriterijų palyginimas – ekspertai vertina kiekvieno kriterijaus svarbą, naudodami porinio palyginimo skalę (pvz., nuo 1 – lygi svarba iki 9 – absoliuti svarba).
- Svorio koeficientų skaičiavimas – kriterijų svarbos reikšmės nustatomos sprendžiant porinio palyginimo matricos charakteringą lygtį. Šis procesas apima matricos normalizavimą ir kiekvieno kriterijaus svorio apskaičiavimą. Kriterijų svorio nuoseklumui patikrinti naudojamas nuoseklumo indeksas CI ir santykinis nuoseklumo indeksas CR , kurie apskaičiuojami pagal formules:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.9)$$

$$CR = \frac{CI}{n - RI} \quad (2.10)$$

Čia: CI – nuoseklumo indeksas; CR – santykinis nuoseklumo indeksas; λ_{max} – didžiausia porinio palyginimo matricos savoji vertė; n – kriterijų skaičius; RI – atsitiktinio nuoseklumo indekso reikšmė.

Jei $CR \leq 0,1$, kriterijų vertinimas laikomas nuosekliu.

Antrasis AHP-TOPSIS metodo etapas yra TOPSIS taikymas alternatyvoms vertinti. TOPSIS procesą sudaro šie žingsniai:

- Alternatyvų vertinimo matrica – kiekviena alternatyva vertinama pagal kriterijus, naudojant ekspertų, arba objektyvius duomenis.
- Duomenų normalizavimas – Siekiant užtikrinti kriterijų reikšmių palyginamumą, nepaisant jų matavimo vienetų skirtumų, duomenys buvo normalizuoti taikant šią formulę:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.11)$$

Čia: x_{ij} – i -osios alternatyvos vertė pagal j -ąjį kriterijų; $\bar{x}_{ij}$ – normalizuota i -osios alternatyvos vertė pagal j -ąjį kriterijų.

- Svertinių normalizuotų reikšmių apskaičiavimas - kiekviena normalizuota reikšmė dauginama iš kriterijaus svorio:

$$v_{ij} = \bar{x}_{ij} W_j \quad (2.12)$$

Čia: v_{ij} – i -osios alternatyvos j -ojo kriterijaus svertinė reikšmė; W_j – kriterijaus j svoris.

- Nustatomi idealūs (v_j^+) ir antiidealūs (v_j^-) sprendiniai:

$$v_j^+ = \max_i v_{ij} \quad (2.13)$$

$$v_j^- = \min_i v_{ij} \quad (2.14)$$

Čia: v_j^+ – idealus sprendinys (geriausias rezultatas pagal j -ąjį kriterijų; v_j^- – anti-idealus sprendinys (blogiausias rezultatas pagal j -ąjį kriterijų).

- Apskaičiuojamas atstumas nuo idealaus (S_i^+) ir anti-idealaus (S_i^-) sprendinio:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad (2.15)$$

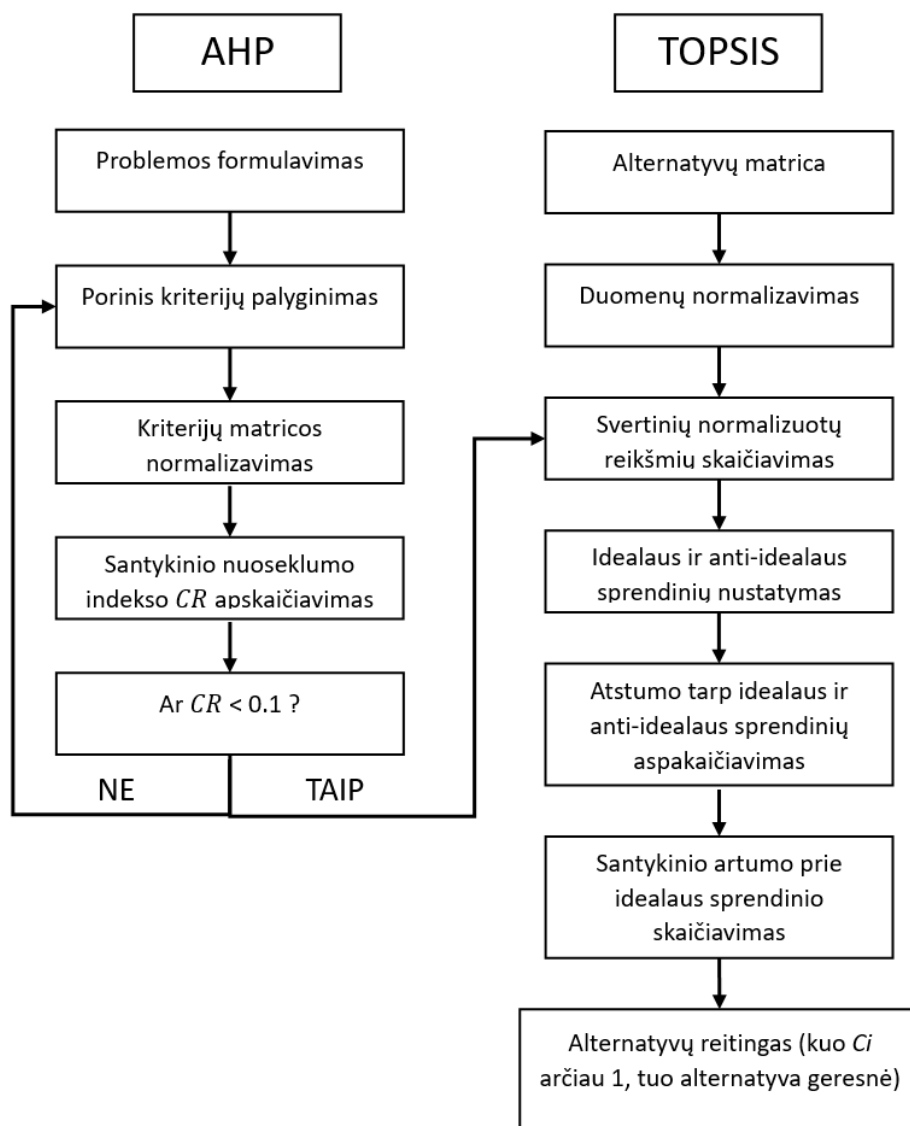
$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad (2.16)$$

Čia: S_i^+ – atstumas iki idealaus sprendinio; S_i^- – atstumas iki anti-idealaus sprendinio.

- Apskaičiuojamas kiekvienos alternatyvos santykinis artumas idealiam sprendiniui:

$$Ci = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (2.17)$$

Čia: Ci – artumo koeficientas (santykinis artumas idealiam sprendiniui).



2.3 pav. AHP-TOPSIS metodo schema (sudaryta autoriaus, remiantis Sharma et al., 2020)

Remiantis TOPSIS rezultatais, galima pagrįstai pasirinkti tinkamiausią sprendimą – kuo C_i artimesnis 1, tuo alternatyva yra geresnė.

2.3 Alternatyvos – lengvieji koviniai sraigtasparniai

Lengvieji koviniai sraigtasparniai NATO šalyse yra itin svarbūs užtikrinant mobilumą, ugnies paramą ir žvalgybos galimybes. Jų universalumas leidžia juos efektyviai naudoti tiek konvenciniuose, tiek asimetriniuose konfliktuose. Šie orlaiviai pasižymi ekonominiu efektyvumu, lengva priežiūra ir gebėjimu greitai vykdyti įvairias kovines užduotis. NATO narės naudoja daugybę skirtingų lengvųjų atakos sraigtasparnių modelių, pritaikytų specifiniams kariniams poreikiams ir misijoms (NATO, 2016a).

Toliau aptariami pagrindiniai lengvųjų atakos sraigtasparnių modeliai ir jų išskirtiniai privalumai. Kiekvienas modelis atspindi skirtingus konstrukcinius ir funkcinius sprendimus,

kurie leidžia juos pritaikyti specifinėms misijoms bei veiklos aplinkybėms. Šie orlaiviai tampa ne tik kariniu, bet ir strateginiu resursu, stiprinančiu NATO šalių gynybinius pajėgumus (NATO, 2016b).

AH-6 „Little Bird“ (žr. 2.4 pav.) – lengvas, itin manevringas atakos sraigtasparnis, pasižymintis gebėjimu veikti sudėtingose aplinkose ir pritaikytas specialiosioms operacijoms, kuriose svarbūs greitis ir tikslumas. Jo kompaktiška konstrukcija užtikrina patikimumą, mažas priežiūros išlaidas ir galimybę veikti ribotose erdvėse. Varomas Rolls-Royce 250-C30R/3M turbovarikliu, AH-6 pasižymi kuro efektyvumu ir ilgesniu veikimo laiku be papildomo kuro papildymo, kas ypač svarbu vykdant operacijas nutolusiose vietovėse. Nesudėtingai modifikuojamas įvairioms užduotims, gali būti aprūpintas kulkosvaidžiais, raketomis ir lazerinėmis taikymosi sistemomis.



2.4 pav. Sraigtasparnis „AH-6 Little Bird“ (Boeing, 2022)

Šis sraigtasparnis yra naudojamas Jungtinėse Amerikos Valstijose, kur atlieka specializuotas misijas. Be JAV, Saudo Arabijos ir Jungtinių Arabų Emyratų ginkluotosios pajėgos jį naudoja kovai su terorizmu, miesto operacijoms ir sudėtingoms užduotims įvairiose aplinkose (Boeing, 2022).

Leonardo AW109 – universalus lengvasis sraigtasparnis, skirtas medicininėms evakuacijoms, ugnies paramai ir žvalgybos operacijoms. Jis gali būti aprūpintas kulkosvaidžiais, raketomis ir stebėjimo įranga, suteikiančia lankstumą taktinėse misijose. Dėl didelio greičio ir manevringumo AW109 dažnai naudojamas NATO pajėgose tiek pratybose, tiek kovinėse operacijose, kur reikalingas greitas atsakas ir situacijos suvokimas (Leonardo Helicopters, 2023).



2.5 pav. Sraigtasparnis „AgustaWestland AW109 TrekkerM” (Leonardo Helicopters, 2023)

AW109 (žr. 2.5 pav.) išsiskiria patvaria konstrukcija ir pažangiomis technologijomis, leidžiančiomis jį pritaikyti sudėtingoms operacijoms. Lengva modifikacija pagal specifinius poreikius užtikrina optimalų panaudojimą NATO kolektyvinėje gynyboje.

Šį sraigtasparnį eksploatuoja Italija, Belgija ir Jungtinė Karalystė – Italijos pajėgos naudoja jį žvalgybai ir paramai, Belgija – gelbėjimo ir humanitarinėms misijoms, o Jungtinė Karalystė – mokymams ir logistikai.

BO105, sukurtas „Messerschmitt-Bölkow-Blohm“ (MBB) – tai lengvas, universalus, dviejų variklių sraigtasparnis, pasižymintis kompaktišku dydžiu ir puikiu manevringumu. Jis pritaikytas žvalgybos, paramos ugnimi ir kovinėms operacijoms, ypač ribotose erdvėse, pavyzdžiui, miestuose.



2.6 pav. Vokietijos ginkluotųjų pajėgų BO105 (Airbus Helicopters, 2017)

BO105 (žr. 2.6 pav.) buvo naudojamas Vokietijoje, Nyderlanduose ir Ispanijoje įvairioms užduotims – nuo žvalgybos ir prieštankinių operacijų iki logistikos ir humanitarinių misijų. Tačiau dėl technologinio pasenimo ir ribotų pajėgumų jo eksploatavimas NATO šalyse

mažėja, nes šalys pereina prie modernesnių sraigtasparnių su pažangesne avionika ir ginkluote (Airbus Helicopters, 2021).

