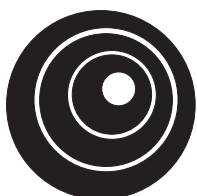


ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Велибор М. АНДРИЋ

**МЕТОДОЛОГИЈА
ОПТИМИЗАЦИЈЕ
ПРОЦЕДУРА
ИНСТРУМЕНТАЛНОГ
ПРИЛАЖЕЊА**



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ
2025.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Велибор М. Андрић

**МЕТОДОЛОГИЈА ОПТИМИЗАЦИЈЕ
ПРОЦЕДУРА ИНСТРУМЕНТАЛНОГ
ПРИЛАЖЕЊА**

докторска дисертација

Београд, 2025

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Velibor M. Andrić

**INSTRUMENT APPROACH PROCEDURES
OPTIMIZATION METHODOLOGY**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

Ментор:

др Феђа Нетјасов, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет.

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације:

др Бојана Мирковић, редовни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет (председник комисије);

др Милош Николић, ванредни професор,
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет;

др Дорис Новак, редовни професор,
Свеучилиште у Загребу - Факултет прометних знаности.

Датум одбране:

*Посвећено мојим родитељима, као и онима који су нас
волели највише, а више нису са нама...
Себи као подсетник.*

Изјава захвалности:

Изузетну захвалност за подршку током целокупног процеса истраживања и израде докторске дисертације дугујем проф. др Феђи Нетјасову. Његова несебична стручна помоћ, академско вођство и менторска подршка били су од кључног значаја за успешан пут ка овом академском остварењу.

Посебну захвалност упућујем проф. др Обраду Бабићу, као свом првом академском ментору, и проф. др Војину Тошићу, као некадашњем шефу Катедре за аеродроме и безбедност ваздушне пловидбе, који су заслужни за моје иницијално ангажовање у оквиру научноистраживачке заједнице. Јединствено искуство стечено на Катедри омогућило ми је свеобухватно разумевање система ваздушног саобраћаја и поставило темеље за даљи професионални развој.

Велику захвалност изражавам проф. др Милошу Николићу за одлучујућу помоћ приликом дефинисања и примене оптимизационог алгоритма, која је у знатној мери убрзала реализацију дисертације.

Захвалан сам члановима комисије на конструктивним коментарима и сугестијама којима су допринели унапређењу квалитета рада, као и свим члановима Катедре и колегама, који су током претходних година на различите начине позитивно допринели успешном привођењу крају ове фазе мог академског пута.

На крају, највећу захвалност дугујем својој породици, која је веровала у моју истрајност и пружала ми подршку током овог изазовног, али драгоценог путовања.

Методологија оптимизације процедура инструменталног прилажења

Сажетак:

Последњих деценија, континуирано повећање обима ваздушног саобраћаја довело је до засићења расположивог ваздушног простора. Модерне LPV (localizer performance with vertical guidance) процедуре за инструментално прилажење и слетање, засноване на побољшаном сателитском сигналу, пружају већи ниво безбедности и флексибилности, потенцијално омогућавајући додатни капацитет на аеродромима и у ваздушном простору.

У циљу подршке њиховој имплементацији, предложен је нови рачунарски модел, фокусиран на побољшани процес пројектовања процедура и оптимизовано генерисање решења. Модел обезбеђује потпуно аутоматизовано претраживање простора решења применом метахеуристичког алгорита BCO (Bee Colony Optimization), док је метрика процене комплексности прилазних процедура, развијена по први пут за потребе овог рада, искоришћена у сврху квантификације квалитета произведених решења. Резултати модела представљени су као листа допустивих решења, која конвергирају најбољем, у складу са вредношћу њихове функције циља, која је балансирана између два главна критеријума - комплексности процедуре и добијене вредности оперативног минимума, односно OCH (obstacle clearance height).

Могућности модела су потврђене у условима изазовног оперативног окружења на примеру Аеродрома Подгорица. Током тестирања, успешно је демонстрирана робусност модела, која се огледа у могућности ефикасног рада како приликом побољшања постојећих, тако и приликом генерисања нових процедура, на локацијама где то раније није био случај.

Флексибилност и модуларност модела допуштају могућност даљег прилагођавања, чиме се његова примена може проширити и изван PBN (performance-based navigation) концепта, укључујући и за потребе хеликоптерских операција. Карактеристике модела чине га погодним за неколико примена, укључујући спровођење студија изводљивости, пројектовање и планирање аеродрома, као и могућност употребе при валидацији других алата или критеријума.

Да би се осигурала будућа релевантност модела, предвиђен је даљи развој у домену перформанси и функционалности.

Кључне речи: Пројектовање процедура за инструментално летење, процедуре инструменталног прилажења, операције летења, комплексност, аутоматизација, оптимизација, метахеуристике

Научна област: Саобраћајно инжењерство

Ужа научна област: Аеродроми и безбедност ваздушне пловидбе

УДК број:

Instrument approach procedures optimization methodology

Abstract:

Over the past few decades, the consistent rise in air traffic has resulted in a saturation of available airspace. Modern LPV (localizer performance with vertical guidance) procedures for instrument approach and landing, based on augmented satellite signals, improve safety and flexibility, thereby potentially increasing the capacity of airports and airspace.

To facilitate their implementation, a new computational model that enhances the flight procedure design process and generates optimal solutions is proposed. The model uses the metaheuristic algorithm BCO (Bee Colony Optimization) to conduct a comprehensive and automated search of the solution space. It evaluates the quality of the generated solutions by applying a novel metric that measures the complexity of the approach procedure. The model's results are displayed as a list of feasible options that gradually converge to the best solution based on their objective function value. The objective function is balanced between two main criteria: the complexity of the procedure and the obtained value of the operational minimum, specifically the obstacle clearance height (OCH).

The model's capabilities were validated in the demanding operating environment of Podgorica Airport. The model's robustness was effectively proven, as seen by its ability to function efficiently in both refining current procedures and producing new ones in previously unsuitable locations.

The model's flexibility and modular design allow for further adaptation, enabling its application to go beyond the PBN concept, such as for helicopter operations. The characteristics of the model make it suitable for several applications, including conducting feasibility studies, designing and developing airports, as well as the possibility for use in validating other tools or criteria.

To ensure the model's future relevance, further development in the domain of performance and functionality is anticipated.

Key words: Instrument flight procedure design, instrument approach procedures, flight operations, complexity, automation, optimization, metaheuristics

Scientific field: Transport and Traffic Engineering

Scientific subfield: Airports and Air Traffic Safety

UDK:

Садржај

ДЕО I УВОД.....	1
1. ТЕМА РАДА.....	2
1.1. Структура рада	5
2. LPV ПРОЦЕДУРЕ	6
2.1. Основни елементи.....	6
2.2. Операције летења.....	7
2.3. Процес пројектовања	9
2.3.1. Фаза конструкције.....	10
2.3.2. Фаза провере	12
3. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	13
ДЕО II МОДЕЛИРАЊЕ ПРОБЛЕМА	17
4. МЕТОДОЛОГИЈА РАДА	18
4.1. Предмет и задаци модела.....	18
5. ДЕФИНИСАЊЕ ПРОБЛЕМА	19
5.1. Поставка проблема	19
5.2. Концепт пројектовања процедура	20
5.3. Оцена комплексности процедура	22
5.4. Поступак конструкције процедура	23
5.4.1. Улазни подаци.....	25
5.4.2. Конструкција номиналне путање	26
5.4.3. Конструкција OAS равни.....	37
5.4.4. Конструкција заштитног простора	44
5.5. Поступак анализе надвишавања препрека.....	49
5.5.1. Анализа INITIAL и INTER сегмената	50
5.5.2. Анализа SAT I сегмента.....	52
5.5.3. Анализа MAS сегмента	53
5.6. Опште претпоставке за апроксимацију проблема.....	54
6. ТИП ПРОБЛЕМА.....	56
6.1. Тежина проблема	56
6.2. Класификација проблема	58
7. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ	59
7.1. Основни елементи модела.....	59
7.1.1. Додатне карактеристике модела.....	60

7.2.	Управљачке променљиве	62
7.2.1.	Дефиниција УП	65
7.2.2.	Вектор решења	69
7.3.	Функција циља	70
7.3.1.	Компромисно програмирање	71
7.3.2.	Трансформација основне метрике	72
7.4.	Параметри	72
7.5.	Ограничења	75
7.6.	Скала квалитета решења	76
8.	МЕТОД ЗА РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА	77
8.1.	Избор основног метода	77
8.1.1.	Хеуристички алгоритми	78
8.2.	Избор метахеуристичког алгоритма	81
8.2.1.	Алгоритми засновани на понашању пчела у природи	82
8.2.2.	ВСО алгоритми	83
8.3.	Примена ВСО _i алгоритма	85
	ДЕО III РАЧУНАРСКИ МОДЕЛ	87
9.	КОНЦЕПТУАЛНИ МОДЕЛ	88
10.	АРХИТЕКТУРА РАЧУНАРСКОГ МОДЕЛА	91
10.1.	Оптимизациони модул	93
10.2.	PANS-OPS модул	95
10.3.	Софтверска платформа	99
11.	ТЕСТИРАЊЕ И ПРИПРЕМА МОДЕЛА	100
11.1.	Верификација модела	100
11.1.1.	Прва фаза - развој	100
11.1.2.	Друга фаза - тестирање	100
11.2.	Валидација модела	114
11.2.1.	Вредновање рада алгоритма	115
11.2.2.	Вредновање квалитета решења	120
11.2.3.	Постојтимална анализа	124
	ДЕО IV ПРИМЕНА МОДЕЛА	127
12.	НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР	128
12.1.	Аеродром Подгорица - оперативно окружење	128
12.2.	Експеримент	130

12.2.1.	Улазни подаци.....	130
12.2.2.	Оперативни захтеви	131
12.2.3.	Услови извођења.....	132
13.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	133
13.1.	Експеримент 1 - E1: Побољшање процедуре за ПСС 36	133
13.1.1.	Референтни сценарио	133
13.1.2.	Сценарио 1А	133
13.1.3.	Сценарио 1В.....	135
13.1.4.	Упоредни приказ резултата E1	137
13.2.	Експеримент 2 - E2: Нова процедура за ПСС 18.....	138
13.2.1.	Сценарио 2А	139
13.2.2.	Сценарио 2В.....	141
13.2.3.	Упоредни приказ резултата E2	143
13.3.	Анализа резултата	145
	ДЕО V ЗАКЉУЧАК	149
14.	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	150
14.1.	Правци будућег истраживања	152
15.	ОЗНАКЕ И СКРАЋЕНИЦЕ	155
16.	ЛИТЕРАТУРА.....	157
	ПРИЛОГ 1 – RVN концепт.....	167
	ПРИЛОГ 2 – EGNOS систем	173
	ПРИЛОГ 3 – Методи пројектовања IFR	176
	ПРИЛОГ 4 – Подела IAP.....	177
	ПРИЛОГ 5 – Општи домен УП.....	180
	ПРИЛОГ 6 – Тачке конструкције процедуре.....	181
	ПРИЛОГ 7 – Резултати валидације модела.....	182
	ПРИЛОГ 8 – База препрека	189
	Биографија аутора.....	190

Списак табела

Табела 1. Преглед радова из домена оптимизације IAP	13
Табела 2. Опсег основних улазних променљивих	27
Табела 3. Опсег брзина ваздухоплова	27
Табела 4. Стандардне димензије ваздухоплова према категорији брзине.....	37
Табела 5. Основни подаци утврђени за базне OAS равни (CAT A/B).....	40
Табела 6. Зависност координата тачака хоризонталне OAS равни.....	41
Табела 7 Димензије толеранције фиксева и полуширина простора	44
Табела 8. Приказ МОС вредности по сегментима за LPV процедуре	49
Табела 9. HL вредност за коришћење барометарског висиномера	49
Табела 10 Домени управљачких променљивих	64
Табела 11. Условне УП.....	69
Табела 12 Тежински коефицијенти	73
Табела 13. Елементи генеричке ПСС.....	100
Табела 14. База препрека за верификацију модела.....	101
Табела 15. Провера прорачуна w_i и f_i за дате УП.....	102
Табела 16. Провера прорачуна MSD	104
Табела 17. Провера конструкције заокрета	105
Табела 18. Провера прорачуна МОСА	107
Табела 19. Провера примене принципа SDF	108
Табела 20. Провера прорачуна PROC ALT	108
Табела 21. Провера прорачуна висина у MAS	109
Табела 22. Провера елемената OAS	109
Табела 23. Провера прорачуна OCH.....	110
Табела 24. Провера прорачуна CG	110
Табела 25. Провера трансформације координата за бочни прилаз	112
Табела 26. Провера прорачуна OCH за бочни прилаз.....	112
Табела 27. Провера трансформације координата за измештен THR	113
Табела 28. Провера прорачуна за различите вредности OCHadj	113
Табела 29. Додатни скуп препрека за валидацију модела.....	114
Табела 30. Резултати валидације модела - оцена OF.....	115
Табела 31. Резултати валидације модела - време рада модела.....	118
Табела 32. Вектори најбољих решења валидације модела.....	120
Табела 33. Оптимално решење Sc4 - вертикални профил.....	123

Табела 34. Подаци о ПСС	131
Табела 35. Оперативни захтеви.....	131
Табела 36. Вектор решења E1-ScREF.....	133
Табела 37. Вектор решења E1-Sc1A.....	133
Табела 38. Вертикална ограничења решења E1-Sc1A.....	135
Табела 39. Вектор решења E1 – Sc1B.....	136
Табела 40. Вертикална ограничења решења E1-Sc1B.....	137
Табела 41. Преглед резултата E1	137
Табела 42. Вектор решења E2-Sc2A.....	139
Табела 43. Вертикална ограничења решења E2-Sc2A.....	140
Табела 44. Вектор решења E2-Sc2B.....	141
Табела 45. Вертикална ограничења решења E2-Sc2B.....	143
Табела 46. Преглед резултата E2	143
Табела 47. Приказ захтева према навигационим спецификацијама и фази лета	169
Табела 48. Подела IAP у оквиру RNP APCH	178
Табела 49. Приказ системских минимума по типу IAP	179
Табела 50. Општи домен УП.....	180
Табела 51. Тачке конструкције процедуре	181
Табела 52. Резултати валидације модела - Sc1	182
Табела 53. Резултати валидације модела - Sc2.....	184
Табела 54. Резултати валидације модела - Sc3.....	186
Табела 55. Резултати валидације модела - Sc4.....	188
Табела 56. База препрека	189

Списак слика

Слика 1. Типови IFR по фазама лета.....	2
Слика 2. Расподела LPV CAT I процедура у Европи.....	4
Слика 3. Структура LPV процедуре (вертикални профил).....	6
Слика 4. Типови путних тачака.....	7
Слика 5. Типични Airbus PFD (лево) и ND (десно) индикатори	8
Слика 6. Висина одлуке	9
Слика 7. Процес израде IFR.....	9
Слика 8. Типови заштитног простора.....	11
Слика 9. Примарни и секундарни заштитни простор	11
Слика 10. LPV CAT I OAS.....	12
Слика 11. Постојеће активности у процесу пројектовања процедура.....	20
Слика 12. Проширене активности у процесу пројектовања процедура	21
Слика 13. Веза комплексности и безбедности	22
Слика 14. Коришћени PT.....	24
Слика 15. Параметри за усмерење путање лета.....	25
Слика 16. Два типа прилаза у оквиру FAS.....	28
Слика 17. Ефекат закривљености Земљине површине и елипсоида.....	29
Слика 18. Приказ принципа SDF (вертикална пројекција)	30
Слика 19. Приказ путање са заокретом на fly-by WP.....	34
Слика 20. Приказ MSD за fly-by WP	35
Слика 21. Приказ прорачуна TRD за fly-by WPT	36
Слика 22. Приказ MSD за flyover WP	37
Слика 23. ILS OAS.....	38
Слика 24. Приказ OAS равни у три пројекције.....	38
Слика 25. Декартов координатни систем.....	39
Слика 26. Приказ елемената OAS равни.....	39
Слика 27. Пример резултата прорачуна OAS равни.....	42
Слика 28. LPV CAT I OAS равни	43
Слика 29. Примена circular arc метода.....	45
Слика 30. Примена bounding circles метода - fly-by.....	46
Слика 31. Примена bounding circles метода - flyover	47
Слика 32. Прорачун МОС у секундарном простору	50
Слика 33. Поступак елиминације препрека	51