Bell 407GT – lengvasis atakos sraigtasparnis, sukurtas remiantis civiliniu Bell 407 modeliu ir pritaikytas karinėms operacijoms. Jis pasižymi universalumu, modernia avionika ir efektyviu veikimu nepalankiomis sąlygomis. Sraigtasparnis gali būti naudojamas žvalgybai, paramai ugnimi, logistikai ir medicininei evakuacijai, o jo efektyvus kuro suvartojimas ir mažos eksploatacinės sąnaudos leidžia ekonomiškai vykdyti ilgalaikes operacijas.



2.7 pav. Sraigtasparnis BELL 407GT (Airforce Technology, 2018)

Dėl manevringumo ir patikimumo Bell 407GT (žr. 2.7 pav.) yra tinkamas valstybių su ribotais gynybos ištekliais pajėgoms. Tačiau, nors šis modelis gali būti ginkluotas įvairiomis sistemomis, jo naudojimas karinėse operacijose nėra plačiai paplitęs, o integracija į ginkluotąsias pajėgas priklauso nuo konkrečių šalių poreikių (Airforce Technology, 2014).

Šiuo metu Bell 407GT sraigtasparnius naudoja arba užsako tokios šalys kaip Jordanija, Meksika, Indonezija bei Jungtinės Amerikos Valstijos, kurios naudoja šį modelį ribotam specialiųjų operacijų pajėgų poreikiui.

Airbus Helicopters H145M (anksčiau Eurocopter EC145M) – tai militarizuota H145 versija, pasižyminti universalumu ir pritaikomumu įvairioms karinėms misijoms, įskaitant žvalgybą, ginkluotas operacijas, medicininę evakuaciją ir logistinę paramą. Patikima konstrukcija užtikrina našumą net sudėtingomis sąlygomis, o modulinė struktūra leidžia greitai pritaikyti sraigtasparnį specifinėms užduotims (Airbus, 2023).



2.8 pav. Vokietijos ginkluotųjų pajėgų sraigtasparnis H145M (Airbus Helicopters, 2022)

H145M (žr. 2.8 pav.) aprūpintas „Helionix“ avionikos sistema, mažinančia piloto darbo krūvį ir didinančia saugumą sudėtingose operacijose. „HForce“ ginklų sistema suteikia galimybę integruoti kulkosvaidžius, valdomas ir nevaldomas raketas bei prieštankinius ginklus. Balistinė apsauga ir savaime užsidarančios degalų talpos padidina įgulos saugumą. Orlaivyje taip pat įdiegta elektroninė apsaugos sistema, veiksmingai sauganti nuo elektroninės kovos priemonių. Pritaikytas veikti ekstremaliomis sąlygomis, H145M išlieka patikimas tiek standartinėse, tiek specializuotose misijose, prisidedant prie nacionalinio ir tarptautinio saugumo stiprinimo.

Jį eksploatuoja Vokietija, Belgija, Vengrija, Liuksemburgas ir Airija, kur sraigtasparnis pasitelkiamas įvairioms misijoms – nuo žvalgybos ir ginkluotų operacijų iki medicininės evakuacijos ir logistikos.

„Bell OH-58D Kiowa Warrior“ – lengvasis daugiafunkcis sraigtasparnis, skirtas žvalgybai, stebėjimui ir taikinių identifikavimui. Jis aprūpintas elektrooptiniais ir infraraudonųjų spindulių jutikliais, o unikali „Mast-Mounted Sight“ sistema leidžia vykdyti stebėjimą iš už priedangos, sumažinant orlaivio aptikimo riziką.



2.9 pav. Sraigtasparnis OH-58D (US Army, 2015)

OH-58D (žr. 2.9 pav.) buvo plačiai naudojamas JAV kariuomenėje, tačiau vėliau buvo pakeistas modernesniais, tokiais kaip AH-64 Apache ir įvairiais nepilotuojamais orlaiviais. Nepaisant to, šį modelį vis dar eksploatuoja kelios valstybės, įskaitant Kroatiją, Graikiją, Kanadą ir Austriją. Nors kai kurios šalys jį integravo į savo gynybos sistemas, technologinio senėjimo ir modernizacijos poreikis lemia palaipsniui mažėjantį jo naudojimą (Military Factory, 2024).

„SA342M Gazelle” (žr. 2.10 pav.) – lengvas, daugiavfunkcis sraigtasparnis, sukurtas „Aérospatiale“ bendradarbiaujant su „Westland Helicopters“. Jis pritaikytas žvalgybai, stebėjimui, transportui ir ugnies paramai, o moderni avionika ir jutikliai leidžia vykdyti plataus spektro karines operacijas. „Gazelle” gali būti ginkluotas prieštankinėmis raketomis, kulkosvaidžiais ir kita kovine įranga, suteikiančia jam didelį operacinį lankstumą (Army Recognition, 2023).



2.10 pav. Bendrovės *Aérospatiale* sraigtasparnis „SA342M Gazelle” (Gaba, 2001)

Eksplloatuojamas nuo 1970-ųjų, SA342M tebėra Prancūzijos ginkluotųjų pajėgų arsenalo dalis, naudojamas karių transportui, logistikai, žvalgybai ir ugnies paramai. Nors

daugelis operatorių pereina prie modernesnių modelių, šis sraigtasparnis išlieka vertinamas dėl manevringumo, paprastos priežiūros ir mažų eksploatacinių sąnaudų.

2.4 Kriterijai ir ekspertų apklausa

Norint nustatyti vertinimo kriterijų svarbą ir įvertinti kokybinius sraigtasparnių parametrus, 2025 m. sausio–balandžio mėn. buvo atlikta ekspertinė apklausa. Anketos išsiųstos 14 specialistų, gauti 9 atsakymai. Dauguma ekspertų – Lietuvos ir NATO sąjungininkų karinių oro pajėgų sraigtasparnių pilotai, taip pat dalyvavo techninės priežiūros ir operacinio planavimo ekspertai. Jų patirtis sraigtasparnių eksploatacijos ir taktinio panaudojimo srityse siekė nuo kelių iki daugiau nei 20 metų, todėl apklausos duomenys atspindi tiek jaunų, tiek ilgametę praktiką turinčių profesionalų įžvalgas.

Toks ekspertų spektras užtikrino, kad tiek kriterijų reikšmingumas, tiek kokybiniai alternatyvų įverčiai buvo pagrįsti praktine patirtimi ir realiomis taktinėmis sąlygomis. Šie duomenys tapo nuoseklaus ir patikimo daugiakriterinio vertinimo pagrindu. Eksperto anketos šablonas pateiktas A priede.

2.1 lentelė. Tyrimui atrinkti kriterijai

Kriterijai		Paaškinimas
C1	Galios ir svorio santykis	Variklių galia, tenkanti orlaivio svoriui, lemianti manevringumą ir našumą
C2	Naudingoji apkrova	Maksimalus svoris, kurį sraigtasparnis gali gabenti (įgula, krovinys, įranga)
C3	Kreiserinis greitis	Efektyviausias skrydžio greitis, užtikrinantis optimalų nuotolį ir degalų sąnaudas.
C4	Skrydžio laikas	Maksimalus skrydžio laikas be papildomo degalų papildymo
C5	Eksploatacinės sąnaudos	Kaštai, tenkantys vienai skrydžio valandai (kuras, techninė priežiūra, atsarginės dalys)
C6	Ugnies galia	Atakos pajėgumai – ginklų sistemos, raketų integracija
C7	Avionika	Elektronika, jutikliai, duomenų perdavimo sistemos (pvz., <i>Link 16</i>)
C8	Apsauga	Šarvai, raketų nukreipimo priemonės ir kitos orlaivio apsaugos sistemos.
C9	Universalumas	Gebėjimas vykdyti įvairias užduotis (žvalgyba, transportas, MEDEVAC ir kt.)

Vertinimo kriterijai (2.1 lentelė) buvo atrinkti remiantis konsultacijomis su Karinių oro pajėgų atstovais ir ekspertais, turinčiais ilgametės patirties sraigtasparnių eksploatacijos, techninės priežiūros ir kovinio pritaikymo srityse. Konsultacijų metu buvo identifikuoti svarbiausi aspektai, susiję su skrydžio charakteristikomis, techniniais - ekonominiais rodikliais ir kovinėmis savybėmis. Tai leido užtikrinti, kad parinkti kriterijai būtų tiesiogiai susiję su

praktiniais karinių misijų reikalavimais bei atspindėtų realias gynybos sistemos operacines sąlygas.

2.2 lentelė. Atrinktų sraigtasparnių modelių techniniai duomenys (Airbus Helicopters, 2021; Airforce Technology, 2014; Army Recognition, 2023; Boeing, 2022; Leonardo Helicopters, 2023; Military Factory, 2024)

Modelis	Galios ir svorio santykis [kW/kg]	Naudingoji apkrova, [kg]	Maksimalus skrydžio laikas, [min]	Kreiserinis greitis, [kt]	Eksploatacinės sąnaudos, [Eur/h]
AH-6	0.19	~911	~126	135	2000
AW109	0.29	~1500	~180	154	2100
BO105	0.25	~1225	~210	110	2100
407GT	0.22	~1179	~228	133	2100
H145M	0.30	~1700	~215	130	2600
OH-58D	0.19	~480	~120	110	2000
SA342M	0.24	~825	~210	143	2000

2.2 lentelėje pateikti atrinktų lengvųjų kovinių sraigtasparnių techniniai duomenys. Vertės sugrupuotos pagal spalvinį žymėjimą: žalia – 80–100% geriausios reikšmės, geltona – 50–80 %, raudona – mažiau nei 50 %. Toks klasifikavimas leidžia lengviau identifikuoti stipriausias ir silpniausias kiekvieno modelio savybes. Eksploatacinės sąnaudos apskaičiuotos apytiksliai, remiantis prieinama technine informacija ir viešais šaltiniais, atspindinčiais realias naudojimo sąlygas. Vertinant buvo atsižvelgta į variklių skaičių ir tipą, degalų sąnaudas, techninės priežiūros dažnumą. Šis požiūris leido suformuoti pakankamai patikimą ir tarpusavyje palyginamą sąnaudų vertinimą, kuris buvo integruotas į bendrą daugiakriterinę analizę.

2.5 Metodų rezultatų palyginimas ir įvertinimas

Šiame poskyryje aprašomas rezultatų, gautų taikant AHP-TOPSIS ir WASPAS metodus, palyginimas ir jų įvertinimas. Pagrindinis tikslas – nustatyti, ar abiejų metodų taikymas pateikia suderintus ir patikimus rezultatus, taip pat įvertinti jų tinkamumą sprendžiant daugiakriterinius optimizavimo uždavinius. Be to, bus atliekama jautrumo analizė, siekiant įvertinti rezultatų stabilumą esant kriterijų svorių ar metodų parametrų pokyčiams.

Pritaikius abu metodus, visoms septynioms alternatyvoms (sraigtasparniams) bus apskaičiuoti galutiniai įverčiai. Remiantis jais, bus sudaromi reitingai kiekvienam metodui atskirai:

- AHP-TOPSIS metodu skaičiuojami artumo idealiam sprendiniui rodikliai C_j , kurie parodo kiekvienos alternatyvos artumą prie idealiosios alternatyvos.
- WASPAS metodu nustatomas galutinis įvertis Q_{opt} , apskaičiuojamas jungiant WSM ir WPM rezultatus, taikant optimalią λ reikšmę, nustatomą pagal mažiausios dispersijos kriterijų (Zavadskas et al., 2012b).

Gauti reitingai bus lyginami tarpusavyje, siekiant nustatyti jų panašumus ir skirtumus. Reitingų tarpusavio atitikimas bus įvertintas taikant Spearmano koreliacijos koeficientą r_s , kurio reikšmės svyruoja nuo -1 (visiškas neatitikimas) iki 1 (visiškas atitikimas).

Analizės metu kiekvienai alternatyvai bus priskiriamos eiliškumo pozicijos pagal abu metodus, o tuomet apskaičiuojami kiekvienos alternatyvos rangų skirtumai d_i . Šie skirtumai bus pakeliami kvadratu ir sumuojami, o gautasis rezultatas įstatomas į Spearmano formulę:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (2.18)$$

Čia: d_i – kiekvienos alternatyvos reitingų skirtumas; n – alternatyvų skaičius.

Ši formulė leidžia įvertinti, kiek stipriai sutampa alternatyvų išsidėstymas skirtingais metodais. Tai daroma nepriklausomai nuo jų skaitinių įverčių. Koreliacijos analizė suteikia galimybę objektyviai įvertinti metodų rezultatų artumą ir pagrįsti jų suderinamumą sprendimų priėmimo kontekste.

Papildomai koreliacija buvo įvertinta taikant Kendallo rangų atitikties koeficientą τ , kuris skaičiuojamas pagal porinius eiliškumo santykius tarp visų galimų alternatyvų porų. Skaičiavimo principas grindžiamas tuo, ar dviejų metodų sugretintų rangų poros yra suderintos ar nesuderintos (t. y. ar alternatyvų tvarka išlieka tokia pati abiejuose metoduose).

Kendallo formulė:

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (2.19)$$

Čia: n_c – suderintų porų skaičius; n_d – nesuderintų porų skaičius; n – bendras alternatyvų skaičius.

Koeficiento reikšmės taip pat svyruoja nuo -1 iki 1 . Vertė arti 1 rodo stiprų pozicijų atitikimą, 0 – atsitiktinį išsidėstymą, o -1 rodo visišką reitingų inversiją. Šis metodas ypač naudingas tais atvejais, kai svarbu įvertinti rangų nuoseklumą poromis, o ne tik bendrą reitingo išsidėstymą, kaip tai daroma Spearmano metodu.

Papildomai, siekiant įvertinti, ar tarp gautų alternatyvų reitingų egzistuoja statistiškai reikšmingas ryšys, bus taikoma p reikšmių (angl. p -value) analizė. Ši analizė leis nustatyti, ar stebimas koreliacijos koeficientas (tiek Spearmano, tiek Kendallo) galėjo atsirasti atsitiktinai, jei tarp kintamųjų iš tiesų nėra jokio sąryšio (t. y. esant nulinei hipotezei).

Koreliacija bus laikoma statistiškai reikšminga, jeigu apskaičiuota p reikšmė bus mažesnė nei 0,05 – tai reikš, kad tikimybė, jog nustatytas sąryšis atsirado atsitiktinai, yra mažesnė nei 5 %.

Apskaičiuotos p reikšmės leis pagrįsti, ar gauti koreliacijos koeficientai yra statistiškai patikimi, t. y. ar tarp AHP-TOPSIS ir WASPAS metodais gautų alternatyvų reitingų egzistuoja neatsitiktinis ryšys. Tokiu būdu bus galima objektyviai įvertinti metodų rezultatų suderinamumą ir patikimumą sprendimų priėmimo kontekste.

Metodinė analizė remiasi klasikiniiais ranginės koreliacijos skaičiavimo principais, aprašytais statistinėje literatūroje (Zar, 2010), ir plačiai taikoma daugiakriteriniuose tyrimuose (Ginevičius & Podvezko, 2009; Saaty, 2008).

Jautrumo analizė – tai metodas, leidžiantis įvertinti, kaip rezultatų stabilumas priklauso nuo kriterijų svorių pokyčių. Ši analizė ypač svarbi, kai svoriai nustatomi remiantis ekspertiniu vertinimu, nes net ir nedideli jų svyravimai gali lemti reitingų pokyčius (Triantaphyllou & Sánchez, 1997).

Tyrimė taikyta lokali jautrumo analizė, kurios esmė – sistemingai keisti vieno kriterijaus svorį, proporcingai perskirstant likusių kriterijų svorius taip, kad bendra suma liktų lygi 1. Kiekvieno tokio scenarijaus metu perskaičiuojami alternatyvų įverčiai, sudaromi nauji reitingai ir palyginami su pirminiais rezultatais.

Ši analizė leidžia nustatyti, kurie kriterijai turi didžiausią įtaką rezultatų struktūrai, bei ar gauti sprendimai yra stabilūs. Taip pat leidžia įžvelgti, ar kai kurios alternatyvos yra jautresnės nei kitos – t. y. linkusios keisti poziciją net esant mažiems įverčių pokyčiams.

2.6 Antrojo skyriaus išvados

1. Aprašyta vertinimo metodologija apima du daugiakriterinius metodus (AHP-TOPSIS ir WASPAS), jų veikimo principus bei integracijos galimybę sprendimų priėmimo kontekste.
2. Suformuluoti vertinimo kriterijai apima techninius, ekonominius ir kovinius parametrus, parinkti konsultuojantis su Karinių oro pajėgų specialistais.
3. Nustatyti septyni vertinamosios analizės objektai – lengvieji koviniai sraigtasparniai, gaminami NATO šalyse.

4. Ekspertų apklausa leido nustatyti tiek kriterijų svarbą, tiek kokybinius alternatyvų įverčius, remiantis praktine patirtimi.
5. Numatyta atlikti rezultatų koreliacijos ir jautrumo analizę, sprendimų patikimumui ir stabilumui įvertinti.

3. SRAIGTASPARNIŲ MODELIŲ VERTINIMO TYRIMAS

Šiame skyriuje aprašomas baigiamojo magistro darbo tyrimas, kuriame daugiakriterinio sprendimų priėmimo metodais sprendžiamas optimizavimo uždavinys. Tyrimas grindžiamas literatūros analize ir pasirinktų metodų taikymu, siekiant užtikrinti sistemingą ir pagrįstą alternatyvų vertinimą. Skaitiniai skaičiavimai ir gautų rezultatų analizė leidžia objektyviai įvertinti alternatyvų tinkamumą, atsižvelgiant į nustatytus kriterijus. Siekiant padidinti rezultatų aiškumą, taikomi vizualiniai duomenų pateikimo metodai, leidžiantys atskleisti alternatyvų skirtumus ir pagrįsti optimalaus sprendimo pasirinkimą.

3.1 lentelė. Tyrimui atrinktos alternatyvos ir kriterijai (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyvos		Kriterijai	
A1	AH-6	C1	Galios ir svorio santykis
A2	AW109	C2	Naudingoji apkrova
A3	BO105	C3	Kreiserinis greitis
A4	BELL 407GT	C4	Skrydžio laikas
A5	H145M	C5	Ekspluatacinės sąnaudos
A6	OH-58D	C6	Ugnies galia
A7	SA342M	C7	Avionika
		C8	Apsauga
		C9	Universalumas

3.1 WASPAS metodo taikymas sraigtasparnių vertinimui

Šiame poskyryje pateikiamas glaustas rezultatų aprašymas, jų analizė ir pagrindinės išvalgos, taikant WASPAS metodą lengvųjų kovinių sraigtasparnių tinkamumo vertinimui Lietuvos kariuomenei. Tyrimo tikslas – nustatyti, kurie sraigtasparnių modeliai yra optimaliausi atsižvelgiant į Lietuvos kariuomenės poreikius, remiantis daugiakriteriniu sprendimų priėmimu.

Kriterijų sąrašas buvo sudarytas remiantis ekspertine apklausa, kurioje dalyvavo specialistai, turintys patirties sraigtasparnių operacijų, techninių charakteristikų ir karinio

pritaikymo srityse. Taip pat buvo konsultuotasi su Karinių oro pajėgų padaliniais bei analizuota gamintojų pateikta techninė dokumentacija. Tokiu būdu suformuotas vertinimo modelis, apimantis 9 kriterijus ir 7 alternatyvas (sraigasparnių modelius), pateiktas 3.2 lentelėje.

Kokybiniai kriterijai (C6–C9), apimantys ugnies galią, avioniką, apsaugą ir universalumą, buvo vertinami ekspertiniu būdu, naudojant penkiabalę skalę: 1 (labai blogai) – 5 (labai gerai). Galutinės reikšmės buvo apskaičiuotos kaip ekspertinių įvertinimų aritmetiniai vidurkiai. Kiekybiniai kriterijai (C1–C5) nustatyti pagal objektyvius techninius duomenis.

3.2 lentelė. Sraigasparnių vertinimo matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyvos	Kriterijai								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,19	911	126	135	2000	4,33	4,00	3,22	3,78
A2	0,29	1500	180	154	2100	3,56	4,00	4,00	3,56
A3	0,25	1225	210	110	2100	3,11	3,11	3,56	3,22
A4	0,22	1179	228	133	2100	3,56	3,67	3,67	3,56
A5	0,30	1700	215	130	2600	4,11	4,44	4,67	4,44
A6	0,19	480	120	110	2000	3,44	3,56	3,78	3,56
A7	0,24	825	210	143	2000	3,11	2,78	3,22	3,22

Kadangi kriterijų reikšmės buvo išreikštos skirtingais matavimo vienetais, prieš vertinimą buvo atlikta jų normalizacija. Tam, kad būtų galima palyginti duomenis tarpusavyje, reikėjo užtikrinti vienodą jų skalę. Normalizavimo metu buvo atskirti monotoniškai didėjantys naudingumo kriterijai (C1, C2, C3, C4, C6, C7, C8 ir C9) bei kaštų kriterijus C5. Skirtingiems kriterijų tipams taikytos Zavadsko ir kt. (2012) pasiūlytos formulės (2.2) ir (2.3), o gautos normalizuotos reikšmės pateiktos 3.3 lentelėje:

3.3 lentelė. Sraigasparnių vertinimo matrica normalizuotomis vertėmis (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyvos	Kriterijai								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,633	0,536	0,553	0,592	1,000	1,000	0,901	0,690	0,851
A2	0,967	0,882	0,789	0,675	0,952	0,822	0,901	0,857	0,802
A3	0,833	0,721	0,921	0,482	0,952	0,718	0,700	0,762	0,725
A4	0,733	0,694	1,000	1,000	0,952	0,822	0,827	0,786	0,802
A5	1,000	1,000	0,943	0,570	0,769	0,949	1,000	1,000	1,000
A6	0,633	0,282	0,526	0,482	1,000	0,794	0,802	0,809	0,802
A7	0,800	0,485	0,921	0,627	1,000	0,718	0,626	0,690	0,725

Kriterijų reikšmingumas buvo nustatytas remiantis ekspertų apklausa, kurioje dalyvavo 9 ekspertai. Kiekvienas ekspertas įvertino visus 9 kriterijus, skirdamas nuo 0 iki 5 balų pagal jų svarbą sraigtasparnių tinkamumui karinėje aplinkoje. Visi surinkti balai buvo susumuoti, gauti bendri kiekvieno kriterijaus balai pateikti 3.4 lentelėje. Siekiant nustatyti kriterijų svorius, šie balai buvo normalizuoti – kiekvieno kriterijaus balų suma padalyta iš bendros visų kriterijų balų sumos (240), taip gaunant jų santykinus svorius.

Aukščiausius santykinus svorius gavo C6 (ugnies galia) ir C7 (avionika), pabrėžiant jų reikšmę kovinėse užduotyse. Tokia svorių nustatymo tvarka leidžia objektyviau įvertinti ekspertų nuomonę ir užtikrina proporcingą kriterijų įtaką sprendimo priėmimo procese.

3.4 lentelė. Kriterijų svorio matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

VST	Kriterijai								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	3	0	0	0	1
3	2	2	6	4	2	0	2	1	3
4	4	5	2	5	3	5	2	5	3
5	3	2	1	0	1	4	5	3	2
Balai	37	36	31	32	29	40	39	38	33
Svoris	0,117	0,114	0,098	0,102	0,092	0,127	0,124	0,121	0,105

Remiantis normalizuotais duomenimis (3.3 lentelė) ir apskaičiuotais kriterijų svoriais (3.4 lentelė), buvo atliktas alternatyvų vertinimas taikant WASPAS metodą, kuris remiasi dviejų skirtingų vertinimo mechanizmų – svertinės sumos metodo (WSM) ir svertinės sandaugos metodo (WPM) – taikymu bei jų integravimu. Pirmiausia buvo apskaičiuotos WSM reikšmės, kur kiekvienos alternatyvos įvertinimas gaunamas sumuojant visų kriterijų reikšmes, padaugintas iš atitinkamų svorių (žr. 3.5 lentelę). Šis metodas padeda įvertinti bendrą naudingumo lygį, kai visi kriterijai laikomi nepriklausomais.