Слика 34. Класификација препрека у прецизном сегменту и локација SOC.....	52
Слика 35. Структура детерминистичких и недетерминистичких алгоритама.....	58
Слика 36. Једнодимензионална функција $f(x)$	61
Слика 37. Једнодимензионална функција са више локалних MAX и MIN.....	61
Слика 38. Дводимензионална функција са једним оптимумом.....	61
Слика 39. Усвојени координатни систем.....	64
Слика 40. Измештање прага слетања.....	65
Слика 41. Структура бочног прилаза.....	65
Слика 42. Приказ SDFd УП.....	67
Слика 43. Скала квалитета решења.....	76
Слика 44. Класификација метода комбинаторне оптимизације.....	78
Слика 45. Припадност BCO алгоритама.....	82
Слика 46. Основни концепт плеса пчела у природи.....	85
Слика 47. Принцип указивања на локацију извора хране у односу на Сунце.....	85
Слика 48. Концептуални модел.....	88
Слика 49. PANS-OPS модул.....	89
Слика 50. Процес за прорачун OF.....	90
Слика 51. Основна архитектура рачунарског модела.....	92
Слика 52. Поступак ротације координатног система.....	95
Слика 53. Пример полигона формираних у оквиру INITIAL сегмента.....	96
Слика 54. Принцип идентификације препрека у простору заокрета.....	98
Слика 55. Принцип одређивања тангенти кружнице.....	98
Слика 56. Генерисана LPV процедура.....	103
Слика 57. Елементи номиналне путање.....	104
Слика 58. Конструкција заокрета на IF.....	105
Слика 59. Конструкција заокрета на MATF.....	106
Слика 60. Сегмент почетног прилажења.....	107
Слика 61. Сегмент међуприлажења.....	107
Слика 62. Сегмент завршног прилажења.....	109
Слика 63. Сегмент неуспелог прилажења.....	111
Слика 64. Бочни прилаз.....	111
Слика 65. Резултати тестирања конвергенције алгоритама по сценаријима.....	116
Слика 66. Резултати тестирања времена извршења модела по сценаријима.....	119
Слика 67. Оптимално решење Sc1 - хоризонтална пројекција.....	121

Слика 68. Оптимално решење Sc2 - хоризонтална пројекција	121
Слика 69. Оптимално решење Sc3 - хоризонтална пројекција	121
Слика 70. Оптимално решење Sc4 - хоризонтална пројекција	122
Слика 71. Локација LYPG.....	128
Слика 72. Оперативно окружење LYPG	129
Слика 73. Хоризонтални приказ решења E1-Sc1A.....	134
Слика 74. Хоризонтални приказ решења E1-Sc1B.....	136
Слика 75. Понашање модела E1-Sc1A.....	138
Слика 76. Понашање модела E1-Sc1B.....	138
Слика 77. Хоризонтални приказ решења E2-Sc2A.....	139
Слика 78. Хоризонтални приказ решења E2-Sc2B.....	142
Слика 79. Понашање модела E2-Sc2A.....	144
Слика 80. Понашање модела E2-Sc2B.....	144
Слика 81. Елементи PBN концепта	167
Слика 82. Конвенционалне (лево) и PBN (десно) путање.....	168
Слика 83. Приказ врста навигационих спецификација	168
Слика 84. Генерални концепт навигационе грешке RNAV система	170
Слика 85. Веза прецизности RNP система и димензија заштитног простора.....	170
Слика 86. Приказ елемената TSE.....	171
Слика 87. Принцип утврђивања граница заштитног простора.....	172
Слика 88. Навигациона грешка дуж путање.....	172
Слика 89. Постојећи и планирани SBAS системи.....	173
Слика 90. EGNOS простор пружања услуга.....	174
Слика 91. Архитектура EGNOS система	174
Слика 92. EGNOS RIMS локације.....	175
Слика 93. Подела IAP	178
Слика 94. Минимална висина.....	179

ДЕО I

УВОД



Мотив по узору на шару са кошуље из околине Ваљева
Владислав Тителбах, „Српски вез“, Краљевска српска државна штампарија, 1896.

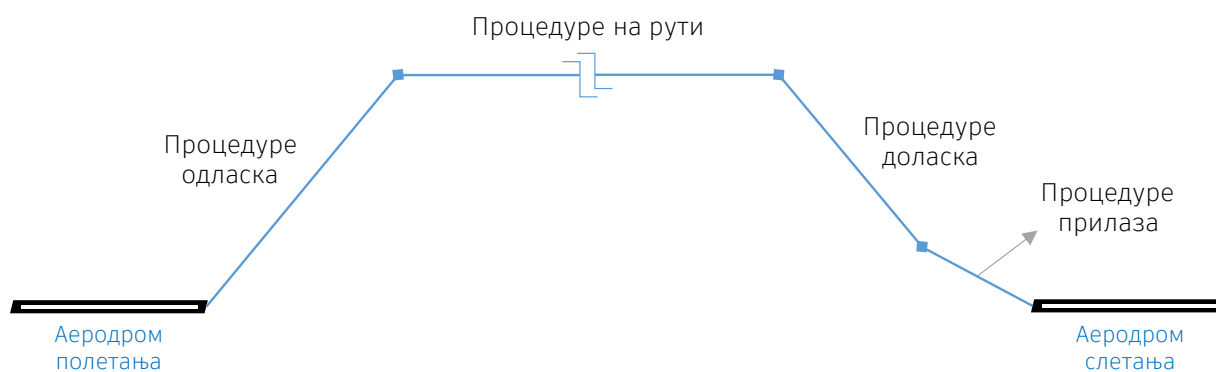
1. ТЕМА РАДА

Процедуре за инструментално летење¹ (instrument flight procedure - IFP) представљају комплементарни део услуге контроле летења (air traffic control (ATC) service) неопходне у циљу омогућавања безбедног, редовног и експедитивног одвијања ваздушне пловидбе [1].

У том смислу, основни задатак IFP представља безбедно надвишавање и спречавање колизије ваздухоплова са препрекама на земљи. Под препрекама се подразумевају сви вештачки објекти и терен. Поред тога, IFP се, у складу са [2] користе у поступку примене норми раздвајања ваздухоплова, како на тактичком тако и на стратешком нивоу.

IFP чини статичка структура, којом се описује низ предефинисаних маневара, који се обављају у односу на инструментална правила летења (instrument flight rule - IFR) [3], за безбедан лет од почетне до крајње тачке, које зависе од фазе лета, односно типа процедуре. Четири основна типа IFP према [4] су (Слика 1):

- **Процедуре одласка** - садрже путању за полетање са аеродрома и долазак до тачке на одговарајућој рути; најчешће се пројектују у виду тзв. стандардних инструменталних одласака (standard instrument departure - SID);
- **Процедуре на рути** - садрже путању за крстарење ваздухоплова (en-route) на већим висинама; најчешће се пројектују у виду рута у ваздушном саобраћају (air traffic service (ATS) route), којима се омогућава прелет одређене територије;
- **Процедуре доласка** - садрже путању за лет са руте до тачке у близини аеродрома слетања; најчешће се пројектују у виду тзв. стандардних инструменталних доласака (standard instrument arrival - STAR) и служе за смањење висине ваздухоплова;
- **Процедуре прилаза** (instrument approach procedure - IAP) - примењују се у завршној фази лета, и садрже путању за позиционирање ваздухоплова у правац за прилажење и слетање на аеродром, односно полетно-слетну стазу (ПСС).



Слика 1. Типови IFP по фазама лета

Развојем IFP по први пут је омогућено извођење операција летења ваздухоплова у скоро свим временским условима, при смањеној видљивости, током дана и ноћи. Уз технолошки и економски напредак, створени су предуслови за једну од највећих глобалних експанзија ваздушног саобраћаја у протеклим деценијама.

За разлику од других структура ваздушног простора, IFP су намењене за директну употребу од стране летачких посада (на навигационим приказима ваздухоплова), као и оперативних јединица контроле летења (на мониторима Air Traffic Control (ATC) система), у свакодневном раду. У оба

¹ Појам процедуре за инструментално летење, коришћен за потребе овог рада, дефинисан је у изменама Закона о ваздушном саобраћају („Службени гласник РС”, бр. 73/10, 57/11, 93/12, 45/15, 66/15 - др. закон, 83/18, 9/20 и 62/23), у оквиру Члана 42. У литератури расположивој на српском језику, могу се срести и еквивалентни појмови - инструментални (навигациони) поступци или летне процедуре.

случаја, IFR и на посредан начин утичу на безбедност одвијања ваздушног саобраћаја, доприносећи генерисању и расподели радног оптерећења његових главних учесника.

Модерни аеродроми данас се не могу замислити без постојања IFR. Сертификација аеродрома за међународну комерцијалну употребу подразумева имплементацију одобрених SID, STAR и IAP процедура [5]. Такође, самостална употреба IFR на аеродромима без АТС услуге полако постаје пракса широм Европе и света, чиме је омогућен развој и мањих аеродрома, чак без потребе за развојем додатне инфраструктуре [6].

Најновија достигнућа у домену IFR омогућена су увођењем концепта навигације засноване на могућностима ваздухоплова (performance-based navigation - PBN). Концепт PBN разматра три најважнија аспекта обављања операција летења, укључујући опремљеност ваздухоплова, обученост летачких посада, као и могућност употребе напредних система за навигацију (видети Прилог 1). Захтеви су организовани у оквиру навигационих спецификација према фази лета, и унифицирани су на међународном нивоу [7]. Овај концепт представља основу за примену оперативних концепата који чине окосницу модерног система ваздушног саобраћаја, као што су *Free Route Airspace* (FRA) и *Flexible Use of Airspace* (FUA) (видети више у оквиру [8]).

Концепт PBN подразумева комбиновану примену различитих система ваздухоплова, чиме се омогућава већи ниво флексибилности у пројектовању процедура, као и већи степен аутоматизације у обављању операција летења, уз бољу предвидивост и поновљивост путања ваздухоплова [7]. У овом процесу, централну улогу има систем за управљање летом (*Flight Management System - FMS*), који пружа подршку летачким посадама током свих фаза лета. Латерална (бочна) и вертикална навигацијска компонента остварују се помоћу система просторне навигације (*RNAV - area navigation* или *RNP - required navigation performance*), који представља саставну функцију FMS-а. Такође, обезбеђена је тачнија предикција времена, брзине, вертикалног профила и висине ваздухоплова током лета, као и управљање функцијом аутопилота током извршавања операција. Овакво окружење омогућило је употребу глобалних сателитских навигационих система (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) као основног средства за позиционирање и навигацију ваздухоплова.

Уз подршку **система за побољшавање сигнала сателита (satellite-based augmentation system - SBAS)** по први пут је омогућено обављање 3D операција слетања без потребе за додатном инфраструктуром на аеродрому [9]. На овом принципу развијене су прве сателитске процедуре за прецизно прилажење и слетање, које укључује латералну и вертикалну компоненту вођења ваздухоплова са великом прецизношћу, што је претходно било својствено једино комплексним конвенционалним системима за инструментално слетање, као што су *ILS (instrument landing system)* и *MLS (microwave landing system)*. Док се први систем и после шест деценија налази у употреби, потоњи се практично више не користи услед неисплативости као последице значајних техничких ограничења и сложености.

Процедуре базирани на SBAS сигналу су, према аналогији са *ILS* системом, назване **Localizer Performance with Vertical guidance (LPV)** процедуре. Међутим, за разлику од скупог *ILS* система, ове процедуре не захтевају физичке инсталације, попут система антена (*localizer* и *glideslope*) за потребе латералног и вертикалног вођења ваздухоплова. Најновија генерација LPV процедура омогућује обављање операција које су еквивалентне *ILS CAT I (Category I)* процедурама, због чега се називају још и **LPV CAT I** или **LPV-200** процедуре [10], [11]. LPV процедуре на европском континенту су базирани на *EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)* систему, који је детаљније описан у Прилогу 2 овог рада.

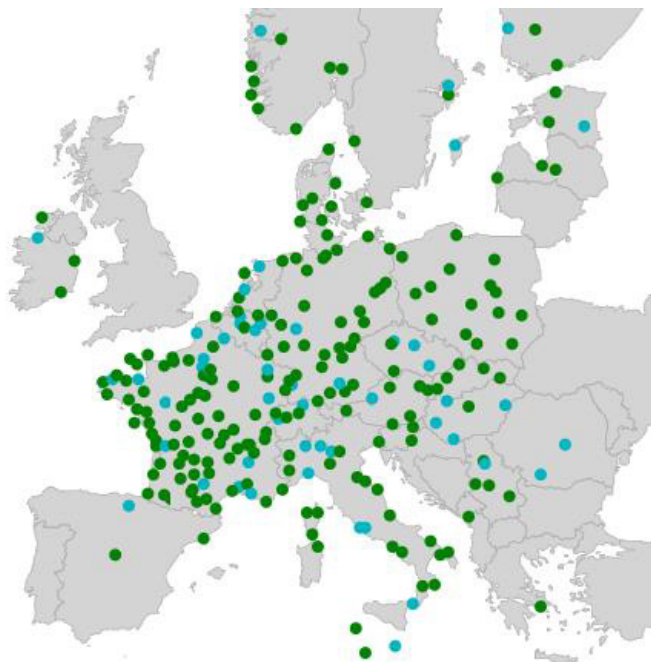
Прва препознатљива предност LPV процедура је њихова економска исплативост, која је последица одсуства улагања у инсталацију и одржавање опреме на земљи, уз веома мала оперативна ограничења. Друга страна користи је много важнија и односи се на унапређење нивоа безбедности и ефикасности обављања ваздушног саобраћаја, уз додатна проширења капацитета ваздушног простора [12], [13] и [14]. Као додатна корист, истиче се могућност увођења операција летења на претходно недоступним локацијама [15], [16].

Овакви позитивни ефекти обезбеђени су већим степеном аутоматизације и свесности о саобраћајној ситуацији, као и смањеном радном оптерећењу летачких посада и контролора летења [17]. Назначене карактеристике су веома битне за стабилно извођење операција слетања, као најкритичније фазе лета са аспекта безбедности [18].

У циљу подршке будућој примени LPV процедура, широм света се развијају регионални SBAS системи [19], које прате главни произвођачи ваздухоплова омогућавајући примену ове технологије у својим новим, али и старим флотам [20].

Концепт PBN и LPV процедуре препознати су и као кључни предуслови за развој и примену будућих оперативних концепата који се ослањају на нове технологије (видети [21] и [22]). Ови концепти обухватају системе са двоструком фреквенцијом и вишеструким констелацијама (dual-frequency multi-constellation – DFMC), као и напредне софтвере за аутономно праћење интегритета пријемника (advanced receiver autonomous integrity monitoring – ARAIM). Планирано проширење употребе SBAS система на операције категорије CAT II, заједно са новим технолошким приступима, омогућиће ширу примену LPV процедура уз додатно повећање оперативних предности [23]. Томе у прилог говоре и објављени резултати хибридне примене LPV технологије са другим напредним системима слетања [24] и [25], чиме се опсег њихове примене још даље проширује.

Иако је данас значајан број LPV процедура већ у употреби (око 4 900 у Северној Америци [26] и око 900 у Европи [27]), њихова масовна примена нових верзија широм света тек се очекује. У Европској унији, у складу са регулативом познатом као PBN IR (Implementing Regulation) [14], до краја 2030. године постоји обавеза увођења LPV процедура на свим инструменталним ПСС, без обзира на категорију аеродрома. Оваква примена учиниће LPV процедуре кључним за операције слетања у наредним годинама. Слика 2 [28] даје приказ географске расподеле имплементираних LPV CAT I процедура у Европи. Зеленом бојом означени су аеродроми где су процедуре примењене на свим инструменталним ПСС, док су плавом бојом означене локације са делимичном применом.



Слика 2. Расподела LPV CAT I процедура у Европи

LPV (CAT I) процедуре, због својих препознатих предности и значаја за будући развој ваздушне пловидбе, представљају централну тему овог рада. Циљ истраживања је да се омогући њихова шира примена, чиме би се повећале могућности обављања операција летења у ваздушном простору и на аеродромима где то до сада није било изводљиво. Ово би допринело стварању

додатних капацитета за подршку развоју и унапређењу ваздушног саобраћаја на регионалном и глобалном нивоу.