3.5 lentelė. Svertinės sumos metodo (WSM) matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyvos	Kriterijai									WSM
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	
A1	0,074	0,061	0,054	0,060	0,092	0,127	0,112	0,083	0,089	0,753
A2	0,113	0,100	0,077	0,069	0,088	0,104	0,112	0,104	0,084	0,851
A3	0,097	0,082	0,090	0,049	0,088	0,091	0,087	0,092	0,076	0,753
A4	0,086	0,082	0,098	0,102	0,088	0,104	0,103	0,095	0,084	0,839
A5	0,117	0,114	0,092	0,058	0,070	0,121	0,124	0,121	0,105	0,923
A6	0,074	0,032	0,052	0,049	0,092	0,101	0,099	0,098	0,084	0,681
A7	0,094	0,055	0,090	0,064	0,092	0,091	0,078	0,083	0,076	0,724

Toliau, siekiant patikrinti rezultatų stabilumą ir įtraukti daugiklinį poveikį, buvo taikytas svertinės sandaugos metodas (WPM), kur vertinimai apskaičiuojami kaip kiekvieno kriterijaus normalizuotos reikšmės pakėlimas laipsniu, atitinkančiu kriterijaus svorį, ir gautų sandaugų sudauginimas. Šis metodas dažniau naudojamas situacijose, kur kriterijų tarpusavio sąveika arba proporcinis efektas turi reikšmę.

3.6 lentelėje pateikiami WPM metodo rezultatai, kurių analizė leis toliau atlikti galutinį WASPAS vertinimą, derinant abiejų metodų rezultatus su optimaliu λ koeficientu.

3.6 lentelė. Svertinės sandaugos metodo (WPM) matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyvos	Kriterijai									WPM
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	
A1	0,948	0,931	0,944	0,948	1,000	1,000	0,987	0,956	0,983	0,733
A2	0,996	0,985	0,977	0,961	0,996	0,975	0,987	0,982	0,977	0,847
A3	0,979	0,964	0,992	0,928	0,996	0,959	0,957	0,968	0,967	0,742
A4	0,964	0,959	1,000	1,000	0,996	0,975	0,977	0,971	0,977	0,833
A5	1,000	1,000	0,994	0,944	0,977	0,993	1,000	1,000	1,000	0,910
A6	0,948	0,866	0,939	0,928	1,000	0,971	0,973	0,975	0,977	0,644
A7	0,974	0,921	0,992	0,954	1,000	0,959	0,944	0,956	0,967	0,710

Siekiant padidinti klasifikavimo tikslumą ir sprendimų priėmimo efektyvumą, taikyta apibendrinta formulė (2.6), kurioje WSM ir WPM metodų įtaka derinama naudojant balanso koeficientą λ ($0 \leq \lambda \leq 1$). Tyrime pasirinktos penkios λ reikšmės: 0; 0,25; 0,5; 0,75 ir 1. Optimali λ reikšmė buvo nustatyta remiantis dispersijos minimizavimo principu, užtikrinant rezultatų stabilumą. Galutiniai rezultatai pateikti 3.7 lentelėje.

3.7 lentelė. Galutinis alternatyvų reitingas (sudaryta autoriaus, 2025)

Reitingas	Sraigtasparnis	Balanso koeficientas λ					Q_{opt}	ΔQ	λ_{opt}
		0	0,25	0,5	0,75	1			
1	H145M	0,923	0,920	0,916	0,913	0,910	0,916	0,013	0,515
2	AW109	0,851	0,850	0,849	0,848	0,847	0,849	0,004	0,500
3	407GT	0,839	0,837	0,836	0,834	0,833	0,836	0,006	0,566
4	BO105	0,753	0,750	0,747	0,745	0,742	0,747	0,011	0,518
5	AH-6	0,753	0,748	0,743	0,738	0,733	0,743	0,020	0,500
6	SA342M	0,724	0,720	0,717	0,713	0,710	0,717	0,014	0,529
7	OH-58D	0,681	0,672	0,663	0,653	0,644	0,663	0,037	0,495

WASPAS metodo rezultatai rodo, kad H145M (A5) modelis yra aiškus lyderis, surinkęs aukščiausią Q_{opt} reikšmę – 0,916, nepriklausomai nuo balanso koeficiento λ reikšmės.

Tai rodo puikų šio modelio atitikimą visiems vertinimo kriterijams, ypač pagal ugnies galią (C6), avioniką (C7) ir apsaugą (C8). Nors jo rezultatų nuokrypis ($\Delta Q = 0,013$) nebuvo mažiausias, jis išliko nedidelis, patvirtindamas aukštą stabilumą.

Antroje ir trečioje vietose esantys AW109 (A2) ir Bell 407GT (A4) modeliai taip pat pasirodė stipriai. AW109 pasižymėjo mažiausiu rezultatų svyravimu tarp metodų ($\Delta Q = 0,004$), rodančiu patį stabiliausią vertinimą keičiantis λ reikšmei. Bell 407GT taip pat pasižymėjo nedideliu jautrumu ($\Delta Q = 0,006$) tarp WSM ir WPM komponentų. Abu modeliai įvertinti aukštai pagal kelis prioritetinius kriterijus.

Ketvirtoje ir penktoje vietose esantys BO105 (A3) ir AH-6 (A1) pasiekė vidutinius rezultatus, tačiau jų vertinimų stabilumas buvo mažesnis (ΔQ atitinkamai 0,011 ir 0,020). SA342M (A7) užėmė šestą vietą ($Q_{opt} = 0,717$) su pastebimu nuokrypiu ($\Delta Q = 0,014$). OH-58D (A6) surinko mažiausią Q_{opt} (0,663) ir pasižymėjo didžiausiu vertinimo svyravimu ($\Delta Q = 0,037$), rodančiu žemiausią tinkamumą pagal WASPAS rezultatus.

3.2 AHP-TOPSIS metodo rezultatai

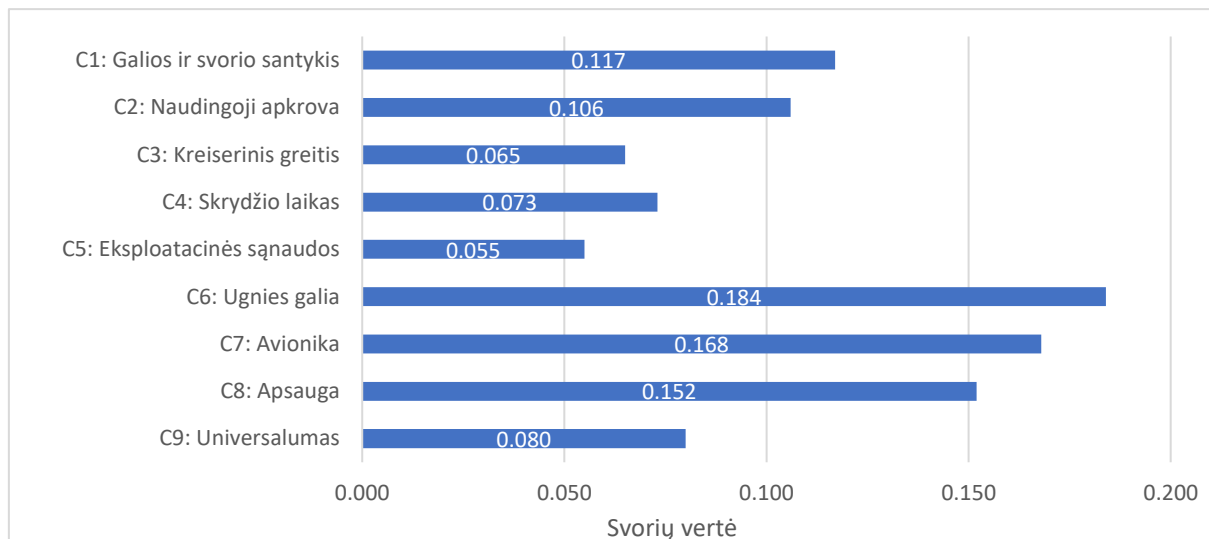
Šiame poskyryje pristatomi tyrimo rezultatai, gauti taikant analitinio hierarchinio proceso (AHP) ir artumo idealiam sprendiniui (TOPSIS) metodus. Remiantis 2 skyriuje aprašyta metodologija, buvo atliktas sraigtasparnių vertinimas pagal nustatytus kriterijus, panaudojant ekspertų apklausos duomenis bei daugiakriterinio vertinimo skaičiavimus.

Ekspertų vertinimais, kiekvienam kriterijui buvo priskirtas svoris taikant porinio palyginimo matricą. Šie duomenys pateikti 3.8 lentelėje – jie sudaro pagrindą kriterijų prioritetų hierarchinei struktūrai ir užtikrina sprendimų priėmimo nuoseklumą vėlesniuose analizės etapuose.

3.8 lentelė. Subendrinta AHP porinio kriterijų palyginimo matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

AHP	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	1,129	2,171	1,525	2,256	0,586	0,531	0,898	1,359
C2	0,883	1	1,737	1,735	1,969	0,576	0,546	0,681	1,277
C3	0,458	0,574	1	0,857	1,133	0,329	0,394	0,516	0,993
C4	0,653	0,574	1,158	1	1,263	0,353	0,632	0,451	0,856
C5	0,443	0,506	0,875	0,789	1	0,364	0,310	0,309	0,687
C6	1,700	1,735	3,057	2,831	2,750	1	1,129	1,169	2,208
C7	1,874	1,822	2,518	1,583	3,211	0,883	1	1,003	2,157
C8	1,197	1,467	1,934	2,215	3,226	0,856	0,989	1	1,796
C9	0,734	0,782	1,004	1,165	1,443	0,451	0,462	0,554	1

Remiantis porinio palyginimo matrica, buvo apskaičiuoti kiekvieno kriterijaus svoriai, atspindintys jų santykinę svarbą sprendimų priėmimo procese. Toliau pateiktoje diagramoje (3.1 pav.) vizualizuojami šie svarbos koeficientai, leidžiantys aiškiai įvertinti, kuriems kriterijams ekspertai skyrė didžiausią reikšmę:



3.1 pav. Santykiniai kriterijų svoriai (AHP) (sudaryta autoriaus, 2025)

Kaip matyti, ekspertai aukščiausius svorius priskyrė C6 (ugnies galia), C7 (avionika) bei C8 (apsauga) kriterijams. Tai rodo, kad vertinime dominavo prioritetai, susiję su koviniu efektyvumu, taktikos įvairove ir įgulų saugumu, o tai visiškai atitinka šiuolaikinės Lietuvos kariuomenės poreikius. Mažiausias svoris suteiktas C5 (eksploatacinėms sąnaudoms), kas rodo, kad ekonominiai veiksniai, nors ir svarbūs, ekspertų buvo laikomi mažiau kritiniais už taktinius ir operacinius parametrus.

3.9 lentelė. Ekspertų porinių palyginimų nuoseklumo rodikliai (sudaryta autoriaus, 2025)

	Eksperto eilės numeris								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
$\lambda_{\max}$	9,803	9,434	9,919	9,171	9,746	9,263	9,607	9,505	9,269
<i>CI</i>	0,100	0,054	0,115	0,021	0,093	0,033	0,076	0,063	0,034
<i>CR</i>	0,069	0,037	0,079	0,015	0,064	0,023	0,052	0,044	0,023

3.9 lentelėje pateikti ekspertų vertinimų nuoseklumo rodikliai – maksimaliosios savosios vertės ($\lambda_{\max}$), nuoseklumo indeksai (*CI*) ir nuoseklumo santykiai (*CR*). Šie rodikliai leidžia įvertinti, kiek nuosekliai ekspertai atliko kriterijų porinius palyginimus. Visų ekspertų *CR* reikšmės neviršija 0,1, todėl jų vertinimai pakankamai nuoseklūs ir tinkami tolesniam AHP metodo taikymui.

Pagal apskaičiuotus svorius buvo sudaryta normalizuota kriterijų matrica, pateikta 3.10 lentelėje. Šioje matricoje atvaizduoti kiekvieno kriterijaus santykiniai svoriai, dar vadinami preferencijos vektoriumi (PV):

3.10 lentelė. Normalizuota AHP porinio kriterijų palyginimo matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

AHP	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	PV
C1	0,112	0,118	0,140	0,111	0,124	0,109	0,089	0,136	0,110	0,117
C2	0,099	0,104	0,112	0,127	0,108	0,107	0,091	0,103	0,104	0,106
C3	0,051	0,060	0,065	0,063	0,062	0,061	0,066	0,078	0,081	0,065
C4	0,073	0,060	0,075	0,073	0,069	0,065	0,105	0,069	0,069	0,073
C5	0,050	0,053	0,057	0,058	0,055	0,067	0,052	0,047	0,056	0,055
C6	0,190	0,181	0,198	0,207	0,151	0,185	0,188	0,178	0,179	0,184
C7	0,210	0,190	0,163	0,116	0,176	0,164	0,167	0,152	0,175	0,168
C8	0,134	0,153	0,125	0,162	0,177	0,159	0,165	0,152	0,156	0,152
C9	0,082	0,082	0,065	0,085	0,079	0,084	0,077	0,084	0,081	0,080

Dominuojantys kriterijai C7 ir C6 turėjo didžiausią įtaką tolesniam sprendimų modeliavimui. Remiantis gautais svoriais ir ekspertiniais įverčiais, buvo parengta TOPSIS metodo normalizuota alternatyvų vertinimo matrica:

3.11 lentelė. Normalizuota TOPSIS alternatyvų vertinimo matrica (sudaryta autoriaus, 2025)

AHP	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	0,295	0,291	0,252	0,388	1,000	0,451	0,410	0,324	0,393
A2	0,450	0,480	0,361	0,442	0,952	0,371	0,410	0,402	0,370
A3	0,388	0,392	0,421	0,316	0,952	0,324	0,319	0,358	0,334
A4	0,342	0,377	0,457	0,382	0,952	0,371	0,376	0,370	0,370
A5	0,466	0,544	0,431	0,373	0,769	0,428	0,455	0,470	0,461
A6	0,295	0,154	0,240	0,316	1,000	0,358	0,365	0,380	0,370
A7	0,373	0,264	0,421	0,411	1,000	0,324	0,285	0,324	0,334

Iš šios lentelės matyti, kad aukščiausius vertinimus dažniausiai surinko A5 ir A2 modeliai, o A6 išsiskyrė žemiausiais kriterijų įverčiais, ypač pagal C2, C3 ir C6 kriterijus.

Vėliau apskaičiuotos idealių ir anti-idealių sprendinių reikšmės:

3.12 lentelė. Idealių ir anti-idealių sprendinių vertės (sudaryta autoriaus, 2025)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
v+	0,055	0,058	0,030	0,032	0,055	0,083	0,076	0,071	0,037
v-	0,035	0,016	0,016	0,023	0,042	0,060	0,048	0,049	0,027

Remiantis 3.12 lentelės duomenimis, nustatyti atstumai iki idealių ir anti-idealių sprendinių bei galutinis artumo rodiklis C_i kiekvienai alternatyvai:

3.13 lentelė. Alternatyvų atstumai nuo idealaus ir anti-idealaus sprendio bei artumo koeficientai C_i (TOPSIS metodas) (sudaryta autoriaus, 2025)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
S+	0,043	0,023	0,044	0,035	0,014	0,056	0,055
S-	0,038	0,050	0,033	0,036	0,064	0,022	0,024
C_i	0,464	0,682	0,427	0,505	0,816	0,277	0,304

Aukščiausią artumo koeficientą ($C_i = 0,816$) pasiekė H145M modelis. Tai rodo, kad šis sraigtasparnis yra artimiausias idealiam sprendiniui, vertinant pagal visus devynis kriterijus. Šio modelio pranašumą nulėmė ypač aukšti įverčiai pagal prioritetinius kriterijus: ugnies galią (C6), avioniką (C7) ir apsaugą (C8). Šie aspektai, kaip parodė ekspertų vertinimai, turėjo didžiausią reikšmę vertinimo procese, todėl H145M rezultatas rodo ne tik jo techninį pranašumą, bet ir didelę atitiktį karinėms užduotims.

Antrąją vietą užėmė AW109 (A2), kurio $C_i = 0,682$, o trečioje pozicijoje – Bell 407GT (A4) su $C_i = 0,505$. Šie sraigtasparnių modeliai taip pat pasižymėjo gerais įverčiais pagal svarbiausius kriterijus, tačiau šiek tiek nusileido lyderiui pagal universalią pajėgumų visumą. AW109 išsiskyrė itin geru įvertinimu pagal skrydžio laiką (C4), o 407GT – pagal kreiserinį greitį (C3) ir avionikos sistemas (C7). Nors šių alternatyvų C_i reikšmės gerokai mažesnės nei A5, jos vis tiek rodo pakankamą atitiktį kariuomenės poreikiams.

Mažiausias C_i vertes gavo SA342M (A7) ir OH-58D (A6) modeliai – atitinkamai 0,304 ir 0,277. Šie rezultatai rodo didelį atotrūkį nuo idealaus sprendinio, o tai reiškia, kad jų parametrai daugelyje kriterijų buvo silpni. OH-58D žemiausius įvertinimus gavo pagal C2 (naudingąją apkrovą), C3 (kreiserinį greitį) ir C6 (ugnies galią), o tai ženkliai paveikė galutinį rezultatą. Šios alternatyvos gali būti laikomos mažiausiai tinkamomis, atsižvelgiant į Lietuvos kariuomenės operacinius prioritetus ir vertintų kriterijų svarbą.

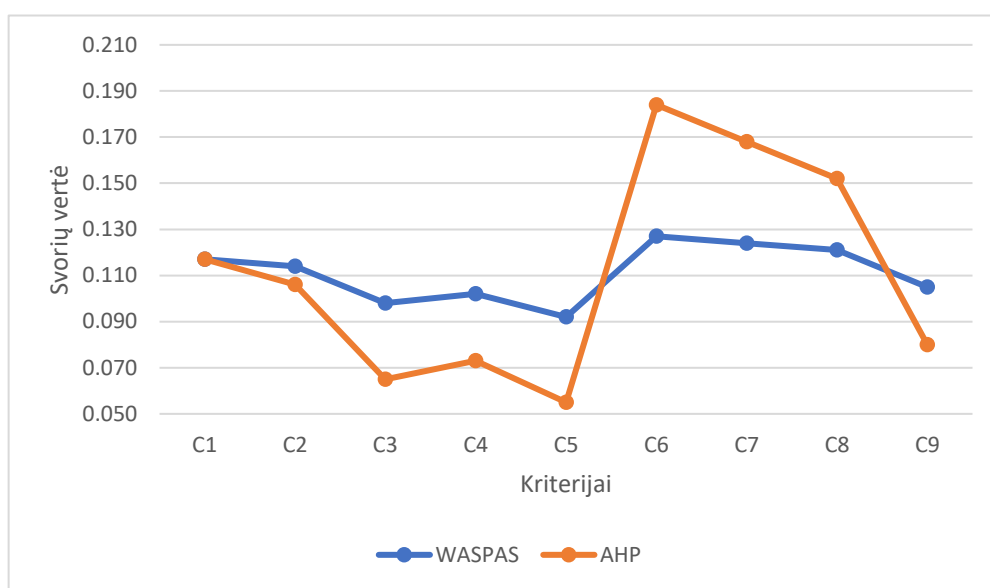
3.3 Daugiakriterinių metodų rezultatų lyginamoji analizė

Šiame poskyryje atliekamas AHP-TOPSIS ir WASPAS metodų rezultatų palyginimas, apimantis kriterijų svorių analizę bei alternatyvų reitingų suderinamumą. Siekiant įvertinti rezultatų artumą ir sprendimo stabilumą, tolesniuose poskyriuose taip pat atliekama reitingų koreliacijos analizė (taikant Spearmano koreliacijos koeficientą ir Kendallo rangų atitikimo

indeksą), bei vykdoma lokali jautrumo analizė, keičiant kriterijų svorius ir vertinant jų įtaką galutiniams sprendimams.

3.3.1 Kriterijų svorių palyginimas

Remiantis atnaujintu grafiku (žr. 3.2 pav.), matyti, kad nors bendros kriterijų svarbos tendencijos taikant AHP-TOPSIS ir WASPAS metodus yra panašios, išryškėja esminių skirtumų tarp jų paskirstytų svorių dydžių. Abu metodai aukščiausią reikšmę suteikė C6 (ugnies galia) ir C7 (avionikos ir komunikacijos sistemų) kriterijams, taip pat aukštai įvertino C8 (apsaugos) kriterijų, tai atspindi ekspertų bendrą sutarimą dėl šių trijų aspektų svarbos kovinių sraigtasparnių kontekste.



3.2 pav. Santykinų kriterijų svorių palyginimas (sudaryta autoriaus, 2025)

Vis dėlto pastebėtina, kad kai kurių kriterijų svoriai skiriasi ne tik absoliučiai, bet ir proporciškai – būtent žemiausią svarbą gavę kriterijai vienoje metodikoje dar labiau nuvertinami kitoje. Pavyzdžiui, C5 (eksploatacinės sąnaudos) WASPAS metodu gavo mažiausią santykinį svorį, tačiau AHP metodu jo svarba yra dar mažesnė. Tokia pati tendencija matyti ir su C3 ar C4 kriterijais. Tuo tarpu aukštą svorį turinčių kriterijų tendencija yra priešinga – AHP metodas suteikia daug didesnius svorius C6, C7 ir C8, palyginti su WASPAS, taip dar labiau išryškindamas jų reikšmę bendrame vertinime.

Šis dėsningumas leidžia daryti prielaidą, kad WASPAS metodas labiau „išlygina“ svorių pasiskirstymą tarp kriterijų, o AHP metodas išryškina kraštutinumus – aiškiau išskiria tiek dominuojančius, tiek mažiau reikšmingus kriterijus. Tai atspindi skirtingą šių metodų logiką: WASPAS remiasi tiesioginiu kriterijų poveikiu, kuris linkęs švelninti vertinimų

skirtumus, o AHP – poriniu santykių balansu, kuris leidžia labiau akcentuoti individualų kriterijaus indėlį.

Toks palyginimas ne tik leidžia įžvelgti ekspertinių vertinimų priklausomybę nuo taikytos metodikos, bet ir parodo, kaip skirtingi metodai gali formuoti skirtingą sprendimo struktūrą. Tai tampa reikšmingu aspektu analizuojant alternatyvų reitingų suderinamumą ir sprendimų jautrumą pasirinktai analitinei kryptčiai.

3.3.2 Alternatyvų reitingų analizė

3.14 lentelėje pateikiami galutiniai alternatyvų įverčiai bei jų eiliškumas, gauti taikant WASPAS ir AHP-TOPSIS metodus. Lyginant reitingus, pastebimas iš dalies suderintas sprendimų pobūdis, ypač kraštutinėse pozicijose.