Основни задатак рада представља развој нове методологије и креирање модела за оптимизовано пројектовања LPV процедура, у складу са специфичним оперативним окружењем и захтевима. Рад модела биће заснован на аутоматизованом, вишекритеријумском процесу претраге простора могућих решења. Модел ће, уз довољан степен робусности, омогућити имплементацију нових LPV процедура на тешко доступним локацијама, као и побољшање постојећих процедура.

У оквиру предложене методологије, посебна пажња ће бити посвећена поједностављењу сложеног процеса пројектовања IAP. Увођењем нових метрика за процену квалитета пројектованих LPV процедура, процес одлучивања биће знатно убрзан у односу на традиционалне методе (видети Прилог 3). Предложена методологија треба да донесе додатне предности, као што су аутономно вођење процеса и генерисање потпуно оптимизованих решења, што није случај са тренутно доступним специјализованим софтверским алатима за помоћ при изради IFR.

Поред практичних користи, очекује се да резултати ове дисертације, кроз систематизацију теоријских и примењених знања, послуже као основа за даљи развој тренутно веома ограниченог научно-истраживачког доприноса у области IFR.

1.1. Структура рада

Рад је организован у пет логичких целина: Увод, Моделирање проблема, Рачунарски модел, Примена модела и Закључак.

У оквиру Увода дат је детаљан опис теме и мотивације за истраживање, као и општи појмови у вези са LPV процедурама (неопходни за разумевање проблема који се решава), праћени описом основне структуре рада.

У другом делу рада приказан је процес моделирања проблема, кроз неколико поглавља. Прва поглавља обухватају приказ основних принципа методологије примењене за развој модела, као и утврђене границе и поставку проблема. У наставку је описан начин одређивања типа и тежине проблема и представљена формулација математичког модела са основним елементима. У завршним поглављима објашњен је начин избора метода за решавање успостављеног проблема, као и примена оптимизационог алгорита.

Трећи део рада даје приказ коначног облика рачунарског модела, односно програма базираног на описаном проблему и представљеном концептуалном моделу. Представљена архитектура модела тестирана је кроз две фазе, верификацију и валидацију, у сврху завршне припреме модела.

Практична провера модела приказана је у делу рада под називом Примена модела, кроз студију случаја на примеру Аеродрома Подгорица, Црна Гора. Низ експеримената спроведен је како би се доказала ефективност и робусност предложеног модела. Аеродром Подгорица изабран је због сложене теренске конфигурације, која представља изазовно окружење за тестирање модела.

У завршном делу рада, организована су закључна разматрања и правци будућег истраживања. Овај део обухвата препоруке за унапређење методологије и могућности шире примене модела.

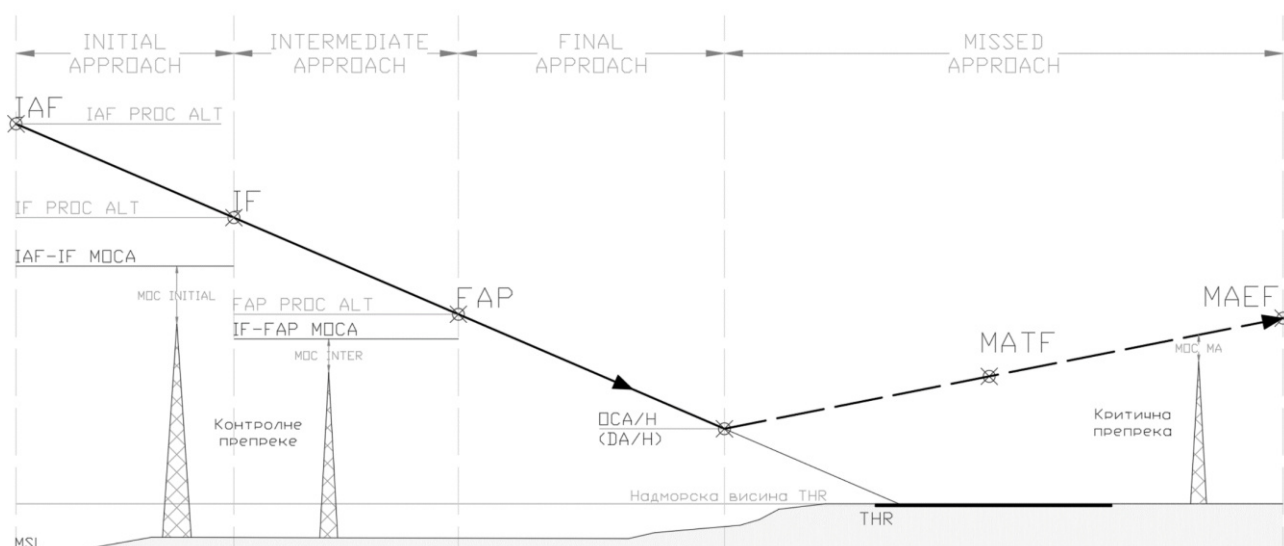
2. LPV ПРОЦЕДУРЕ

2.1. Основни елементи

LPV CAT I процедуре припадају категорији IAP које се користе за прецизно прилажење (precision approach - PA) и омогућавају извођење 3D Type B операција. У оквиру концепта PBN, припадају RNP ARCH навигационој спецификацији и базиране су на латералној и вертикалној компоненти вођења у односу на GNSS сигнал, побољшан SBAS системом. Детаљна подела и опис основних карактеристика IAP дат је у Прилогу 4 овог рада.

Структура LPV² процедуре, односно њене номиналне путање, одговара генералној структури IAP процедура (Слика 3, извор: [29]). Чини је четири сегмента, који су подељени путним тачкама (waypoint - WP), односно фиксима (fix):

1. **Сегмент почетног прилажења** (initial approach segment) је дефинисан између фикса почетног прилажења (initial approach fix - IAF) и фикса међуприлажења (intermediate approach fix - IF); служи да омогући транзицију ваздухоплова из рутне фазе летења (en-route) до сегмента међуприлажења, који се пружа у правцу продужене осе ПСС.
2. **Сегмент међуприлажења** (intermediate approach segment) је дефинисан између IF и тачке завршног прилажења (final approach point - FAP); служи да омогући припрему брзине и конфигурације ваздухоплова за слетање.
3. **Сегмент завршног прилажења** (final approach segment - FAS) је дефинисан између FAP и апсолутне/релативне висине одлуке (decision altitude/height - DA/H), након чега следи визуелни сегмент процедуре до прага слетања (threshold - THR); служи да омогући континуално снижавање и позиционирање ваздухоплова за слетање, а у случајевима када није могуће извршити слетање, омогућује безбедну транзицију ваздухоплова у сегмент неуспелог прилажења.
4. **Сегмент неуспелог прилажења** (missed approach segment - MAS) је дефинисан између DA/H и завршног фикса неуспелог прилажења (missed approach end fix - MAEF); служи да омогући лет ваздухоплова за поновни прилаз, одлазак у процедуру чекања (holding) или у рутну фазу летења.



Слика 3. Структура LPV процедуре (вертикални профил)

² У наставку текста појам LPV процедуре се увек односи на LPV CAT I процедуре.

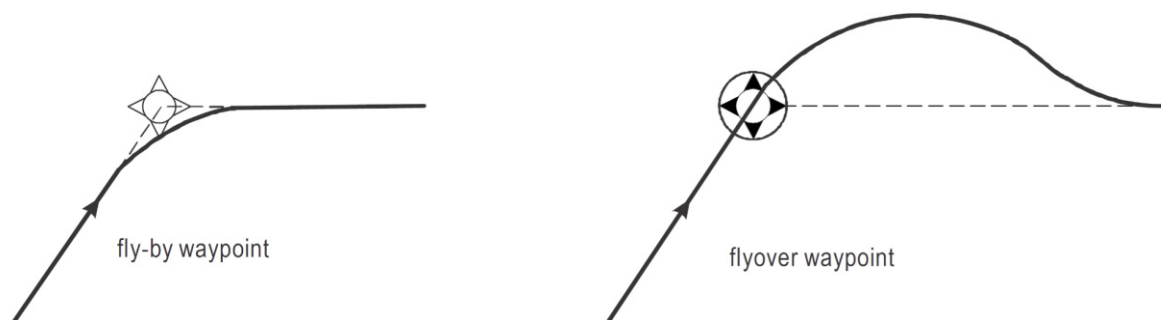
MAS има сложенију структуру у поређењу са осталим сегментима процедуре, јер може укључивати већи број путних тачака са заокретима (missed approach turn fix - MATF), односно већи број подсегмената. Састоји се из три фазе:

- a) **почетна фаза** (initial phase) - дефинисана је између DA/H и прорачунате тачке од које ваздухоплов започиње пењање (SOC - Start of Climb);
- b) **међуфаза** (intermediate phase) - обухвата сегмент од тачке SOC до тачке на којој је постигнуто и може се одржавати адекватно надвишавање препрека;
- c) **завршна фаза** (final phase) - укључује потребне маневре заокрета како би се омогућила транзиција ваздухоплова до одговарајуће тачке или висине.

Код LPV процедура, карактеристично је да се FAS заједно са почетном и међуфазом MAS назива CAT I сегмент, или прецизни сегмент (precision segment).

У оквиру PBN навигације, путне тачке могу бити дефинисане као **fly-by WP** или **flyover WP** (Слика 4, извор: [7]). У случају када су сегменти номиналне путање дефинисани као праволинијски, нема значајних разлика између ова два типа WP. Међутим, када је на путним тачкама дефинисан заокрет, јављају се јасне разлике, које се користе да би се постигли одговарајући ефекти приликом пројектовања процедура.

Код **fly-by WP**, заокрет ваздухоплова започиње на претходном сегменту и номинална путања се простире бочно од путне тачке. У случају **flyover WP**, заокрет започиње тачно на путној тачки и номинална путања се простире након ње. Ове разлике омогућавају прецизно дефинисање путање ваздухоплова и прилагођавање процедуре специфичним оперативним захтевима и ограничењима.



Слика 4. Типови путних тачака

У случају LPV процедура, заокрет је дозвољен на IF, као и унутар MAS сегмента. Поред тога, flyover WP се искључиво користи у MAS сегменту, и врло често у функцији дефинисања првог заокрета за брзу транзицију и уклањање ваздухоплова изван продужене осе ПСС.

У пракси постоји и трећи тип заокрета, тзв. **radius-to-fix (RF)** заокрет, који подразумева лет до следећег фикса по луку константног радијуса. За разлику од fly-by или flyover заокрета, RF заокрет се дефинише између две путне тачке, а не у односу на њих. Главна предност RF заокрета, са аспекта пројектовања процедура, лежи у његовој једноставнијој конструкцији и мањим димензијама елемената процедуре, што олакшава његову примену у сложеним оперативним условима. Међутим, извршавање овог типа заокрета захтева специфичне функционалности ваздухоплова, које нису саставни и обавезни део RNP APCH навигационе спецификације, због чега RF заокрет превазилази оквир и опсег овог рада.

2.2. Операције летења

Операције летења се изводе у односу на дефинисану номиналну путању процедуре, коју летачке посаде позивају из навигационе базе FMS рачунара. У модерним пилотским кабинама (тзв. *glass cockpit*) IAP се приказују у оквиру интегрисаних електронских индикатора, као што су примарни приказ лета (primary flight display - PFD) и навигациони приказ (navigation display - ND) (Слика 5, извор: [30]), код Airbus ваздухоплова.



Слика 5. Типични Airbus PFD (лево) и ND (десно) индикатори

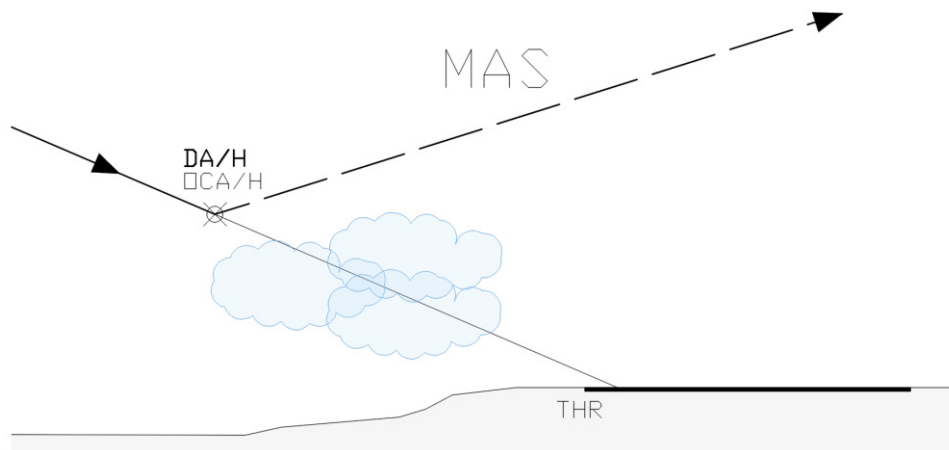
На PFD се углавном приказују краткорочни подаци о лету, ко што су вештачки хоризонт, висина, брзина, вертикална брзина, путни угао, мод вођења ваздухоплова, латерални и вертикални индикатор одступања од номиналне путање и сл. ND се користи за приказ средњорочно и дугорочно битних података, који укључују информације о плану лета (са латералном путањом и путним тачкама), идентификацију процедуре прилаза, вертикални профил, као и информације о временским условима и терену.

Иако код различитих произвођача и типова ваздухоплова постоје различити модови за навигационо вођење (тзв. *guidance modes*) ваздухоплова и приказ информација, интеракција са летачким посадама током обављања операција по LPV процедурама се углавном одвија путем корисничког интерфејса који је веома сличан као и код ILS процедура. Овакав приступ у већини случајева подразумева аутоматска подешавања свих неопходних функција за слетање и омогућава олакшано прихватање нових процедура, јер летачке посаде добијају визуелни репер сличан ономе на који су навикли током обављања прецизних прилаза. То даље обезбеђује лакшу обуку, унифицирану оперативну примену различитих типова процедура, смањење грешака и когнитивног оптерећења, чиме се побољшава ефикасност управљања временом и фокусирање на безбедност лета. Летачке посаде, поред информација добијених са инструментима, користе и ваздухопловне карте, које се данас најчешће налазе у дигиталној форми у оквиру тзв. *Electronic Flight Bags* (EFB).

Лет се спроводи до тзв. **висине одлуке**, која представља једну од најважнијих карактеристика пројектоване LPV процедуре. Висина одлуке се дефинише као апсолутна висина одлуке (DA) или релативна висина одлуке (DH), у зависности од тога да ли је одређена у односу на средњи ниво мора (*mean sea level* - MSL) или на надморску висину THR (Слика 6).

На висини одлуке пилот одлучује да ли ће извршити слетање или ће започети маневар неуспелог прилажења. Позитивна одлука доноси се када је успостављен стабилизован прилаз и визуелни контакт са ПСС, односно елементима њеног окружења (нпр. систем светлосног обележавања). Од тачке у простору која представља DA/H почиње визуелни сегмент IAP, који није предмет разматрања у овом раду. Нижа вредност DA/H значи да се ваздухоплов може позиционирати ближе ПСС летењем по инструментима, што може значајно допринети повећању броја операција слетања на аеродромима са честим неповољним временским условима, као што су магла или облачност.

Висину одлуке одређује оператер ваздухоплова, и ова вредност може додатно бити увећана у складу са интерним оперативним правилима и ограничењима авиокомпаније. У општем случају (када нема значајног утицаја препрека), вредност DA/H се подудара са утврђеном вредношћу апсолутне/релативне висине надвишавања препрека (obstacle clearance altitude/height - OCA/H). OCA/H је дефинисана као најнижа апсолутна/релативна висина на којој се мора започети сегмент неуспелог прилажења како би се осигурало безбедно надвишавање препрека у складу са критеријумима пројектовања. Минимална, системска вредност OCH зависи од могућности система за навигацију у употреби, а у случају LPV процедура износи 200 ft (60 m), што одговара тзв. CAT I операцијама.