3.14 lentelė. Galutinių rezultatų palyginimo lentelė WASPAS atžvilgiu (sudaryta autoriaus, 2025)

WASPAS Reitingas	Sraigtasparnis	Q_{opt}	C_i	Sraigtasparnis	TOPSIS Reitingas
1	H145M	0,916	0,816	H145M	1
2	AW109	0,849	0,682	AW109	2
3	407GT	0,836	0,505	407GT	3
4	BO105 ↓	0,747	0,464	AH-6 ↓	4
5	AH-6 ↑	0,743	0,427	BO105 ↑	5
6	SA342M	0,717	0,304	SA342M	6
7	OH-58D	0,663	0,277	OH-58D	7

Abiejų taikytų metodų analizė parodė aiškų alternatyvos H145M dominavimą. Ši alternatyva gavo aukščiausius įverčius tiek pagal WASPAS metodą ($Q_{opt} = 0,916$), tiek pagal AHP-TOPSIS ($C_i = 0,816$), tai leidžia teigti, jog H145M yra tinkamiausias pasirinkimas pagal ekspertų nustatytus vertinimo kriterijus.

AW109 (A2) abiejų metodų reitinguose užėmė antrąją vietą, taip pat turėdamas gana aukštus įverčius tiek $Q_{opt} = 0,849$, tiek $C_i = 0,682$. Tai rodo, kad šios dvi alternatyvos – H145M ir AW109 – yra laikomos patikimiausiais pasirinkimais nepriklausomai nuo taikomo vertinimo metodo.

Trečioje vietoje abiejų metodų reitinguose išlieka BELL 407GT ($Q_{opt} = 0,836$, $C_i = 0,505$). Šis rezultatas leidžia priskirti BELL 407GT vidutinės vertės alternatyvoms, kurios, nors ir nenusileidžia esminiais parametrais, nežymiai atsilieka nuo lyderiaujančių sprendimų.

Ketvirtoje ir penktoje vietose matome vietų apsikėitimą tarp BO105 (A3) ir AH-6 (A1), kas rodo skirtingą jautrumą kriterijų svoriams bei metodų specifiką. AH-6 geriau įvertintas pagal TOPSIS, o BO105 – pagal WASPAS.

Šeštoje vietoje SA342M (A6) turi labai artimus įverčius abiejuose metoduose – $Q_{opt} = 0,717$, $C_i = 0,304$, kas rodo nuosaikų ir nuoseklų vertinimą.

Abi metodikos paskutinę vietą skyrė OH-58D (A7) – $Q_{opt} = 0,663$, $C_i = 0,277$. Tai yra ryškus abiejų metodų sutapimas ir stiprus signalas apie šios alternatyvos netinkamumą šio vertinimo kontekste. Toks pastovumas abiejų metodų reitinguose leidžia daryti prielaidą, kad ši alternatyva pasižymi vidutiniais parametrais daugelyje kriterijų, tačiau jai trūksta stipresnių savybių, kurios leistų pakilti aukštesnėse pozicijose.

Apibendrinant, galima daryti išvadą, kad tiek AHP-TOPSIS, tiek WASPAS metodai pateikia labai panašius rezultatus, ypač aukščiausiose ir žemiausiose pozicijose. Vidurinėje dalyje skirtumai yra minimalūs ir paaiškinami skirtingais kriterijų svorio integravimo mechanizmais. Siekiant išsamesnės analizės, būtina atlikti koreliacijos ir jautrumo analizę.

3.3.3 Reitingų koreliacijos vertinimas

Alternatyvų reitingų suderinamumui tarp WASPAS ir AHP-TOPSIS metodų įvertinti buvo atlikta reitingų koreliacijos analizė, taikant Spearmano ir Kendallo koeficientus.

Spearmano koreliacijos koeficientas tarp abiejų metodų reitingų sudarė $r_s = 0,9643$, o tai rodo labai stiprų teigiamą monotonišką ryšį tarp gautų rezultatų. Šis rezultatas papildomai įvertintas statistinio reikšmingumo požiūriu – gauta $p \approx 0,0003$. Kadangi ši reikšmė yra mažesnė nei 0,05, galima teigti, kad stebima koreliacija yra statistiškai reikšminga, t. y. reitingų panašumas nėra atsitiktinis.

3.15 lentelė. Reitingų skirtumų kvadratai Spearmano koeficientui apskaičiuoti (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyva	WASPAS reitingas	TOPSIS reitingas	d_i	d_i^2
H145M	1	1	0	0
AW109	2	2	0	0
407GT	3	3	0	0
BO105	4	5	-1	1
AH-6	5	4	1	1
SA342M	6	6	0	0
OH-58D	7	7	0	0
Suma	–	–	–	2

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \cdot 2}{7(7^2 - 1)} = 1 - \frac{12}{336} = 1 - 0,0357 = 0,9643$$

Atlikta Kendallo koeficiento analizė, kuri įvertina reitingų porų suderinamumą. Gautas $\tau \approx 0,9048$, tai taip pat indikuoja stiprų teigiamą sąryšį. Statistinis reikšmingumas $p \approx 0,0028$ rodo, kad ir šis rezultatas yra statistiškai reikšmingas ($p < 0,05$).

Abu gauti koeficientai rodo, kad alternatyvų reitingai, nustatyti taikant skirtingus daugiakriterinius vertinimo metodus, yra tarpusavyje glaudžiai susiję ir vienas kitą patvirtina.

3.16 lentelė. Reitingų porų suderinamumas pagal Kendallo analizę (sudaryta autoriaus, 2025)

Eil. Nr.	Pora	WASPAS skirtumas	TOPSIS skirtumas	Suderinamumas	Eil. Nr.	Pora	WASPAS skirtumas	TOPSIS skirtumas	Suderinamumas
1	H145M	-1	-1	Suderinta	12	407GT	-1	-2	Suderinta
	AW109					BO105			
2	H145M	-2	-2	Suderinta	13	407GT	-2	-1	Suderinta
	407GT					AH-6			
3	H145M	-3	-4	Suderinta	14	407GT	-3	-3	Suderinta
	BO105					SA342M			
4	H145M	-4	-3	Suderinta	15	407GT	-4	-4	Suderinta
	AH-6					OH-58D			
5	H145M	-5	-5	Suderinta	16	BO105	-1	1	Nesuderinta
	SA342M					AH-6			
6	H145M	-6	-6	Suderinta	17	BO105	-2	-1	Suderinta
	OH-58D					SA342M			
7	AW109	-1	-1	Suderinta	18	BO105	-3	-2	Suderinta
	407GT					OH-58D			
8	AW109	-2	-3	Suderinta	19	AH-6	-1	-2	Suderinta
	BO105					SA342M			
9	AW109	-3	-2	Suderinta	20	AH-6	-2	-3	Suderinta
	AH-6					OH-58D			
10	AW109	-4	-4	Suderinta	21	SA342M	-1	-1	Suderinta
	SA342M					OH-58D			
11	AW109	-5	-5	Suderinta					
	OH-58D								

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\frac{1}{2}n(n-1)} = \frac{20 - 1}{\frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 6} = \frac{19}{21} \approx 0,9048$$

Šie rezultatai leidžia daryti išvadą, kad taikytų metodų sprendimai yra suderinami ir pagrįsti, o tarp jų nustatyta koreliacija nėra atsitiktinė, bet grindžiama nuosekliai taikyta vertinimo metodika bei kriterijų sistema.

3.3.4 Rezultatų jautrumo analizė esant kriterijų svorių pokyčiams

Atliekant jautrumo analizę, buvo siekiama įvertinti, kaip kriterijų svorių pokyčiai gali paveikti galutinius alternatyvų įverčius ir jų reitingus, taikant WASPAS ir AHP-TOPSIS daugiakriterinio vertinimo metodus. Tai leidžia nustatyti, ar sprendimai yra stabilūs, ar priklauso nuo tikslų ekspertinių svorių. Kadangi kriterijų reikšmingumas buvo nustatytas ekspertiniu būdu, remiantis subjektyviu vertinimu, net ir nedideli svorių pokyčiai gali turėti įtakos sprendimo rezultatams. Todėl ši analizė yra būtina vertinant sprendimų patikimumą ir jautrumą.

Tyrimo metu taikyta lokali jautrumo analizė, kurios metu vieno kriterijaus svoris buvo padidintas arba sumažintas 20 % nuo pradinės reikšmės, o kitų kriterijų svoriai buvo proporcingai perskaičiuojami, kad bendra suma liktų lygi 1. Po kiekvieno svorio keitimo buvo iš naujo apskaičiuojami alternatyvų įverčiai bei sudaromi atnaujinti reitingai, kurie buvo lyginami su pirminiu vertinimu pagal abiejų metodų rezultatus.

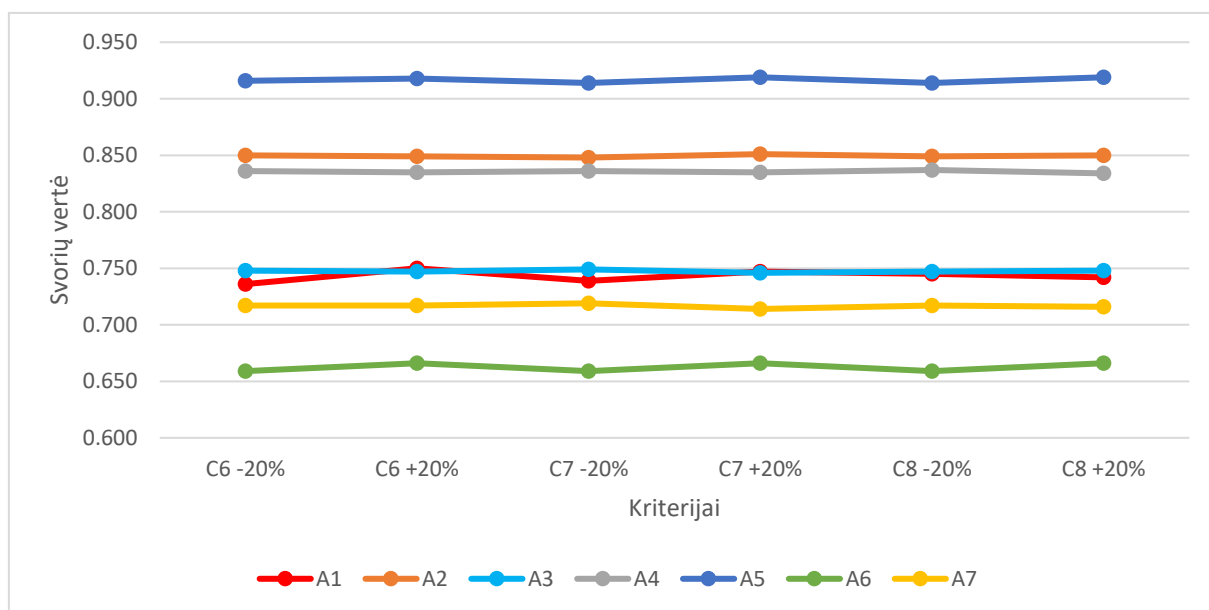
Analizei pasirinkti trys kriterijai: C6 (ugnies galia), C7 (avionika) ir C8 (apsauga). C6 ir C7 kriterijai buvo pasirinkti todėl, kad jie gavo aukščiausius svorius abiejuose methoduose – tiek AHP, tiek WASPAS – ir turėjo reikšmingą įtaką alternatyvų reitingams. C8 kriterijus, nors ir nebuvo dominuojantis, yra strategiškai svarbus kariniame kontekste, todėl jo svorio keitimo įtaka buvo analizuota kaip papildomas stabilumo testas. Tai leido įvertinti, kiek reitingai yra jautrūs ne tik dominuojantiems, bet ir antraeilams, tačiau reikšmingiems kriterijams.

3.17 lentelė. Optimalūs galutiniai įverčiai Q_{opt} , keičiant svarbiausių kriterijų svorius (WASPAS) (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyva	C6 -20%	C6 +20%	C7 -20%	C7 +20%	C8 -20%	C8 +20%
A1	0,736	0,750	0,739	0,747	0,745	0,742
A2	0,850	0,849	0,848	0,851	0,849	0,850
A3	0,748	0,747	0,749	0,746	0,747	0,748
A4	0,836	0,835	0,836	0,835	0,837	0,834
A5	0,916	0,918	0,914	0,919	0,914	0,919
A6	0,659	0,666	0,659	0,666	0,659	0,666
A7	0,717	0,717	0,719	0,714	0,717	0,716

Remiantis 3.17 lentele matyti, kad labiausiai pokyčiams jautrus yra sraigtasparnis AH-6 (A1), kurio Q_{opt} reikšmė svyravo nuo 0,736 iki 0,750. Taip pat nežymūs svyravimai stebėti BO105 (A3) ir SA342M (A7) atveju. Tuo tarpu AW109 (A2), H145M (A5) ir 407GT (A4)

vertinimai išliko itin stabilūs visose analizės konfigūracijose. Tai rodo, kad šių modelių vertinimas yra atsparus kriterijų svorių pokyčiams, o sprendimai – patikimi net esant ekspertinių įverčių netikslumams.



3.3 pav. Optimalių galutinių įverčių Q_{opt} reikšmės keičiant kriterijų svorius (WASPAS metodas) (sudaryta autoriaus, 2025)

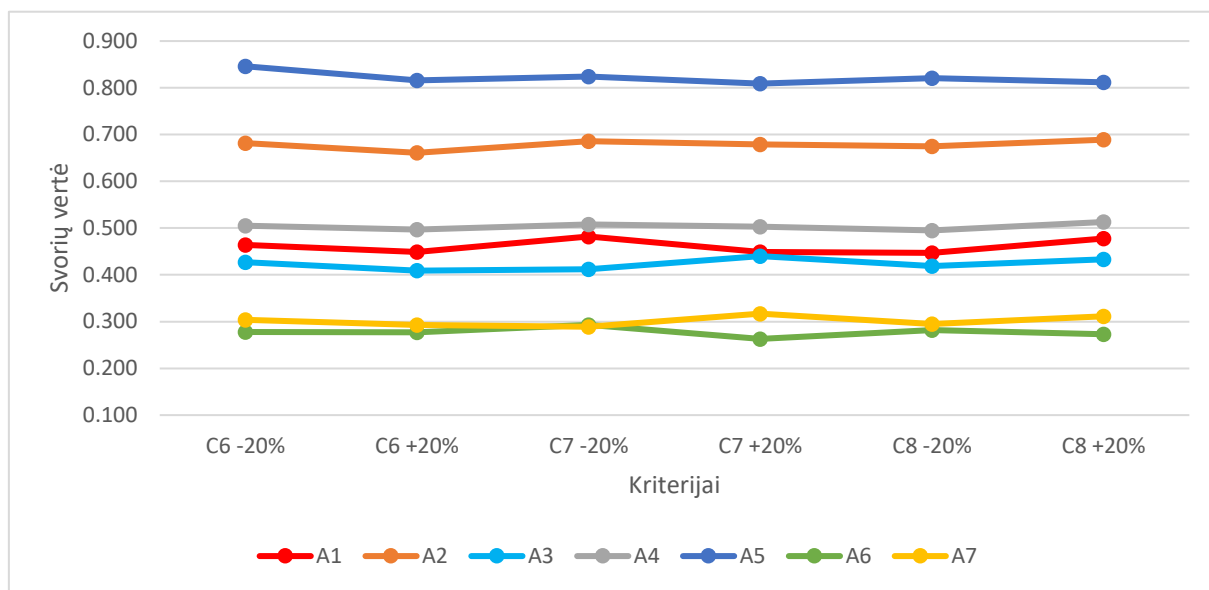
3.3 pav. iliustruoja alternatyvų optimalių galutinių įverčių Q_{opt} svyravimus priklausomai nuo C6–C8 kriterijų svorio. Pastebima, kad H145M (A5) išlieka dominuojantis visose situacijose, o reikšmingų pokyčių pasitaiko tik mažesnę įvertinimą gavusių alternatyvų grupėje.

3.18 lentelė. Artumo koeficientų C_i reikšmės keičiant svarbiausių kriterijų svorius (AHP-TOPSIS metodas) (sudaryta autoriaus, 2025)

Alternatyva	C6 -20%	C6 +20%	C7 -20%	C7 +20%	C8 -20%	C8 +20%
A1	0,464	0,449	0,482	0,449	0,447	0,478
A2	0,682	0,661	0,686	0,679	0,675	0,689
A3	0,427	0,409	0,412	0,440	0,419	0,433
A4	0,505	0,497	0,508	0,503	0,495	0,513
A5	0,846	0,816	0,824	0,809	0,821	0,812
A6	0,278	0,277	0,293	0,263	0,282	0,273
A7	0,304	0,293	0,289	0,317	0,295	0,311

Vertinant AHP-TOPSIS metodo rezultatus (3.19 lentelė), matyti, kad C_i reikšmių pokyčiai yra šiek tiek didesni nei taikant WASPAS metodą. Pavyzdžiui, AH-6 (A1) C_i reikšmė

svyravo nuo 0,390 iki 0,445, o tai reiškia gana ryškia įtaką rezultatui keičiant tik vieną kriterijų. Tokios tendencijos gali rodyti didesnę metodo jautrumą pradinių svorių patikimumui.



3.4 pav. Artumo koeficientų C_i reikšmės keičiant kriterijų svorius (AHP-TOPSIS metodas) (sudaryta autoriaus, 2025)

3.4 pav. aiškiai iliustruoja, kad H145M (A5) išlieka stabiliausiai vertinama alternatyva, nepriklausomai nuo kriterijų svorių pokyčių – jos artumo prie idealaus sprendimo koeficientas (C_i) svyruoja nežymiai, o kreivė grafike išlieka beveik horizontali. Tokia elgsena rodo šios alternatyvos dominavimą ir sprendimo patikimumą.

Priešingai, alternatyvos A1 (AH-6) ir A3 (BO105) rodo didesnę jautrumą kriterijų C6, C7 ar C8 pokyčiams – jų C_i reikšmės kinta labiau, o kreivės pasižymi didesne dinamika. Šie svyravimai atskleidžia, kad jų vertinimas yra labiau priklausomas nuo specifinių prioritetų, o tai gali turėti reikšmės sprendimų stabilumui kintant kontekstinėms sąlygoms ar ekspertiniams vertinimams.

Be to, SA342M (A6) ir OH-58D (A7), nepaisant žemiausių bazių įverčių, parodė taip pat padidėjusį jautrumą – esant tam tikram scenarijui (C7 –20 %) jos netgi apsieičia vietomis. Toks elgesys patvirtina, kad net žemesnėse reitingų pozicijose būtina įvertinti galimus vertinimo pokyčius keičiantis kriterijų svarbai.

Apibendrinant galima teigti, kad tiek WASPAS, tiek AHP-TOPSIS metodai užtikrina sprendimų stabilumą, ypač vertinant aukščiausio reitingo alternatyvas. Šios alternatyvos išlieka lyderių pozicijose net ir keičiantis kriterijų svoriams. Vis dėlto, AHP-TOPSIS metodas pasirodė jautresnis vertinant vidutinio ar žemo įvertinimo modelius, tai iš dalies lemia didesni svoriai,

priskiriami prioritetiniams kriterijams. Tai patvirtina jautrumo analizės svarbą ir būtinybę taikyti kelių metodų derinius siekiant sprendimų patikimumo kintančiomis sąlygomis.

3.4 Trečiojo skyriaus išvados

1. Taikant WASPAS ir AHP-TOPSIS metodus, įvertintos septynios lengvųjų kovinių sraigtasparnių alternatyvos pagal devynis ekspertų nustatytus kriterijus, leidžiančius sistemingai ir objektyviai įvertinti jų tinkamumą Lietuvos kariuomenės poreikiams.
2. Abiejų metodų rezultatai parodė aukštą suderinamumą – H145M ir AW109 modeliai užėmė pirmąsias pozicijas nepriklausomai nuo vertinimo būdo, o mažiausiai tinkama alternatyva abiem atvejais pripažinta OH-58D.
3. Spearmano ir Kendallo koreliacijos analizė parodė statistiškai reikšmingą abiem metodais gautų reitingų tarpusavio ryšį, patvirtinantį jų suderinamumą ir vertinimo rezultatų patikimumą.
4. Jautrumo analizė parodė, kad vertinimo rezultatai išlieka stabilūs, tačiau AHP-TOPSIS metodas pasižymėjo didesniu jautrumu dėl prioritetiniams kriterijams suteikto didesnio svorio.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikta mokslinės literatūros analizė parodė, kad daugiakriteriniai sprendimų priėmimo metodai sėkmingai taikomi karinės aviacijos srityje įvairiose šalyse. Tai patvirtina pasirinkto metodologinio požiūrio aktualumą ir Lietuvos kariuomenės kontekste.
2. Lietuvos kariuomenės poreikių kontekste identifikuoti devyni kriterijai, apimantys techninius (galios ir svorio santykis, naudingoji apkrova, kreiserinis greitis, skrydžio trukmė), ekonominius (eksploatacinės sąnaudos) ir kovinius (ugnies galia, avionika, apsauga, universalumas) aspektus.
3. AHP-TOPSIS ir WASPAS metodų taikymas parodė rezultatų suderinamumą: daugumos alternatyvų reitingai sutapo, o nedideli skirtumai tarp BO105 ir AH-6 neturėjo esminės įtakos bendram rezultatų nuoseklumui. Reitingų koreliacijos analizė parodė statistiškai reikšmingą atitikimą: Spearmano $r_s = 0,9643$ ($p < 0,001$), Kendallo $\tau = 0,9048$ ($p < 0,005$), patvirtinant vertinimo nuoseklumą ir abiejų metodų patikimumą.
4. Apibendrinant tyrimo rezultatus, galima teigti, jog Lietuvos kariuomenei rekomenduotina svarstyti H145M įsigijimą, siekiant užpildyti kovinės paramos sraigtasparnių spragą. Šio modelio pranašumai leidžia prognozuoti, kad jis reikšmingai sustiprintų nacionalinius gynybos pajėgumus: padidintų kariuomenės mobilumą, ugnies paramą ir reagavimo greitį į įvairias grėsmes.
5. Atsižvelgiant į tyrimo ribotumus, galima teigti, kad nors vertinimo modelis remiasi ekspertų nuomone, patikimais šaltiniais ir pripažintais daugiakriteriniais metodais, jo rezultatai priklauso nuo kelių veiksnių. Tarp jų – pasirinktų kriterijų interpretacija, ribotas analizuojamų alternatyvų skaičius, kai kurios metodologinės prielaidos ir informacijos prieinamumas. Ypač svarbu pažymėti, kad eksploatacinių kaštų vertinimas gali būti netikslus dėl ribotos viešai prieinamos informacijos. Todėl tyrimo išvados turėtų būti vertinamos kaip pagrįsta, bet preliminarinė rekomendacija, o galutinis sprendimas turėtų būti priimamas įvertinus ir kitus – operacinius, logistinius bei finansinius – veiksnius.
6. Tolesniuose tyrimuose siūloma taikyti scenarijų analizę, siekiant įvertinti sraigtasparnių tinkamumą esant skirtingoms operacinėms situacijoms. Rekomenduojama atlikti ir gyvavimo ciklo kaštų bei naudos ir kaštų analizę, kad būtų galima įvertinti sprendimo ekonominį pagrįstumą. Taip pat būtų naudinga įvertinti pasirinktų modelių integracijos galimybes į esamą logistikos, techninės priežiūros ir valdymo infrastruktūrą, atsižvelgiant į suderinamumą su kariuomenės turimais resursais.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Agrawal, N. (2022). Multi-criteria decision-making toward supplier selection: exploration of PROMETHEE II method. *Benchmarking: An International Journal*, 29(7), 2122–2146. <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2021-0071>
- Airbus. (2023). *H145M Multi-Role Military Helicopter*. https://mediaassets.airbus.com/pm_38_379_379465-e8uwgvvqky.pdf
- Airbus Helicopters. (2021). *50 Years of BO105*. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-a-pioneer-of-modern-helicopter-technology-the-bo105-celebrates-its>
- Airbus Helicopters. (2022). *H145M Military Helicopter*. Airbus Helicopters Official Website. <https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/defence/h145m>
- Airforce Technology. (2014). *Bell 407GT Helicopter - Airforce Technology*. <https://www.airforce-technology.com/projects/bell-407gt-helicopter-us/>
- Al-Harbi, K. M. A.-S. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19(1), 19–27. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1)
- Amorim, M., Antunes, F., Ferreira, S., & Couto, A. (2019). An integrated approach for strategic and tactical decisions for the emergency medical service: Exploring optimization and metamodel-based simulation for vehicle location. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106057. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106057>
- Andrii, D., Zarina, P., Oleh, S., Olena, P., & Dmytro, R. (2024). *Management of Transport and Logistics Systems: Problems Under Conditions of Military Operations* (pp. 363–373). https://doi.org/10.1007/978-3-031-67444-0_35
- Army Recognition. (2023). *SA342 Gazelle*. <https://www.armyrecognition.com/military-products/air/helicopters/attack-helicopters/sa342-gazelle>
- Arslan, Ö., & Cebi, S. (2024). A novel approach for multi-criteria decision making: Extending the WASPAS method using decomposed fuzzy sets. *Computers & Industrial Engineering*, 196, 110461. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110461>
- Baydaş, M., & Elma, O. E. (2021). An objective criteria proposal for the comparison of MCDM and weighting methods in financial performance measurement: An application in Borsa Istanbul. *Decision Making: Applications in Management and*