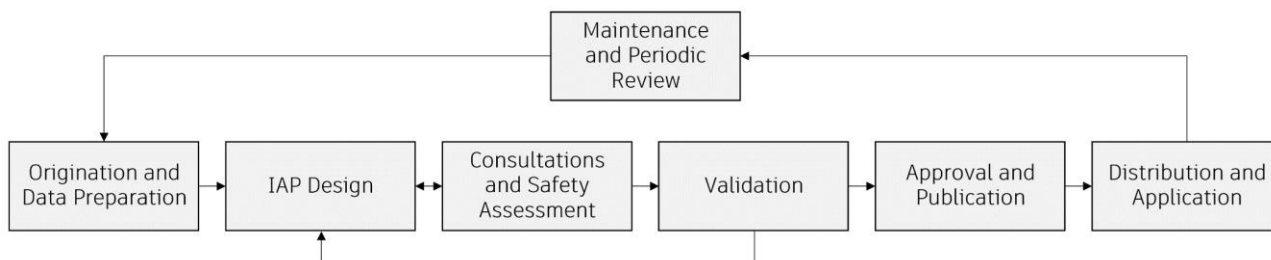
Слика 6. Висина одлуке

У случају када, након висине одлуке, слетање није могуће извести, врши се транзиција ваздухоплова у сегмент неуспелог прилажења, и његово даље усмеравање на безбедну висину на одговарајућој локацији, у складу са одлуком о наставку лета и инструкцијама надлежне јединице контроле летења, а према тренутној саобраћајној ситуацији у околини аеродрома.

Истраживање у оквиру овог рада је спроведено уз претпоставку да је минимална вредност висине одлуке једнака добијеној вредности за OCH. OCH вредност се утврђује у оквиру поступка анализе надвишавања препрека у оквиру сегмента завршног прилажења. Додатно објашњење концепта висине одлуке у оквиру дефинисања аеродромских оперативних минимума дато је у Прилогу 4.

2.3. Процес пројектовања

Процес пројектовања IAP представља корак у оквиру ширег процеса израде IFP. Процес израде IFP (Слика 7) је итеративан процес између различитих заинтересованих страна, чији је задатак да у међусобној интеракцији испуне све постављене оперативне и административне захтеве, у складу са важећим критеријумима пројектовања процедура.



Слика 7. Процес израде IFP

Након иницијализације процеса израде IFP и прикупљања/припреме потребних података, приступа се кораку пројектовања IAP. Активности у оквиру овог корака спровode се у складу са консултацијама са наручиоцима посла, укључујући оперативне јединице контроле летења, оператере аеродрома и/или ваздухоплова.

По утврђивању коначног изгледа IAP и спроведених безбедносних активности у вези са пројектовањем и имплементацијом IAP, врши се независна провера израђеног решења и, ако је потребно, валидација из ваздуха.

Коначна документација се затим доставља одговарајућим цивилним ваздухопловним властима на одобрење, након чега се врши објављивање IAP у националном Зборнику ваздухопловних података (Aeronautical Information Publication - AIP). Процедуре се објављују у облику ваздухопловних карти, као и дигиталним форматима доступним преко електронских платформи, попут *Eurocontrol EAD (European AIS Database)*. Објављивање се врши у складу са AIRAC (Aeronautical Information Regulation And Control) системом утврђеним од стране Међународне организације цивилног ваздухопловства (International Civil Aviation Organization - ICAO), који прописује стандардизован и координисан начин објављивања ваздухопловних информација, на тачно одређен датум, у прописаним циклусима од 28 дана.

Објављени подаци се преузимају од стране специјализованих организација за припрему и редистрибуцију ваздухопловних података, тзв. *data houses*, као што су Jeppesen (Boeing), NAVBLUE (Airbus), LIDO (Lufthansa) и др. На крају ланца, врши се прилагођавање података за похрањивање у специфичним навигационим базама података FMS-а ваздухоплова, према ARINC 424 стандарду, који дефинише формат и садржај навигационих база. Овај процес спроводе *data houses* или произвођачи FMS опреме, познати као *data packers* (нпр. Honeywell Aerospace и Collins Aerospace).

Током животног циклуса IAP, прикупљају се повратне информације од корисника и анализирају могуће измене у њеној оперативној употреби. Ове информације се користе за континуално одржавање и унапређење процедуре.

Процес пројектовања IAP се спроводи на итеративан начин, при чему се номинална путања дефинише од THR уназад ка IAF и даље, иза ПСС, ка крајњем WP у MAS (missed approach end fix - MAEF). Процес се састоји од две сукцесивне фазе - **фаза конструкције** и **фаза провере** (надвишавања препрека).

Наведени кораци се извршавају у складу са тзв. PANS-OPS (Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations) критеријумима прописаним у [4] од стране ICAO. Иако многе земље директно примењују PANS-OPS критеријуме, постоје и оне које су развиле посебне стандарде за пројектовање процедура, као што су САД, које примењују TERPS (Terminal Instrument Procedures) документ, или Канада, која има тзв. Transport Canada Publication - TP 308 правила. Такође, неке земље уз PANS-OPS критеријуме примењују и додатна национална правила, као што су нпр. Велика Британија (Civil Aviation Publication - CAP 785) и Аустралија (Part 173 of the Civil Aviation Safety Regulations - CASR).

2.3.1. Фаза конструкције

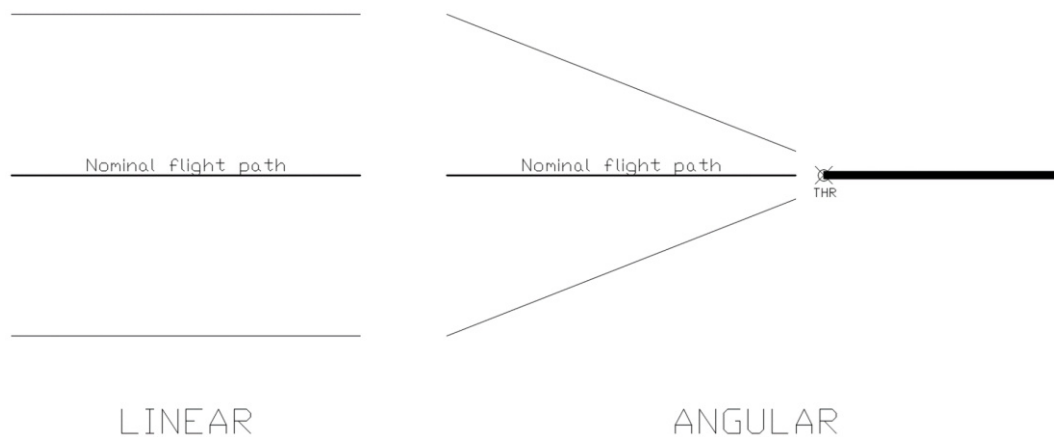
Фаза конструкције обухвата конструкцију номиналне путање и заштитних простора око сваког сегмента IAP. Иако је номинална путања једини оперативно видљив³ елемент процедуре, заштитни простори су неопходни за безбедно надвишавања препрека у зони лета. **Фаза провере** се врши у односу на конструисане заштитне просторе процедуре, и подразумева идентификацију препрека у њиховим границама и прорачун минималних висина за њихово безбедно надвишавање (minimum obstacle clearance altitude - MOCA).

Како је номинална путања статична структура, која се користи за обављање операција различитих типова ваздухоплова, са другачијим брзинама и перформансама, при чему се параметри обављања лета (брзина ветра, температура и сл.) континуално мењају, стварна путања ваздухоплова може у значајној мери да одступа од пројектоване. У том смислу, основна намена заштитног простора је да дефинише теоретски простор скупа оперативно могућих путања

³ У току процеса израде IFP заштитни простори се примењују једино у кораку пројектовања, од стране пројектаната процедура, за утврђивање безбедних висина летења, и нису доступни осталим учесницима у оквиру процеса.

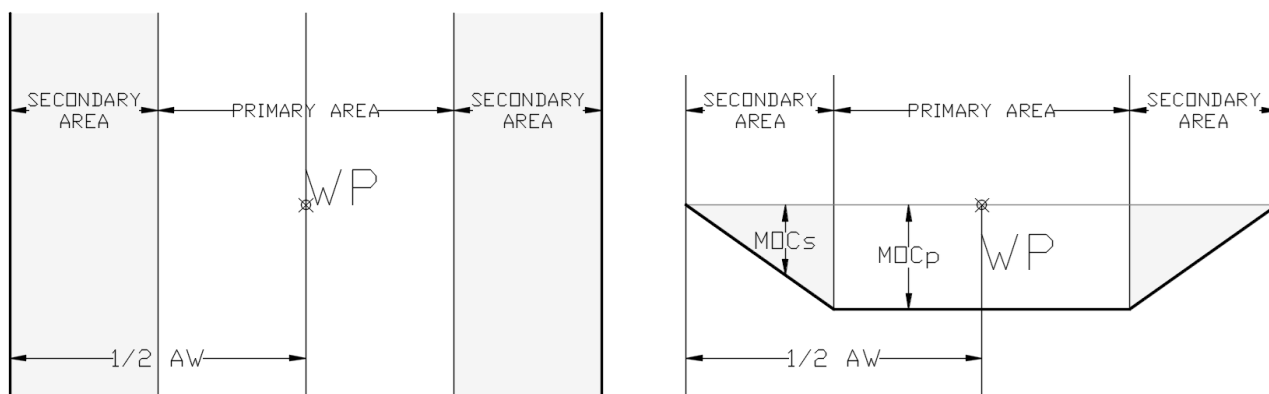
ваздухоплова, прорачунат за најнеповољније услове и параметре лета. Крајње границе заштитних простора представљају статистички добијене регионе, засноване на захтеваним перформансама навигационих система или историјским подацима о саобраћају. Додатно појашњење основних принципа дефинисања заштитних простора дато је у оквиру Прилога 1, као и у поглављу 5.4 Поступак конструкције процедуре.

У општем случају постоје два типа заштитних простора - линеарни и ангуларни (угловни), који зависе од могућности латералног вођења навигационог система (Слика 8).



Слика 8. Типови заштитног простора

Код LPV процедура линеарни тип је заступљен у сегменту почетног прилажења и међуприлажења, као и у завршном сегменту неуспелог прилажења. Овај тип заштитног простора се састоји од примарног и секундарног дела. Основна разлика је у вредности минималног надвишавања препрека (minimum obstacle clearance - МОС), која се примењује на препреке идентификоване у оквиру посматраног заштитног простора. У оквиру примарног заштитног простора примењује се максимална вредност (МОС_р) прописана за дати сегмент, док се у секундарном заштитном простору ова вредност (МОС) линеарно смањује, од максималне вредности до вредности 0 m, посматрано од ивице примарног дела до спољне ивице секундарног дела (Слика 9). Величина која често карактерише латералне димензије заштитног простора је полуширина простора и означава се са $\frac{1}{2} AW$ (area width) [4].

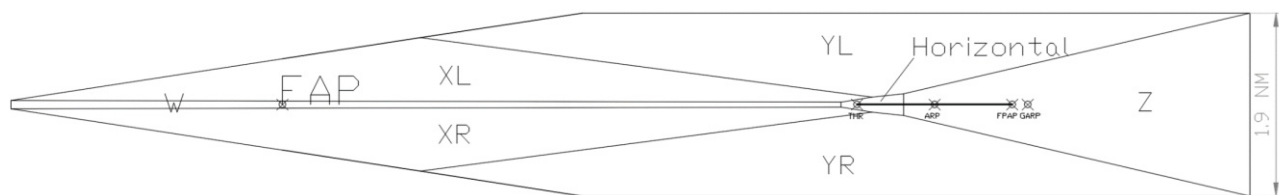


Слика 9. Примарни и секундарни заштитни простор

У случају дефинисаног заокрета на WP, заштитни простор се пројектује по другачијим принципима него код праволинијских сегмената. Ови принципи биће ближе објашњени у оквиру поглавља 5.4 Поступак конструкције процедуре.

Ангуларни тип заштитног простора карактеристичан је за сегмент завршног прилажења, а укључује и почетну и међуфазу сегмента неуспелог прилажења (прецизни сегмент). У случају LPV процедура заштитни простор је заснован на тзв. површинама за процену препрека (obstacle assessment surface - OAS) ILS CAT I процедура (Слика 10). OAS се састоје од шест површи (W, XR, XL, YR, YL и Z) и хоризонталне равни (на нивоу надморске висине THR), које су симетрично

распоређене око продужене осе ПСС. Укупна латерална ширина ОАС ограничена је на вредност од 1,9 NM, односно 3518,8 m, што одговара захтевима прецизности од RNP 0.3 ($\frac{1}{2} AW = 0.95$ NM) [4].



Слика 10. LPV CAT I OAS

2.3.2. Фаза провере

У оквиру фазе провере, утврђује се вредност **МОСА** за сегменте почетног прилажења и међуприлажења, додавањем одговарајућих вредности за минимално надвишавање препрека (МОС). МОС вредност зависи од сегмента примене, као и од положаја препреке у оквиру заштитног простора (примарни/секундарни део). У општем случају, МОСА се добија као максималан збир надморске висине препреке ($OBST_{ELEV}$) и прорачунате МОС вредности (Слика 3):

$$MOCA = \max_{i \in [1, N]} (OBST_{ELEV_i} + MOC_i) \quad (1)$$

где N представља укупан број препрека идентификованих у оквиру посматраног заштитног простора.

Добијене вредности МОСА чине основу за утврђивање процедуралних висина (procedure altitude - PROC ALT). **PROC ALT** представљају унапред дефинисане апсолутне висине⁴, којима се осигурава безбедан лет по стандардним градијентима понирања (descent gradient - DG) и усклађеност са оперативним захтевима. За разлику од МОСА, које се дефинишу за сегмент, PROC ALT се обично везују за WP (IAF, IF и FAP) и користе се за дефинисање вертикалног профила лета, којим се омогућава стабилизovan прилаз и слетање

Улога PROC ALT је веома битна и за избегавање тзв. Controlled Flight Into Terrain (CFIT) акцидента, који настају када ваздухоплов, под пуном контролом пилота, нехотице оствари удар у терен, воду или препреку, при чему у том тренутку летачке посаде углавном нису свесне дате опасности, и прекасно реагују у циљу избегавања колизије. Појава ових и сличних безбедносних догађаја код већих ваздухоплова је у највећем броју случајева забележена у фази лета када су ваздухоплови поравнати са правцем ПСС, на удаљености до 19 km (10 NM) [4].

У оквиру сегмента завршног прилажења, главни резултат фазе провере представља **ОСА/Н** вредности. Ова вредност се добија на сличан начин као и МОСА, с тим што се у обзир узимају само препреке које пробијају ОАС површи. Вредност МОС у овом случају одговара вредности губитка висине (height loss - HL), одређену према категоријама брзина ваздухоплова. HL представља толеранцију која обухвата потенцијални губитак висине ваздухоплова приликом преласка из режима слетања у сегмент неуспелог прилажења.

Поред наведених излаза фазе провере, у сегменту неуспелог прилажења утврђује се и градијент пењања (climb gradient - CG), који је неопходан за безбедно надвишавање препрека приликом транзиције из режима слетања на прописану путну тачку/висину. **CG** се дефинише у односу на критичну препреку, чија је надморска висина увећана за МОС вредност карактеристичну за MAS.

⁴ Апсолутна и надморска висина се дефинишу у односу на средњи ниво мора (mean sea level - MSL), док се релативна висина дефинише у односу на специфично усвојену референтну тачку. Самостално употребљен термин висина односи се по правилу на апсолутну висину.

3. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Академски допринос развоју ИФР у претходном периоду није био значајан у поређењу са другим аспектима области управљања ваздушним саобраћајем (Air Traffic Management – АТМ). Међутим, увођење концепта РВН и примена напредних технологија у области сателитске навигације отворили су нове могућности за пројектовање ИФР, чиме је омогућен нагли пораст броја научних радова и студија у последњој деценији. Ипак, главни интерес био је усмерен на друге типове ИФР, док је развој IAP остао у другом плану, упркос растућим индустријским потребама.

Један од кључних разлога зашто су IAP остале изван домена ширег академског интересовања лежи у сложености њихове природе и специфичности израде. Искуство у вези са имплементацијом и наменом IAP ограничени су на узак круг професионалаца са специјализованим знањем, што отежава идентификовање евентуалних проблема и повезивање ове теме са академском заједницом. Овај недостатак разумевања, који је у одређеној мери присутан и код оперативног особља контроле летења и летачких посада, доводи до тога да истраживачи избегавају овај домен, усмеравајући своје напоре на аспекте који су технички мање захтевни или концептуално јаснији.

Уколико се литература анализира у контексту уже границе домена оптимизације IAP, број доступних истраживања постаје још мањи. Табела 1 даје преглед одабраних радова, са детаљима који истичу кључне карактеристике сваког истраживања. Овај преглед пружа увид у главне атрибуте и факторе који указују на постепени раст заинтересованости за ову тему, али истовремено истиче и недовољно истражене аспекте који представљају потенцијал за будуће научне доприносе.

Табела 1. Преглед радова из домена оптимизације IAP

Год.	Назив публикације	Критеријум оптимизације	Тип IAP	Метод генерисања процедуре
2024	Research on Optimization of Approach Procedures for Airports in an Alpine Environment [31]	Fuel burn	PBN, није прецизирано	нова делимична процедура, са задатим почетним WP
2023	Generation of RNP Approach Flight Procedures with an RRT* Path-Planning Algorithm [32]	Flight path length	RNP AR APCH	нова делимична процедура, са задатим почетним WP и висинама на FAF и IF
2022	DRL-RNP: Deep Reinforcement Learning-Based Optimized RNP Flight Procedure Execution [33]	Fuel burn	RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре
2022	RNP AR Approach Route Optimization Using a Genetic Algorithm [34]	Flight path length	RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре
2020	Automating the Design of Instrument Flight Procedures [35]	вишеструки, није прецизирано	RNP APCH LNAV/VNAV	нова или модификација постојеће процедуре
2020	Modified Depth-First Search for the Automated Design of RNAV Approach Procedures [36]	није прецизирано	RNP APCH LNAV/VNAV	модификација генеричке делимичне процедуре
2020	The influence of shape and density of exemplary city areas on the possible benefit of optimized noise abatement A-RNP and RNP-AR procedures [37]	Noise Level	A-RNP / RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре
2019	Multi-objective trajectory optimisation on environmental impacts [38]	Noise and Emissions Level	RNAV, није прецизирано	нова делимична процедура, са задатим почетним висинама
2018	Noise mitigation optimization of A-RNP /RNP AR approaches [39]	Noise Level	A-RNP / RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре
2015	Optimization of Approach Trajectory Considering the Constraints Imposed on Flight Procedure Design [40]	Fuel Burn	RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре
2014	A Realistic Flight Path Parameterization for Calculation of Noise Minimal Trajectories using Bi-level Optimal Control [41]	Noise Level	RNP AR APCH	модификација постојеће делимичне процедуре

Год.	Назив публикације	Критеријум оптимизације	Тип IAP	Метод генерисања процедуре
2012	Optimization approaches of aircraft flight path reducing noise: Comparison of modeling methods [42]	Noise Level	није прецизирано	модификација постојеће делимичне процедуре
2012	3D Flight Path Planning based on RRTs for RNP Requirements [43]	Flight path length	RNP AR APCH	нова делимична процедура, са задатим почетним WP
2011	Development of a Multi-Event Trajectory Optimization Tool for Noise-Optimized Approach Route Design [44]	Noise Level	RNAV + RF leg	модификација постојеће делимичне процедуре
2011	Optimization of area navigation noise abatement approach trajectories [45]	Noise Level	RNAV 2D/3D + RF leg	модификација постојеће делимичне процедуре
2006	Framework for RNAV trajectory generation minimizing noise nuisances [46]	Noise Level	RNAV, није прецизирано	нова делимична процедура, са задатим почетним WP и/или висинама
2005	Generic and site-specific criteria in the optimization of noise abatement trajectories [47]	Noise Level	није прецизирано	модификација постојеће делимичне процедуре

Дати преглед указује на значајан раст броја научних радова у последњој деценији, што је у корелацији са развојем и еволуцијом ИСАО критеријума за пројектовање IAP. Истовремено, издавају се одређене доминантне карактеристике које дефинишу приступ проблему оптимизације IAP у постојећој литератури. Ове карактеристике се суштински разликују од приступа заступљеног у оквиру овог истраживања, што додатно истиче оригиналност и допринос овог рада.

Формулација проблема. У већини досадашњих истраживања проблем оптимизације IAP постављен је као проблем (оптимизације) планирања путање (path planning (optimization) problem). Међутим, као што је објашњено у претходним поглављима, основна сврха IAP је осигурање безбедних висина летења путем одговарајућег надвишавања препрека унутар заштитног простора, који је дефинисан неизвесностима у ваздухопловној навигацији. У том контексту, облик номиналне путање IAP има секундарни значај, с обзиром на то да је стварна путања ваздухоплова између две путне тачке резултат динамичких фактора који се континуално мењају. Због тога номинална и стварна путања готово никада нису идентичне.

Сличан аргумент се може применити и на приступ проблему са аспекта оптимизације трајекторије ваздухоплова, који, поред латералне компоненте, укључује и промену путање лета у времену. Овај приступ одступа од концепта IAP као статичке структуре, чији је примарни циљ да омогући безбедно и ефикасно обављање операција ширег спектра ваздухоплова у различитим оперативним условима. Ова разлика истиче потребу за преиспитивањем постојећих метода оптимизације како би биле ближе специфичностима IAP.

Избор критеријума оптимизације. Други значајан аспект односи се на избор критеријума оптимизације. Најчешће коришћени критеријуми, као што су ниво буке или потрошња горива, нису у складу са основним захтевима за пројектовање IAP. Ови захтеви ограничавају измене процедура на оне које су искључиво у функцији избегавања препрека. Ово се посебно односи на елементе IAP који могу утицати на повећање комплексности обављања операција, као што су увођење бочног (offset) прилаза или повећање угла понирања (glide path angle - GPA).

Основни принцип пројектовања IAP, као најкритичнијег типа процедура, подразумева да је безбедност операција примарни фактор приликом доношења одлуке о коначном решењу. Чак и модели који имају за циљ оптимизацију (тј. минимизацију) дужине путање ваздухоплова [32], [34] и [43], често одступају од овог принципа. На пример, довољна дужина сегмената путање, посебно у фазама међуприлажења и завршног прилажења, кључна је за обезбеђивање стабилног прилаза и безбедног слетања. Скраћивање ових сегмената могло би негативно утицати на радно оптерећење летачких посада, јер би ограничено време за доношење одлука и извршавање неопходних активности могло довести до повећања стреса и смањења оперативне ефикасности. Из овог разлога, оправданост и прикладност употребе критеријума минимизације путање у оптимизацији IAP доводе се у питање.

Ова ограничења указују на потребу за поновним разматрањем критеријума оптимизације, уз доследно стављање акцента на безбедност као примарни циљ. Еколошки и економски фактори, иако важни, морају бити подређени овом циљу и разматрани преваходно у некритичним фазама лета.

Примена критеријума и комплетност решења. Модели представљени у анализираним радовима показују недоследност у примени прописаних критеријума пројектовања IAP, често генеришући решења која их делимично задовољавају. Већина радова фокусира се на оптимизацију путање у хоризонталној равни, док је вертикална компонента, кључна за безбедно извршавање операција, често занемарена или недовољно разматрана. Такав приступ ограничава проверу добијених решења са аспекта оперативне употребе, захтевајући значајан додатни рад како би се омогућила њихова имплементација.

С обзиром на то да су постојећи критеријуми засновани на статистичким анализама и научно потврђеним методама, свако одступање од њих подразумева спровођење додатних процеса доказивања, сертификације и безбедносних провера. Осим тога, ниједан од разматраних модела не приступа решавању проблема на свеобухватан начин. У свим случајевима сегмент неуспелог прилажења, који представља критичну и неопходну компоненту IAP, у потпуности је изостављен, што додатно ограничава примењивост добијених решења.

Начин генерисања путање. Сви разматрани модели полазе од неких унапред дефинисаних улазних вредности, најчешће у облику референтне путање, као основе за генерисање оптимизоване путање IAP. Главни принцип овог процеса је минимална модификација постојеће путање, уместо њеног потпуног генерисања из почетка. Одређени модели додатно ограничавају процес путем дефиниције појединих путних тачака, било у погледу њихове локације или висине. Овакав приступ сужава простор решења, ограничавајући могућност истраживања алтернативних IAP које би могле имати карактеристике вишег квалитета.

Оперативна примена. С обзиром на непотпуност у примени критеријума и генерисању процедура које наведени модели нуде, јасно је да оперативна примена ових решења тренутно није изводљива. Радови из табеле углавном су усмерени на навигациону спецификацију RNP Authorization Required (AR) APCN и примену тзв. Radius-to-Fix (RF) заокрета. Овај приступ се вероватно ослања на једноставнију геометрију заштитног простора ових IAP и на могућност употребе RF кружних заокрета у завршним сегментима прилажења, што олакшава генерисање решења у датом контексту. Иако овај приступ може проширити скуп доступних решења, поново се намеће питање његовог утицаја на обављање операција и оптерећење летачких посада. Извођење заокрета у непосредној близини тачке слетања или одлуке о слетању значајно повећава радно оптерећење и стрес летачких посада, што може имати контрапродуктивне ефекте. Могућност извођења RF заокрета није универзална функција свих модерних ваздухоплова, што значајно ограничава њихову примену, па се њихова употреба углавном препоручује када саобраћајна ситуација то захтева [14].

Са друге стране, имплементација RNP AR APCN процедура представља сложен и дуготрајан процес који захтева испуњење бројних додатних предуслова са аспекта регулативе, пружаоца услуга контроле летења и корисника. RNP AR APCN процедуре заснивају се на специфичном скупу критеријума [48], који, иако ослоњени на PANS-OPS критеријуме, представљају засебан регулаторни оквир. Овај оквир захтева додатну обученост пројектаната процедура, летачких посада и контролора летења. Поред тога, неопходно је дефинисање националних захтева од стране цивилних ваздухопловних власти за примену различитих нивоа ауторизације, што је обавезан предуслов за оперативну употребу ових процедура.

Додатно, имплементација RNP AR APCN процедура укључује спровођење безбедносне процене познате као *Flight Operational Safety Assessment (FOSA)*, коју обично изводе оператери ваздухоплова. Овај процес захтева значајне људске ресурсе, време и финансијска улагања. Истовремено, пружаоци услуга контроле летења дужни су да спроведу специфичне безбедносне активности у складу са својим системом управљања безбедношћу (*Safety Management System - SMS*), као и додатну валидацију из ваздуха. Овај корак представља изазов због ограниченог броја

организација које имају адекватно опремљен ваздухоплов и обучено особље за активности валидације RNP AR APCH процедура, што повлачи и значајне финансијске издатке.

Тренутно, у Европи је мање од 13% ваздухоплова, односно укупно око 3000, декларисано као способно да испуни специјалне услове ауторизације за обављање ових операција [49]. С обзиром на сложеност и трошкове процеса имплементације, оправданост и одрживост оваквих решења често не могу бити подржани када је примарни циљ мање проширење капацитета аеродрома. Због тога, примена ових процедура захтева пажљиву процену и стратешко планирање како би се осигурала дугорочна корист, уз задржавање највишег нивоа безбедности.

Један од значајних изазова у примени RNP AR APCH процедура односи се на ограничену прецизност вертикалне компоненте у оквиру поступка 3D вођења ваздухоплова. Ова компонента заснива се на барометарском висиномеру (Baro-VNAV) и омогућава оперативне минимуме, тј. висину одлуке до 250 ft (75 m), што ове процедуре сврстава ван категорије процедура за прецизно прилажење.

Поред тога, ослањање на барометарски висиномер може довести до значајних безбедносних импликација, укључујући повећан ризик од контролисаног лета у терен (*Controlled Flight Into Terrain - CFIT*) [50]. Барометарски висиномер је подложен грешкама у подешавању притиска, где свака грешка од 1 hPa може довести до одступања од 30 ft (9 m), што је посебно критично у завршним фазама прилаза, нарочито у хладним временским условима, када се висина ваздухоплова приказује вишом него што стварно јесте. Утицај температуре, комуникацијске грешке између пилота и контроле летења, као и нетачан пренос QNH притиска (локални притисак коригован у односу на средњи ниво мора) додатно угрожавају безбедност. Мере предложене у оквиру [50] укључују примену 3D процедура које нису подложне грешкама барометарског подешавања, строгу примену стандардних процедура, коришћење безбедносних система, као што су *Terrain Avoidance and Warning System* (TAWS) и *Minimum Safe Altitude Warning* (MSAW), као и едукацију посада и контролора о значају тачног подешавања висиномера.

Због наведених разлога, увођење RNP AR APCH процедура препоручујемо се само у ситуацијама када због услова терена, препрека или раздвајања ваздухоплова није могуће имплементирати друге 3D прилазе из RNP APCH навигационе спецификације [14].

Као главни закључак прегледа расположиве литературе, истиче се да је основни недостатак недовољно познавање и разумевање предметног проблема, уз занемаривање његових специфичности и сложене структуре. Превелика и прерана апроксимација проблема омогућила је његово третирање различитим математичким алатима, али је практична примена таквих решења упитна, па чак и неизвесна у будућности.

Резултати објављени у радовима [35] и [36] блиско су повезани са основним концептом аутоматизованог пројектовања IAP који се заступа у овом истраживању. Међутим, ови радови разматрају процес пројектовања процедура из шире перспективе, усмерени су на Baro-VNAV процедуре (бар у иницијалном истраживању) и садрже поједине недостатке по питању комплетности и могућности независног генерисања решења. Додатно, оба рада припадају истом истраживачком пројекту који се спроводи за потребе америчке Федералне ваздухопловне администрације (*Federal Aviation Administration - FAA*), тако да је доступност информација о конкретном моделу и методу оптимизације ограничена, и сведена на демонстрацију концепта.

У том смислу, модел који ће произићи из овог истраживања има за циљ да превазиђе ове недостатке кроз интегрални приступ који ће узети у обзир све кључне аспекте и специфичности проблема. Модел ће бити заснован на дубљем разумевању структуре и ограничења IAP, са фокусом на безбедност и оперативну примену, али и на иновативност која ће омогућити да предложена решења буду не само теоријски утемељена, већ и практично примењива у реалним оперативним условима. Овакав приступ има за циљ да успостави равнотежу између математичке ефикасности и оперативне изводљивости, доприносећи дугорочном унапређењу и оптимизацији IAP процедура.

ДЕО II

МОДЕЛИРАЊЕ ПРОБЛЕМА



4. МЕТОДОЛОГИЈА РАДА

Сврха овог поглавља јесте приказ примењене методологије за успостављање модела за решавање проблема оптимизације IAP.

За потребе моделирања проблема изабран је приступ заснован на процедури описаној у [51], који развој студије операционих истраживања описује кроз низ општих, међусобно повезаних фаза, које су додатно прилагођене за потребе овог рада:

1. Дефинисање проблема и прикупљање података;
2. Одређивање тежине и типа проблема;
3. Формулација математичког модела;
4. Избор метода за решавање проблема;
5. Тестирање и прилагођавање модела и/или метода;
6. Финална припрема и примена модела.

Предуслов за почетак примене изабране методологије представља дефинисање основног предмета и очекивања од математичког модела, чиме се обезбеђују почетне инструкције за даљи ток процеса моделирања проблема, посебно у домену избора адекватног метода за решавање проблема.

4.1. Предмет и задаци модела

Основни предмет модела представља пројектовање описаних LPV процедура. Главни задатак модела се може дефинисати као успостављање аутоматизованог процеса за испитивање могућности пројектовања LPV процедура на аеродромима, у складу са PANS-OPS критеријумима, уз обезбеђивање оптималних вредности оперативних минимума за слетање и квалитета процедуре са аспекта њене употребе.

Могућности пројектовања LPV процедура, поштујући наведена начела, првенствено зависе од локалних услова на аеродрому, који се тичу карактеристика и конфигурације терена и постојања вештачких објеката у његовој околини. И док су критеријуми за пројектовање и одређивање оперативних минимума у односу на ове услове јасно дефинисани, тренутно не постоји утврђен метод ни појединачни принципи за оцењивање квалитета прилазне процедуре.

У пракси, појединачне повратне информације о квалитету процедуре се могу добити на основу експертског мишљења летачких посада, али оне су обично квалитативног типа и веома често имају субјективан карактер, који умањује могућност објективне оцене процедуре. Додатну ограничавајућу околност представља чињеница да су ове информације доступне пројектантима тек након увођења процедуре у оперативну употребу, а не у тренутку њеног настанка.