- Engineering*, 4(2), 257–279. <https://doi.org/10.31181/dmame210402257b>
- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Bhaskar, A. S., & Khan, A. (2022). Comparative analysis of hybrid MCDM methods in material selection for dental applications. *Expert Systems with Applications*, 209, 118268. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118268>
- Boeing. (2022). *AH-6 Light Attack Helicopter*. <https://www.boeing.com/defense/ah-6-light-attack-helicopter>
- Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press. <https://web.stanford.edu/~boyd/cvxbook/>
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method. *Management Science*, 31(6), 647–656.
- Dağistanlı, H. A., Altundaş, A., Kurtay, K. G., & Gökmen, Y. (2024). The Optimization of Long-Term Dynamic Defense Industry Project Portfolio Management with a Mixed and Holistic Project Prioritization Approach. *Dynamic Games and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s13235-024-00602-6>
- de Assis, G. S., dos Santos, M., & Babilio, M. P. (2023a). Use of the WASPAS Method to Select Suitable Helicopters for Aerial Activity Carried Out by the Military Police of the State of Rio de Janeiro. *Axioms*, 12(1), 77. <https://doi.org/10.3390/axioms12010077>
- de Assis, G. S., dos Santos, M., & Babilio, M. P. (2023b). Use of the WASPAS Method to Select Suitable Helicopters for Aerial Activity Carried Out by the Military Police of the State of Rio de Janeiro. *Axioms*, 12(1), 77. <https://doi.org/10.3390/axioms12010077>
- Deb, K. (2001). *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Multi+Objective+Optimization+using+Evolutionary+Algorithms-p-9780471873396>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>

- Deb, K., Sindhya, K., & Hakanen, J. (2016). Multi-objective optimization. In S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira (Eds.), *Multi-objective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Taylor & Francis.
- Debreu, G. (1959). *Theory of Value: An Axiomatic Analysis of Economic Equilibrium*. Yale University Press.
- Dehe, B., & Bamford, D. (2015). Development, test and comparison of two Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) models: A case of healthcare infrastructure location. *Expert Systems with Applications*, 42(19), 6717–6727. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.059>
- Dyer, J. S. (1990). Remarks on the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 36(3), 249–258. <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.3.249>
- Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The Analytic Hierarchy Process—An Exposition. *Operations Research*, 49(4), 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
- Gan, Q. (2022). A logistics distribution route optimization model based on hybrid intelligent algorithm and its application. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04854-6>
- Ginevičius, R., & Podvezko, V. (2009). Evaluating the Changes in Economic and Social Development of Lithuanian Counties by Multiple Criteria Methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 15(3), 418–436. <https://doi.org/10.3846/1392-8619.2009.15.418-436>
- Goetghebeur, M. M., Wagner, M., Khoury, H., Levitt, R. J., Erickson, L. J., & Rindress, D. (2012). Bridging Health Technology Assessment (HTA) and Efficient Health Care Decision Making with Multicriteria Decision Analysis (MCDA). *Medical Decision Making*, 32(2), 376–388. <https://doi.org/10.1177/0272989X11416870>
- Gul, M., Celik, E., Gumus, A. T., & Guneri, A. F. (2018). A fuzzy logic based PROMETHEE method for material selection problems. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.07.002>
- Handayani, N., Heriyani, N., Septian, F., & Alexander, A. D. (2023). Multi-Criteria Decision Making Using The Waspa Method For Online English Course Selection. *Jurnal Teknoinfo*, 17(1), 260. <https://doi.org/10.33365/jti.v17i1.2371>
- Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in

- environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment*, 409(19), 3578–3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- Jagtap, M., & Karande, P. (2023). The m-polar fuzzy ELECTRE-I integrated AHP approach for selection of non-traditional machining processes. *Cogent Engineering*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2181737>
- Karaburun, M. F., & Alaykiran, K. (2018). Weapon Selection Problem With AHP And TOPSIS Methods In Multi Criteria Decision Making. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 5(5), 48–52. https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0505022.pdf
- Koopmans, T. C. (1951). *Activity analysis of production and allocation*. Wiley.
- Leonardo Helicopters. (2023). *AW109 GrandNew - Commercial and Civil Helicopters | Leonardo - Helicopters*. <https://helicopters.leonardo.com/en/products/grandnew-1>
- Linkov, I., & Moberg, E. (2011). *Multi-criteria decision analysis: Environmental applications and case studies*. CRC Press.
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Jusoh, A., & Nor, K. M. (2015). Multiple Criteria Decision-Making Techniques In Transportation Systems: A Systematic Review Of The State Of The Art Literature. *TRANSPORT*, 31(3), 359–385. <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1121517>
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Military Factory. (2024). *Bell OH-58 Kiowa Armed Scout and Reconnaissance / Light Attack Helicopter*. https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.php?aircraft_id=1
- Mohamadghasemi, A., Hadi-Vencheh, A., Lotfi, F. H., & Khalilzadeh, M. (2020). An integrated group FWA-ELECTRE III approach based on interval type-2 fuzzy sets for solving the MCDM problems using limit distance mean. *Complex & Intelligent*

Systems, 6(2), 355–389. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00130-x>

- Moreira, M. Â. L., de Araújo Costa, I. P., Pereira, M. T., dos Santos, M., Gomes, C. F. S., & Muradas, F. M. (2021). PROMETHEE-SAPEVO-M1 a Hybrid Approach Based on Ordinal and Cardinal Inputs: Multi-Criteria Evaluation of Helicopters to Support Brazilian Navy Operations. *Algorithms*, 14(5), 140. <https://doi.org/10.3390/a14050140>
- NATO. (2016a). *ATP-49: Use of Helicopters in Land Operations*.
- NATO. (2016b). *NATO Standard AJP-3.3 Allied Joint Doctrine For Air And Space Operations Edition B Version 1*.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- Pareto, V. (1896). *Cours d'économie politique*. Rouge.
- Petrošius, J. (2018). *Sraigtasparnių pritaikymo Specialiųjų operacijų pajėgoms modelių lyginamoji analizė*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Antano Gustaičio aviacijos institutas.
- Radomska-Zalas, A. (2023). Application of the WASPAS method in a selected technological process. *Procedia Computer Science*, 225, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.002>
- Rane, N., Achari, A., & Choudhary, S. (2023). Multi-Criteria Decision-Making (Mcdm) As A Powerful Tool For Sustainable Development: Effective Applications Of Ahp, Fahp, Topsis, Electre, And Vikor In Sustainability. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. <https://doi.org/10.56726/IRJMETs36215>
- Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: Theory and practice* (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>
- Reddy, Brian. P., Thokala, P., Iliff, A., Warhurst, K., Chambers, H., Bowker, L., Walters, S. J., Duenas, A., & Kelly, M. P. (2016). Using MCDA to generate and interpret evidence to inform local government investment in public health. *EURO Journal on Decision Processes*, 4(3–4), 161–181. <https://doi.org/10.1007/s40070-016-0059-3>
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue Française d'informatique et de Recherche Opérationnelle*, 2(8), 57–75.

<https://doi.org/10.1051/ro/196802V100571>

- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sánchez-Lozano, J. M., & Rodríguez, O. N. (2020). Application of Fuzzy Reference Ideal Method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing*, 88, 106061. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106061>
- Sharma, D., Sridhar, S., & Claudio, D. (2020). Comparison of AHP-TOPSIS and AHP-AHP methods in multi-criteria decision-making problems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 34(2), 203. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.105291>
- Shih, H.-S., Shyr, H.-J., & Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- Sotoudeh-Anvari, A. (2022). The applications of MCDM methods in COVID-19 pandemic: A state of the art review. *Applied Soft Computing*, 126, 109238. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109238>
- Stojčić, M., Zavadskas, E. K., Pamučar, D., Stević, Ž., & Mardani, A. (2019). Application of MCDM methods in sustainability engineering: A literature review 2008-2018. In *Symmetry* (Vol. 11, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/sym11030350>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023a). A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6(2), 5–16. <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i2.5637>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023b). An Effective Compromising Ranking Technique for Decision Making. *Macro Management & Public Policies*, 5(2), 27–33. <https://doi.org/10.30564/mmpp.v5i2.5578>

- Triantaphyllou, E., & Sánchez, A. (1997). A Sensitivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision-Making Methods*. *Decision Sciences*, 28(1), 151–194. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x>
- Uzun, B., Ozsahin, I., Agbor, V. O., & Uzun Ozsahin, D. (2021). Theoretical aspects of multi-criteria decision-making (MCDM) methods. In *Applications of Multi-Criteria Decision-Making Theories in Healthcare and Biomedical Engineering* (pp. 3–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824086-1.00002-5>
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Wang, Y.-M., & Elhag, T. M. S. (2006). Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 31(2), 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.040>
- Yang, X. S. (2011). *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. Wiley. [https://msulaiman.org/onewebmedia/Xin-She%20Yang-Engineering%20Optimization_%20An%20Introduction%20with%20Metaheuristic%20Applications-Wiley%20\(2011\).pdf](https://msulaiman.org/onewebmedia/Xin-She%20Yang-Engineering%20Optimization_%20An%20Introduction%20with%20Metaheuristic%20Applications-Wiley%20(2011).pdf)
- Ye, R., Chen, L., Kou, W. B., Zhang, J., & Ishibuchi, H. (2024). Pareto Front Shape-Agnostic Pareto Set Learning in Multi-Objective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.
- Yoon, K. P., & Hwang, C. L. (1995). *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*. Sage Publications. <https://us.sagepub.com/en-us/nam/book/multiple-attribute-decision-making>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Zavadskas, E. K., Govindan, K., Antuchevičienė, J., & Turskis, Z. (2016). Hybrid multiple criteria decision-making methods: a review of applications for sustainability issues. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 29(1), 857–887. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2016.1237302>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antuchevičienė, J., & Zakarevičius, A. (2012a). A Hybrid Multiple Criteria Decision-Making Model for Strategic Project Management. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(1), 11–25.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antuchevičienė, J., & Zakarevičius, A. (2012b).

- Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Electronics and Electrical Engineering*, 122(6), 3–6. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). *State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.009>
- Zheng, J., Egger, C., & Lienert, J. (2016). A scenario-based MCDA framework for wastewater infrastructure planning under uncertainty. *Journal of Environmental Management*.