У том смислу, у циљу испуњења главног задатка модела, неопходно је установити потпуно нов механизам за оцењивање квалитета LPV процедура, који ће пружити јасан начин квантификовања квалитета процедуре, већ у оквиру процеса њеног пројектовања. Овакав механизам би обезбедио одступање од постојеће праксе, која подразумева проналажење најбољег решења у оквиру дуготрајног и сложеног итеративног процеса пројектовања различитих варијанти процедура, који је у већини случајева заснован на интуицији и искуству појединачног пројектанта, често без загарантованог успеха и уз захтеве за накнадним изменама процедуре.

Да би се овај циљ остварио, потребно је дефинисати математички модел, који ће на веродостојан начин обезбедити приказ проблема. Моделом би се успоставила веза са напредним математичким техникама, који у рачунарском окружењу могу на знатно ефикаснији и ефективнији начин да решавају проблеме велике сложености [51]. Математичке технике у смислу овог рада подразумевају поступне процедуре, којима се, у итеративном поступку, корак по корак извршава низ прорачуна или инструкција и које се називају алгоритми [52].

5. ДЕФИНИСАЊЕ ПРОБЛЕМА

Циљ ове фазе моделирања јесте да се предметни проблем структурира на најбољи могући начин, како би била извршена његова даља апроксимација за потребе формулације математичког модела. Из тог разлога ова фаза сматра се једном од најважнијих у процесу моделирања проблема, јер од начина поставке проблема зависи могућност доласка до најквалитетнијих доступних решења.

У ту сврху потребно је дефинисати границе посматраног проблема и процесе који прописују међусобне односе унутар проблема (који обухватају улазне и излазне променљиве, параметре и ограничења), а посебно и факторе који утичу на квалитет решења.

Поред тога, потребно је дефинисати адекватне улазне податке неопходне за извршавање и рад модела, који ће бити добијени из препознатих извора и задовољавати захтевани ниво квалитета неопходан за добијање довољно добрих решења.

5.1. Поставка проблема

Основни проблем у оквиру постојећег процеса пројектовања LPV процедура подразумева конструкцију процедуре у складу са прописаним критеријумима, уз обезбеђивање што ниже вредности оперативних минимума за слетање.

Како оперативни минимуми директно зависе од постојања препрека у околини аеродрома, примарни задатак пројектовања процедура се може свести на дефинисање оперативно изводљиве путање за избегавање значајних препрека, која ће омогућити безбедно слетање на аеродром.

Према [53]: „процена безбедносних ризика процедуре за инструментално летење се сматра извршеном када је пројектовање процедуре спроведено у складу са регулаторним оквиром прописаним од стране државе“. У случају када се држава определила за директну и потпуну примену документа ICAO Doc 8168 PANS-OPS, Volume II - Construction of Visual and Instrument Flight Procedures [4] (што је најчешћи случај, бар у Европи), процедура се сматра безбедном када не одступа од прописаних PANS-OPS критеријума. У супротном, захтева се спровођење посебне процене безбедносних ризика процедуре за оне елементе који одступају од прописаних критеријума. Услед значајне флексибилности којом пројектант располаже приликом пројектовања LPV процедура, овај проблем добија шире димензије. Поједина решења, чак и када су сви критеријуми испуњени, могу на оперативном нивоу довести до усложњавања активности приликом обављања операција слетања, па се поставља питање да ли ова констатација и у ком обиму важи за све процедуре?

Како је фаза слетања критична по питању радног оптерећења и стреса летачких посада (фаза лета са највећим бројем забележених удеса [18]), свако додатно оптерећење може утицати на повећање вероватноће испољавања оперативних грешака летачких посада, што може угрозити безбедност летења. Међутим, могућности пројектанта да унапред извршити оцену и обим евентуалног утицаја пројектоване процедуре на њену оперативну примену са поменутих аспеката су веома ограничене.

Када се уз захтеве пројектовања процедуре додају и други реални фактори, као што су питање заштите од буке и емисије штетних гасова, који брину локалне заједнице у околини аеродрома, или смањење потрошње горива и времена летења, из угла трошкова ваздухопловних компанија, коначно решење које понуди пројектант мора да помири веома супротстављене прохтеве различитих страна.

У циљу осигуравања безбедности процедуре, приликом пројектовања решења, које претходи имплементацији ових додатних захтева, потребно је утврдити оквир који не би требало напуштати. Из тог разлога, у процес пројектовања процедура неопходно је укључити и факторе који дају информације о сложености активности које обављају летачке посаде. Као један од најбољих индикатора за ове потребе, намеће се појам комплексности операција летења.

Одређивање комплексности би обезбедило недостајућу квантитативну оцену, која би на посредан начин пружила одговоре на безбедносна питања утицаја процедуре на оперативно окружење, али би и представљала нову меру приликом дефинисања квалитета пројектоване процедуре, чиме би и коначан избор решења био олакшан.

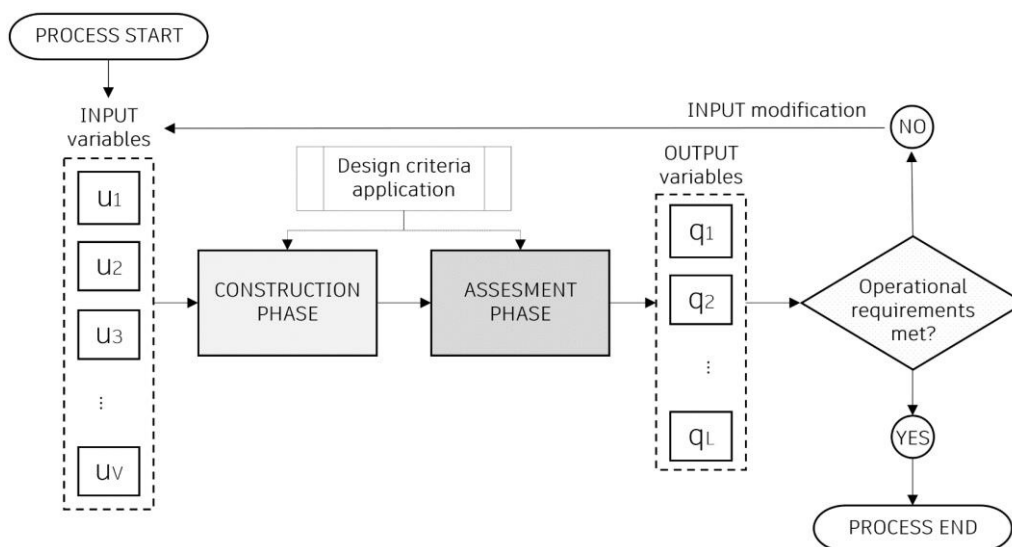
Иако је комплексност, као објективна мера радног оптерећења, углавном разматрана са аспеката рада контролора летења ваздушног простора, у различитим фазама лета, у литератури не постоје примери њене директне примене у оквиру критеријума за потребе пројектовања процедура за инструментално летење.

Генерално гледано, целокупан домен пројектовања процедура за инструментално летење, услед специфичности и сложености самог задатка, налази се ван фокуса научних истраживања, и свака активност на овом пољу тренутно представља почетни корак у оквиру кога се иницијално не може очекивати значајна подршка од стране расположиве научне или стручне литературе. Освежење на овом пољу свакако представља најновије истраживање у оквиру [54], које квалитет IFR разматра из аспекта статистичке анализе.

За потребе описа проблема постављен је и скуп општих претпоставки, које су представљене у поглављу 5.6.

5.2. Концепт пројектовања процедура

У циљу лакшег описа проблема за потребе дефинисања математичког модела, на следећој слици (Слика 11) приказан је уопштен и поједностављен приказ тока активности у оквиру једне итерације процеса пројектовања процедура. Приказ је базиран на општем процесу пројектовања IAP, описаном у оквиру поглавља 2.3.



Слика 11. Постојеће активности у процесу пројектовања процедура

На левој страни слике дат је низ улазних променљивих u_v ($v = 1, 2, \dots, V$), на основу којих се спроводи поступак конструкције процедуре. Улазне променљиве представљају скуп узастопних одлука, које пројектант доноси у оквиру поступка постепене конструкције процедуре. Овим одлукама директно се утиче на латералне и лонгитудиналне димензије номиналне путање и заштитног простора процедуре тј. њених хоризонталних граница.

Поступак конструкције процедуре вођен је у оквиру граница дефинисаних вредностима параметара и ограничењима, који произилазе из PANS-OPS критеријума.

Улазне променљиве, параметри и ограничења искоришћени у оквиру поступка конструкције процедура представљају улазне податке, који морају бити познати на самом почетку поступка пројектовања.

Након тога се, у односу на препреке идентификоване у оквиру конструисаних заштитних простора, спроводи анализа надвишавања препрека, на основу које се дефинишу вертикалне или висинске границе процедуре.

Уколико је утврђено да су сви критеријуми, укључујући оперативне захтеве испуњени, добијамо низ вредности излазних променљивих q_i ($i = 1, 2, \dots, L$), приказаних на десној страни слике. Излазне променљиве представљају резултате поступка анализе надвишавања препрека, који се прорачунавају индиректно у односу на изабране вредности улазних променљивих. Путем успостављене везе улазних и излазних променљивих, пројектант контролише границе и услове оперативне употребе процедуре.

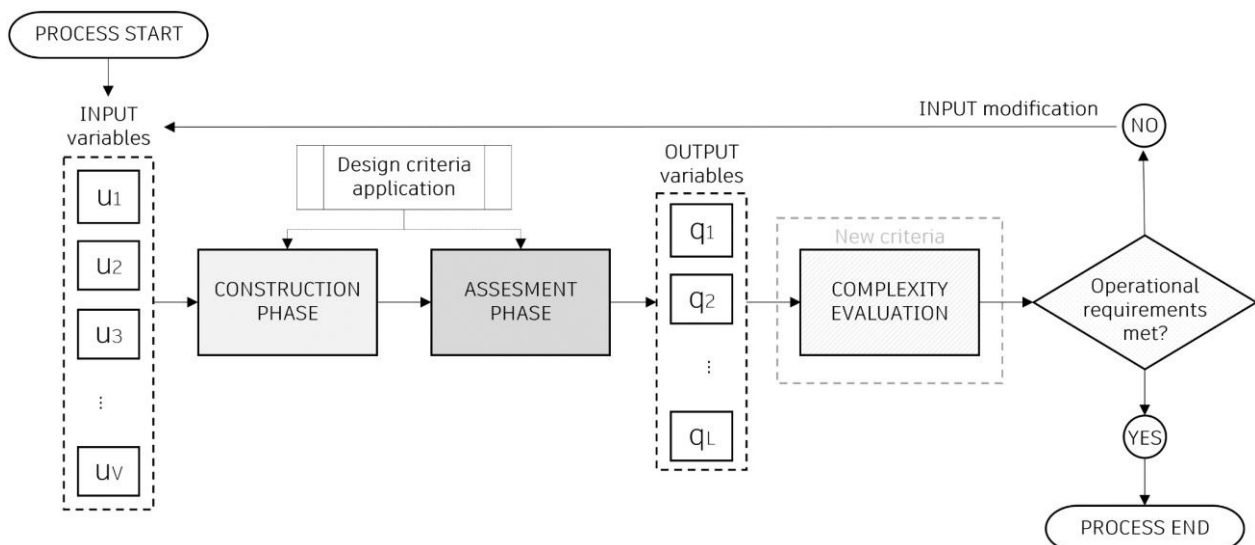
На крају процеса пројектовања добијамо скуп вредности улазних и излазних променљивих, које дефинишу процедуру са свим њеним сегментима, тј. добија се комплетно решење. Овакво решење се зове стандардно решење или стандардна процедура.

У случају када неки од критеријума пројектовања нису испуњени, пројектант се враћа на почетак процеса и врши корекцију улазних променљивих. Процес пројектовања процедуре траје док се не добије комплетно решење.

Када процес пројектовања није могуће завршити добијањем комплетног решења, у складу са прописаним критеријумима, процес пројектовања, тј. претраге решења се може наставити у домену нестандардних решења.

Нестандардно решење је оно које садржи један или више елемената процедуре, чија вредност превазилази границе прописане у оквиру PANS-OPS критеријума. У сврху одобравања оваквих решења захтева се израда посебне ваздухопловне студије (aeronautical study), у оквиру које ће бити процењени безбедносни ризици тих одступања по обављање операција летења. Типичан пример нестандардног елемента процедуре јесте примена вредност угла понирања већег од 3.5° , у сегменту завршног прилажења. Тако пројектоване процедуре се називају прилазима под стрмим углом (steep angle approaches).

У сврху превазилажења проблема и ограничења идентификованих приликом дефинисања предмета и задатака модела у постојећем процесу пројектовања процедура (поглавље 4.1), предложено је проширење постојећег концепта, увођењем додатне активности - оцене комплексности, у циљу процене квалитета добијеног решења (Слика 12, извор: [55]):



Слика 12. Проширене активности у процесу пројектовања процедура

На овај начин би се обезбедило квантификовање процедура са аспекта комплексности њене оперативне употребе, што би донело користи приликом пројектовања стандардних решења, а уједно олакшало аргументовање примене нестандардних решења.

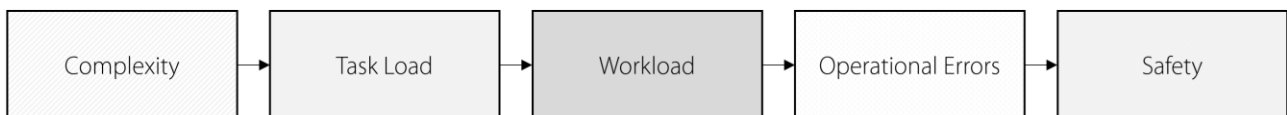
Имајући на уму обим критеријума примењивих у оквиру процеса пројектовања процедура, у наставку рада акценат ће бити стављен на критеријуме употребљене за потребе моделирања LPV процедура, уз опис и образложење претпоставки искоришћених приликом утврђивања граница проблема. Преглед моделирања је дат по активностима, почевши од дефинисаног начина оцењивања комплексности IAP.

5.3. Оцена комплексности процедура

Комплексност прилазне процедуре са аспекта летачке посаде, идентификована је као базични критеријум за оптимизацију и одређивање квалитета процедура. Овај избор направљен је на основу раније доказане везе, која успоставља посредну релацију између утврђеног нивоа комплексности са почетне стране, и безбедности обављања операција летења, са крајње стране. Ова веза је утврђена у низу радова који су обједињени у оквиру [56], као и у оквиру [57].

Основна идеја је да се индикатори комплексности искористе за прелиминарну процену утицаја оперативног окружења на радно оптерећење (workload) човека, преко оптерећења задацима (task load), као посебно утврђеног медијатора. Оптерећење задацима представља мерљиву замену за радно оптерећење, која потпада у објективну категорију.

Шематски приказ упрошћене везе приказан је на следећој слици (Слика 13).



Слика 13. Веза комплексности и безбедности

На овај начин избегнута су ограничења претходно примењених критеријума оптимизације процедура, и дефинисан је употребљив критеријум који омогућава добијање квантитативне везе са крајњим корисницима, тј. информација о сложености обављања операција у односу на предложену процедуру.

Регулацијом критеријума комплексности IAP, доносиоци одлука могу да индиректно, путем промене оптерећења задацима, утичу на редукцију радног оптерећења летачких посада. На тај начин смањује се вероватноћа испољавања грешака на оперативном нивоу, а самим тим и повећава ниво безбедности операција летења [31].

У оквиру овог рада, као иницијални корак успостављања појма комплексности IAP, процењени су искључиво статички фактори утицаја структуре и геометрије процедуре на крајњу оцену сложености операција летења. Основни принципи статичког аспекта комплексности код процедура препознати су и објашњени кроз неке раније радове [58], [59]. За потребе овог рада није разматрана димензија динамичке комплексности IAP процедура, која може имати значајан утицај на оперативну примењивост пројектоване процедуре у зависности од доминантних метеоролошких услова на аеродрому. Први напори у овом смеру направљени су у оквиру [29], и произилазе из основе комплексности IAP постављене у оквиру овог истраживања.

Примарни концепт оцене комплексности IAP, заснива се на мерењу одступања вредности елемената примењених приликом пројектовања процедуре, у односу на утврђене оптималне вредности тих елемената. Практична примена овог концепта подразумева мерење одступања примењених и оптималних вредности за изабране променљиве x , које могу припадати групи улазних (u_v) и/или излазних (q_f) променљивих у процесу пројектовања IAP.

У следећој формули приказан је предложени начин мерења поменутих одступања на нивоу једног разматраног фактора:

$$CS = \left| \frac{x - x^*}{x^{\max} - x^*} \right|, CS \in [0,1]. \quad (2)$$

У оквиру горње формуле, x представља тренутну, примењену вредност, а x^* оптималну вредност елемента процедуре. Додатно, израз $x^{\max} - x^*$ уведен је у циљу нормализације резултата, услед

различитих домена и димензија променљивих. На овај начин добијају се унифициране излазне вредности на интервалу $[0, 1]$. Вредност x^{\max} представља највеће могуће одступање посматране променљиве од њене оптималне вредности.

Наведена формула подразумева употребу апсолутних вредности, јер се оптималне вредности променљивих разликују, и могу се налазити на границама домена (максимална или минимална вредност) или унутар домена.

Када се посматрају резултати, нижа вредност CS подразумева једноставнији елемент процедуре. Разматрањем датог израза у контексту већег скупа фактора, циљ је да се добију вредности CS приближне или једнаке нули (0), што означава најнижи степен комплексности, односно бољи квалитет процедуре, и обротно.

Уместо разматрања појединачних фактора, за потребе овог рада узети су у обзир сви фактори, тј. променљиве садржане у оквиру математичког модела. Битност сваког појединачног фактора је одређена вредношћу тежинских коефицијената у оквиру функције циља. Ове вредности су изабране у односу на расположиве резултате из претходних студија [60], [61] и [62], као и на основу експертског мишљења према експерименталним проверама математичког модела.

Приказана формулација даље је прилагођена за потребе дефинисања функције циља у оквиру математичког модела. За све додатне информације видети поглавље 7.3 и 7.4.

5.4. Поступак конструкције процедуре

Поступак конструкције процедуре подразумева избор улазних променљивих на основу којих ће се, уз примену прописаних параметара и ограничења, извршити:

- Конструкција номиналне путање;
- Конструкција OAS равни и
- Конструкција заштитних простора.

Конструкција OAS равни и заштитних простора се спроводи на итеративан начин, на основу изабраних улазних вредности за конструкцију номиналне путање, тако да се са аспекта доношења одлука, проблем конструкције процедуре може свести на проблем конструкције номиналне путање.

У оквиру стандардне технологије рада пројектовања процедура, поступак конструкције процедуре се врши „уназад“ - од прага слетања (стварног или фиктивног), супротно од смера лета ваздухоплова који ће користити процедуру. Оваквим приступом се полази од конструкције критичног сегмента процедуре (FAS), што је у складу и са логиком рада FMS рачунара, који прорачун стварне путање (трајекторије) ваздухоплова започиње од дефинисаног прага слетања.

Принцип рада већине програмских алата за помоћ при пројектовању процедура је сличан. На почетку процеса конструисања процедуре потребно је унети вредности улазних података за све сегменте процедуре, укључујући и минималне висине. Након извршене конструкције алат обично даје индикацију пројектанту, о нарушеним PANS-OPS критеријумима за постављене услове, који најчешће подразумевају одступање предефинисаних минималних висина на сегментима у односу на висине и/или градијенте неопходне за безбедно надвишавање препрека (у складу са PANS-OPS критеријумима).

Са аспекта поступка конструкције путање, разликујемо следеће сегменте LPV процедуре (описане у поглављу 2.1):

- сегмент почетног прилажења (скраћено INITIAL сегмент),
- сегмент међуприлажења (скраћено INTER сегмент),
- сегмент завршног прилажења (скраћено FAS сегмент),
- сегмент неуспелог прилажења (скраћено MAS сегмент).

Структура процедуре, односно номиналне путање, разматрана за потребе развоја модела састоји се од следећих елемената (Слика 3):

- 1) IAF – Initial approach fix,
- 2) IF – Intermediate approach fix,
- 3) SDF - Stepdown fix,
- 4) FAP – Final approach point,
- 5) OCH – Obstacle clearance height,
- 6) THR – Threshold,
- 7) MATF – Missed approach turning fix, и
- 8) MAEF – Missed approach end fix.

Примењена структура процедура је дефинисана у складу са основним задацима и наменом модела, и садржи оптималан број елемената како би се пружила једноставна и разумљива решења, која задовољавају захтеве летљивости и одговарају највећем броју локација аеродрома.

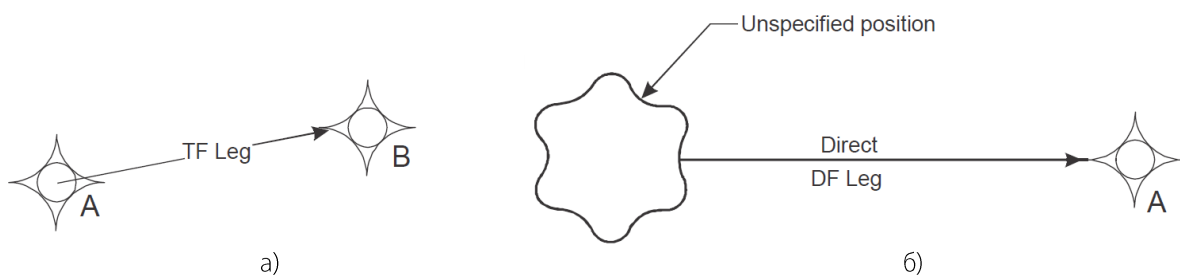
SDF представља фикс, који омогућава додатно снижавање висине на сегменту, идентификацијом тачке након које је контролна препрека безбедно прелетена [4]. Увођење додатног SDF фикса је предвиђено у оквиру INTER сегмента.

Поред броја WP, за потребе дефинисања потпуне структуре процедуре неопходно је одредити и тип WP. Према прописаним критеријумима, *fly-by* тип WP се користи приликом конструкције: IAF, IF, SDF и FAP. Такође, последњи WP у оквиру MAS сегмента се обично пројектује као *fly-by*. Са друге стране, први WP и заокрет се обично пројектују као *flyover*. На овај начин се постиже боља предвидљивост и контрола почетка заокрета, што је на аеродромима са израженим карактеристикама терена пресудно за обављање безбедних операција летења.

Осим наведених карактеристика WP, за потребе попуњавања FMS навигационих база података ваздухоплова, неопходно је дефинисати тип путање на сегменту процедуре, као и специфичан тип њеног завршетка. ово се врши применом одговарајућих двословних кодова који се називају Path Terminator-и (PT). PT представљају посебан скуп правила у оквиру тзв. ARINC Specification 424-15, које FMS чита и, у практичном смислу, дефинише начин извршавања лета [4].

За потребе овог рада и у складу са одређеном структуром процедуре која ће бити моделирана, разматрана су два типа PT:

- **Track to a fix (TF)** се користи на свим сегментима процедуре, осим на последњем (MATF-MAEF) у случају постојања заокрета. TF је примарни PT **за дефинисање праволинијских сегмената** номиналне путање, и одређен је као геодетска путања између два WP (Слика 14, а), извор: [4]).
- **Direct to a fix (DF)** се обично користи у иницијалном делу MAS сегмента, **за дефинисање заокрета** директно, најкраћим путем ка следећем WP (Слика 14, б)). У овом случају, даје се одређен степен слободе приликом обављања заокрета у односу на појединачне перформансе ваздухоплова. DF се углавном користи у комбинацији са *flyover* WP на почетку сегмента, како би се донекле контролисали услови почетка заокрета.



Слика 14. Коришћени PT

5.4.1. Улазни подаци

За потребе пројектовања IAP процедура неопходне су две групе података:

- подаци о аеродрому и
- подаци о препрекама.

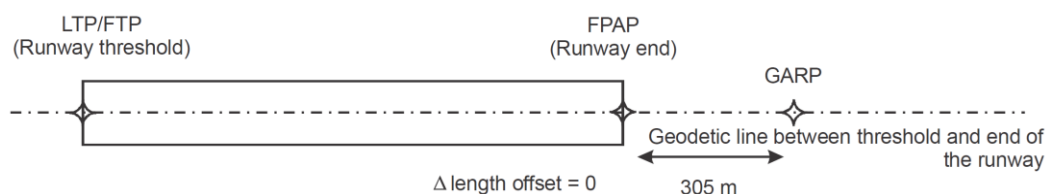
Подаци о аеродрому представљају основу у односу на коју се прорачунавају остали елементи процедуре, и садрже најмање:

- локацију прага (THR),
- надморску висину прага (THR ELEV),
- локацију краја ПСС (RWY END),
- релативну висину на номиналној путањи изнад прага (reference datum height - RDH) и
- локацију аеродромске референтне тачке (aerodrome reference point - ARP).

Податак о ARP је потребан јер се критеријуми за RNP APCH навигациону спецификацију примењују само у радијусу од 56 km (30 NM) од ARP. Ван те зоне примењују се критеријуми засновани на RNP 1 или RNAV 1 спецификацији [4]. Ови подаци се добијају из званичних националних AIP публикација. Вредност RDH обично износи 15 m, односно 50 ft.

Подаци о аеродрому, у ширем смислу, обухватају и додатне елементе, неопходне за правилно пројектовање LPV процедура, који су наведени у наставку текста.

Flight path alignment point (FPAP) – тачка поравњања путање лета, представља тачку која се налази у правцу THR (LTP/FTP), на геодетској линији, и користи се за дефинисање усмерења за потребе навигацијских система на ваздухоплову (Слика 15, извор: [4]).



Слика 15. Параметри за усмерење путање лета

Како се за потребе овог рада примењују критеријуми за пројектовање LPV процедура, под претпоставком да на предметном аеродрому не постоји инсталиран ILS систем, локација FPAP се поклапа са супротним крајем ПСС на коју се слеће (runway end). Када ово није случај, растојање између краја ПСС и FPAP се дефинише као тзв. $\Delta \text{ length offset}$. Додатне информације о дефинисању геометрије летења дате су у [4].

GNSS azimuth reference point (GARP) – референтна тачка GNSS азимута, представља тачку која служи за дефинисање граница бочног отклона (латералне девијације) показивача правца летења на инструментима ваздухоплова.

Налази се иза позиције FPAP, у правцу осе ПСС, на растојању у опсегу од 2 000 до 4 500 m у односу на THR (поступак екстраполације за потребе прорачуна ван овог опсега није дозвољен од стране ICAO). У случају када на аеродрому не постоји ILS систем, узима се фиксно растојање од 305 m (1000 ft) у односу на FPAP, односно крај ПСС [4].

Растојање GARP-THR одговара растојању локације локалајзер уређаја (LOC), код ILS система, и локације прага слетања (THR). Ово растојање је улазни параметар и за пројектовање OAS равни.

Подаци о препрекама, најчешће подразумевају податке о вештачким објектима (антене, стубови, димњаци, ветрогенератори и сл.) и податке о терену (различити дигитални модели терена).

Подаци о вештачким препрекама су, такође, обично садржани у оквиру AIP публикације и пратећим електронским скуповима података. Аеродромске препреке се налазе у оквиру AD секције, а рутне навигационе препреке, у оквиру ENR секције. За потребе пројектовања најбитнији су подаци о локацији и надморској висини препрека. Ови подаци морају задовољити регулаторне захтеве по питању квалитета [63] и резолуције [64], и њихове координате се објављују у односу на WGS 84 референтни координатни систем [4].

Што се тиче дигиталних модела терена, поред AIP, постоје и други извори који обично подразумевају електронске скупове података. Данас је на располагању велики број дигиталних модела терена, који се могу разликовати на основу својих примарних својстава. Најпознатији модели су означени појмовима DTM (digital terrain model) и DEM (digital elevation model). Основна разлика међу њима је у нивоу детаља приказаних висинских података и начину њиховог организовања, односно структуре. DEM модели представљају висинску површину Земље без филтрирања објеката, што може укључивати и вегетацију, зграде и друге препреке, док су DTM модели прецизнија верзија DEM-а, из које су уклоњени сви надземни објекти, остављајући само стварни рељеф тла. Такође, DTM подразумевају базе са тзв. TIN (Triangulated Irregular Network) структуром података, коју чине неправилно распоређене мерене тачке на терену, у облику мреже неправилних непреклапајућих троуглова [65]. Са друге стране, DEM подразумева податке о терену у облику матрице висина терена, која подразумева GRID (решеткасту) структуром података, у облику квадрата [66].

Наведени модели представљају топографске моделе делова или целокупне површине Земље. Они су најчешће добијени путем сателитских снимака, али могу настати и у оквиру поступака као што су фотограмetriја, снимање LIDAR (Light Detection And Ranging) уређајима из ваздуха, применом тзв. InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) технике мапирања путем радарских слика, и др [66]. Ови дигитални модели углавном испуњавају задате критеријуме по питању квалитета података неопходних за спровођење анализа утицаја препрека у процесу пројектовања процедура.

5.4.2. Конструкција номиналне путање

Конструкција номиналне путање се спроводи у оквиру итеративног поступка, до тренутка када су постављени оперативни захтеви остварени. Конструкција се обавља по утврђеним сегментима у односу на вредности улазних променљивих.

Улазне променљиве, као одлуке пројектанта, дефинишу се на нивоу фикса/WP, што представља форму у којој се даље врши њихово кодирање и уношење у (FMS) навигационе базе података на ваздухоплову.

Основне улазне променљиве, неопходне за конструкцију номиналне путање у оквиру сваког сегмента обухватају:

- **усмерење** – праволинијско или са заокретом,
- **дужина** – најкраће растојање између почетног и крајњег фикса и
- **градијент** (угао) понирања или пењања – интензитет промене висине ваздухоплова,

док се код сегмената са заокретом морају, поред **угла заокрета**, дефинисати и вредности **брзине** и **нагиба крила** ваздухоплова. За даље прорачуне и конверзије неопходно је дефинисати висину на сегменту, односно на фиксу. Ова величина представља раније описану **PROC ALT** и прорачунава се у односу на познате вредности основних улазних променљивих.

Стандардне вредности које могу бити додељене улазним променљивама дефинишу њихов опсег или домен. Границе домена, односно минималне и максималне вредности улазних променљивих прописане су PANS-OPS критеријумима [4], и подлежу додатним ограничењима условљеним међурелацијама између улазних променљивих. Границе домена наведених улазних променљивих дате су у наредним табелама (Табела 2 и Табела 3), док су специфичности по сегментима наведене у поглављима која следе.

Табела 2. Опсег основних улазних променљивих

Сегмент	Усмерење	Дужина		Градијент	
		Мин.	Макс.	Стандардни	Макс.
FAS	у правцу продужене осе ПСС	3 NM	10 NM	3.0°	3.5°
INTER	у правцу продужене осе ПСС	2 NM + MSD	10 NM	≤ 2.5% (1.4°)	= GPA
INITIAL	заокрет на IF од највише 90°	MSD	10 NM	4% (2.4°)	8% (4.7°)
MAS	заокрет на MATF од највише 180°	MSD	15 NM	2.5°	5.0°

Из претходне табеле се види да минималне дужине сегмената зависе од постојања заокрета на фиксевима у оквиру њих. У том случају неопходно је прорачунати минимално растојање за стабилизацију ваздухоплова (minimum stabilization distance - MSD), које је функција различитих параметара заокрета, који су објашњени у оквиру поглавља 5.4.2.5.

Градијенти су дефинисани у степенима или процентима, по конвенцији усвојеној за приказивање стопе промене висине ваздухоплова по сегментима.

Табела 3. Опсег брзина ваздухоплова

Сегмент		IAS (kt)				
		CAT A	CAT B	CAT C	CAT D	CAT E
Максимална брзина	INITIAL	150	180	240	250	250
	INTER					
	FAS	100	130	160	185	230
	Inter. MAS					
MAS	110	150	240	265	275	
Минимална брзина	INITIAL	90	120	160	185	185
	INTER					
	FAS	70	85	115	130	155
	MAS	100	130	160	185	230

Минималне и максималне брзине ваздухоплова су дате према категорији ваздухоплова и сегменту процедуре. Вредности брзина приказане су у виду индициране брзине ваздухоплова (indicated airspeed - IAS). За MAS сегмент су дате максималне дозвољене брзине за почетни заокрет (intermediate) и за остале заокрете на сегменту. Сви заокрети могу бити ограничени на intermediate вредност брзине, када постоји оперативна потреба у циљу избегавања критичних препрека. Испод 10000 ft у оквиру C класе ваздушног простора максимална IAS износи 250 kt [1].

Даља употреба ових улазних величина за прорачун заокрета објашњена је у оквиру поглавља 5.4.2.5. За потребе овог рада, фокус је постављен на опсег брзина за CAT C и D ваздухоплова (колоне означене плавом позадином у претходној табели), јер је ово доминантна група која обухвата највећи број типова комерцијалних транспортних ваздухоплова.

Стандардне вредности нагиба крила ваздухоплова (bank angle - BA) износе 25° за заокрете у оквиру INITIAL и INTER сегмената, док та вредност у MAS сегменту износи 15°. Ова вредност се у зависности од ограничења изазваних препрекама, може даље повећати.

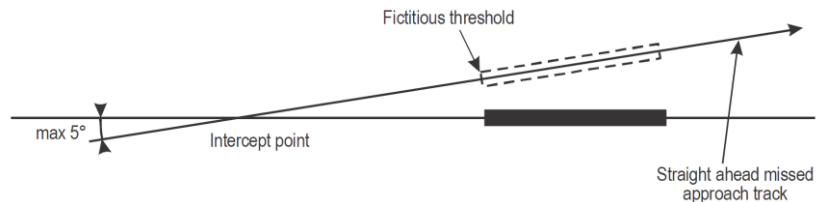
PROC ALT се прорачунава у односу на дужину сегмента и примењени градијент понирања, односно пењања. У случају сегмента са заокретом, у циљу боље предикције промене висине, уместо укупне дужине сегмента између два фикса, користи се стварна дужина (номиналне) путање (track distance - TRD). Начин прорачуна TRD ће такође бити дефинисан у оквиру поглавља 5.4.2.5.

5.4.2.1. FAS

Усмерење

Сегмент завршног прилажења је усмерен, тј. поравнат са продуженом осом стварне или фиктивне ПСС, на основу чега се могу разликовати два типа пројектованог прилаза (Слика 16, прилагођено из [4]):

- **прилаз из правца** (straight-in approach) и
- **бочни прилаз** (offset approach).



Слика 16. Два типа прилаза у оквиру FAS

Прилаз из правца подразумева да је правац номиналне путање поравнат са продуженом осом ПСС (centreline): угао прилаза $\theta = 0^\circ$. У овом случају праг слетања у односу на који се пројектује процедура (fictitious threshold point - FTP) се поклапа са стварним прагом слетања (landing threshold point - LTP): $FTP = LTP$.

Бочни прилаз подразумева да правац номиналне путање сече продужену осу ПСС под неким углом θ . Бочни прилаз се дефинише у ситуацијама када због препрека физички није изводљиво пројектовати прилаз из правца. За дефинисање бочног прилаза потребно је одредити две величине:

- угао прилаза (θ) и
- тачку пресека.

Угао прилаза се дефинише у опсегу $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$, са обе стране ПСС, што је у складу са критеријумима прописаним за прецизан прилаз путем ILS система [4].

Тачка пресека је место пресека правца номиналне путање и продужене осе ПСС (crossing/intercept point), која је утврђена на одговарајућем растојању од прага слетања. Минимално растојање се прорачунава тако да релативна висина на којој номинална путања сече продужену осу ПСС износи најмање 55 m (180 ft) изнад прага слетања.

У случају бочног прилаза FTP се не поклапа са LTP ($FTP \neq LTP$). Дефинише се фиктивна (виртуелна) ПСС, чије карактеристике су идентичне стварној ПСС по питању димензија, надморске висине и осталих параметара, и чији се прагови и референтна тачка налазе на истом растојању од тачке пресека, као и од стварне ПСС.

У оба типа прилаза подразумева се да је FAP у правцу THR (LTP или FTP), односно да је сегмент праволинијски (није дозвољено пројектовање путање са заокретом).

Дужина

Номинална путања се, у случају када је обухваћен и визуелни сегмент, простире од FAP до (LTP или FTP) THR (Слика 3). Уколико се тачка заокрета (MATF) у MAS сегменту налази испред THR, ова дужина се рачуна од FAP до MATF.

У оба случаја, минимална дужина сегмента износи 5556 m (3 NM), а максимална дужина обично иде до 18520 m (10 NM), мерено у правцу продужене осе ПСС. Како се потреба за пројектовањем сегмента са већом дужином од 10 NM врло ретко појављује у пракси ова вредност је усвојена као горња граница. Оптимална вредност дужине сегмента износи 9260 m (5 NM), за максималну брзину од 250 kt.

Инкремент у оквиру кога се ови подаци објављују и користе износи 0.1 NM.

Угао понирања

Стандардне вредности угла понирања GPA обухватају опсег од 3.0 до 3.5°, док оптимална вредност износи 3.0°. Инкремент за дефинисање међувредности износи 0.1°.

PROC ALT

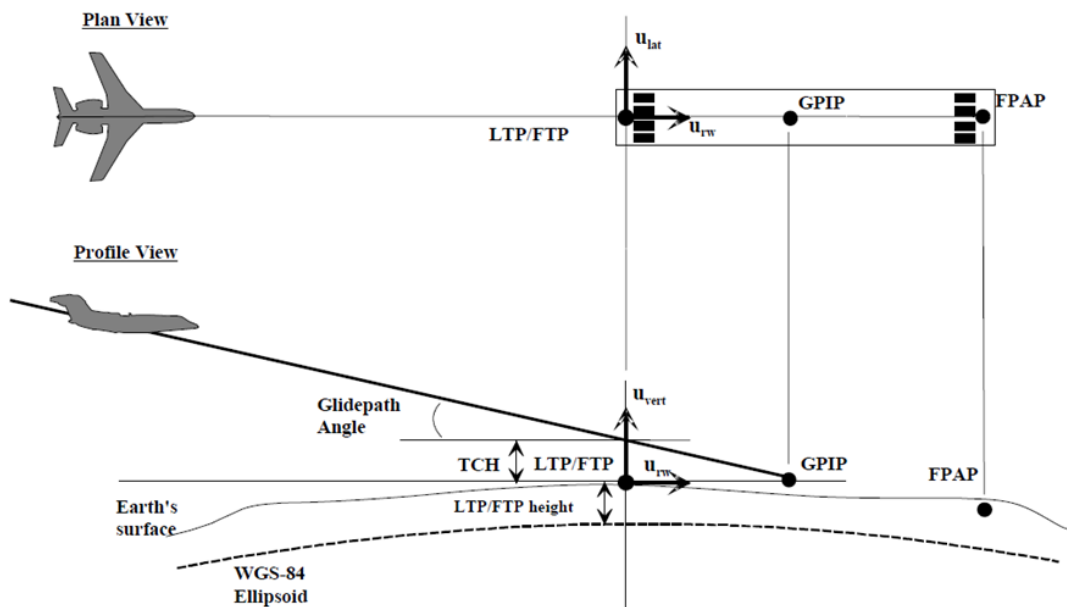
PROC ALT на тачки FAP мора бити једнака или већа од MOCA висине утврђене у оквиру поступка анализе препрека на INITIAL сегменту (IF-FAP).

PROC ALT се одређује према следећој формули за утврђену вредност GPA:

$$PROC_ALT_{FAP} = RDH + 6076 \cdot L_{FAS} \cdot \tan(GPA) + 0.8833 \cdot L_{FAS}^2 \text{ (ft)}, \quad (3)$$

где је L_{FAS} растојање FAP од THR у NM. Ова формула узима у обзир ефекат закривљености Земљине површине (Слика 17, извор: [67]).

Овај ефекат се може сматрати занемаривим на висинама мањим од 640 m (2100 ft) и растојањима мањим од 7408 m (4 NM), тако да се приликом утврђивања вредности висина на другим WP и сегментима не захтева разматрање утицаја поменутог ефекта. Међутим, у циљу прецизности, у овом раду се примењује на све прорачунате висине испред THR.



Слика 17. Ефекат закривљености Земљине површине и елипсоида

За разлику од ILS система код кога се коригује разлика између теоретске закривљености земљине површине, код LPV процедура корекција се заправо врши у односу на модел земље - елипсоид, који се користи приликом одређивања позиције ваздухоплова путем GNSS сигнала, у односу на WGS-84 референтни координатни систем [67].

$PROC_ALT_{FAP}$ представља минималну висину на INTER сегменту. Висина на FAP се, као и вредности висина на осталим WP и сегментима, заокружује на првих већих 50 m (100 ft).

5.4.2.2. INTER

Усмерење

Сегмент INTER је усмерен, тј. поравнат са FAS сегментом, што значи да се IF и FAP налазе у истом правцу, као и продужена оса стварне или фиктивне ПСС.

Дужина

Минимална дужина сегмента зависи од дужине неопходне за успостављање стабилизованог прилаза ваздухоплова пре FAP (константна вредност од 2 NM), као и од прорачунате вредности MSD, у случају заокрета на IF: 3704 m (2 NM) + MSD.

Максимална дужина сегмента износи 18520 m (10 NM). Из истог разлога као код FAS сегмента, ова вредност је усвојена као горња граница. Оптимална вредност дужине сегмента износи, као и код FAS 9260 m (5 NM), за максималну брзину од 250 kt.

Градијент понирања

Вредности DG обично се крећу у опсегу од 0 до 2.5% (1.4°), док максималан градијент, према општим критеријумима, износи 5.2% (3.0°).

Како модерни системи вођења и перформансе ваздухоплова омогућавају континуално понирање са већих висина, без потребе за хоризонталним делом сегмента, оправдано је користити вредности градијента до 6.1% (3.5°). На овај начин се омогућује примена тзв. CDFА (continuous descent final approach) технике летења у складу са максималним вредностима GPA у сегменту завршног прилажења. Овај принцип је већ примењен у документу [48].

PROC ALT

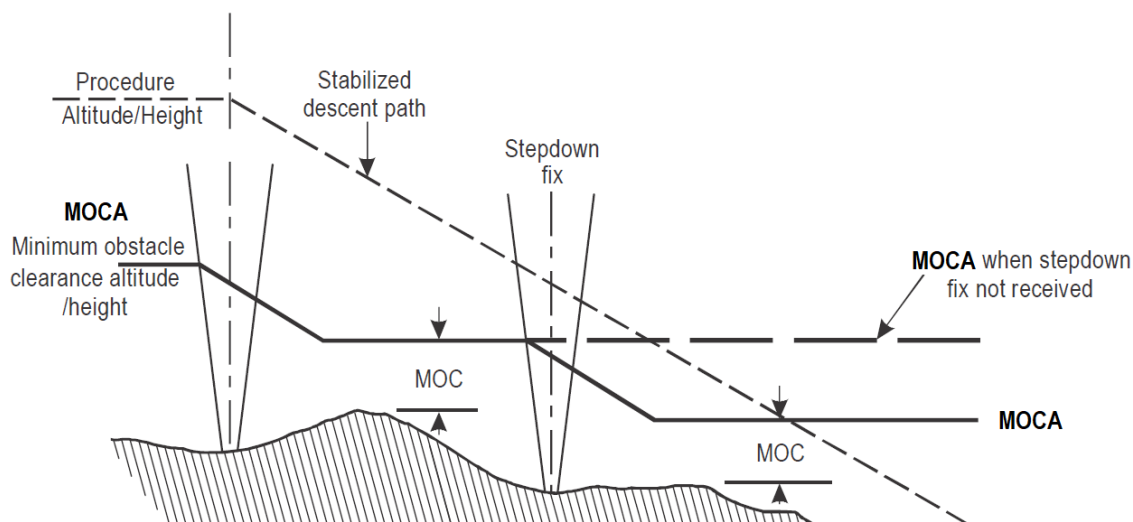
PROC ALT на фиксу IF мора бити једнака или већа од MOCA висине утврђене у оквиру поступка анализе препрека на INTER сегменту (IAF-IF).

PROC ALT се одређује према следећој формули за утврђену вредност GPA:

$$PROC_ALT_{IF} = PROC_ALT_{FAP} + 6076 \cdot TRD_{INTER} \cdot \tan(GPA) + 0.8833 \cdot TRD_{INTER}^2 (ft), \quad (4)$$

где је TRD_{INTER} стварна дужине путање од FAP од IF у NM.

Примена SDF. У случају када није могуће обезбедити јединствену вредност висине између IF и FAP, постоји могућност увођења SDF фикса, којим се може извршити подела сегмента у сврху осигуравања безбедног надвишавања препрека (Слика 18). На овај начин могу се добити две или више захтеваних висина, које могу бити испоштоване приликом континуалног понирања ваздухоплова.



Слика 18. Приказ принципа SDF (вертикална пројекција)

SDF фикс се дефинише у правцу пројектованог прилаза, на одговарајућем растојању у односу на FAP, искључиво на праволинијском делу сегмента. При лоцирању SDF фикса потребно је размотрити могућности оперативне употребе, тако да фикс буде на довољном растојању између других WP, како би летачке посаде имале времена да упореде стварну и захтевану вредност висине.

Приликом примене SDF у оквиру INTER сегмента PROC_ALT_{SDF} се прорачунава на исти начин као и у претходној формули, с тим да се уместо TRD_{INTER} користи растојање од FAR до SDF у NM. За даљу примену SDF принципа видети поглавље 5.5.1.

5.4.2.3. INITIAL

Усмерење

INITIAL сегмент може бити усмерен, тј. поравнат са INTER сегментом (IAF, IF и FAR поравнати у правцу осе ПСС), или дефинисан под одређеним углом у односу на правац продужене осе ПСС (заокрет на IF).

Угао заокрета на IF могуће је пројектовати у вредности до максимално 90° у односу на правац продужене осе ПСС, са једне или друге стране IF. Вредности угла заокрета до 30° (укључујући и ту вредност) сматрају се благом променом усмерења, за коју се чак примењује и једноставнији метод пројектовања заштитног простора (видети 5.4.4.2).

Дужина

Минимална дужина сегмента зависи од прорачунате вредности MSD, у случају заокрета на IF.

INITIAL сегмент нема дефинисану максималну вредност дужине, али се за потребе овог рада може усвојити идентична вредност као и за друге прилазне сегменте - 18520 m (10 NM). У односу на дужине сегмената FAS и INTER (чија збирна дужина може максимално износити 20 NM), ова вредност обезбеђује да IAF буде дефинисан до 30 NM (55560 m) од ARP, чиме се обезбеђују мање димензије толеранције фикса и ширине заштитног простора (Табела 7).

Оптимална вредност дужине сегмента износи 9260 m (5 NM), за максималну брзину од 250 kt.

Градијент понирања

Вредности DG обично се крећу у опсегу од 0 до 4% (2.3°), док максималан градијент, према општим критеријумима, износи 8.0% (4.6°).

За проверу стварне вредности DG на INITIAL сегменту, може се искористити следећа формула:

$$DG_{INITIAL} = \tan^{-1}((PROC_ALT_{IAF} - PROC_ALT_{IF})/TRD_{INITIAL}). \quad (5)$$

PROC ALT

PROC ALT на фиксу IAF мора бити једнака или већа од МОСА висине која претходи INITIAL сегменту (пре IAF).

PROC ALT се одређује према следећој формули за утврђену вредност DG:

$$PROC_ALT_{IAF} = PROC_ALT_{IF} + 6076 \cdot TRD_{INITIAL} \cdot DG + 0.8833 \cdot TRD_{INITIAL}^2 (ft), \quad (6)$$

где је TRD_{INITIAL} стварна дужине путање од IF од IAF у NM.

Како је претпоставка да се SDF принципи аутоматски примењују у односу на IAF и IF фиксеве, на овом сегменту није предвиђено увођење додатних фиксева, јер његова дужина нема критичан карактер.

Висина на IAF се у општем случају одређује на основу добијених минималних секторских (minimum sector altitudes - MSA) или терминалних долазних (terminal arrival altitudes - ТАА) висина, или у зависности од минималне висине на рути или сегменту STAR процедуре која му претходи. MSA или ТАА обично дефинишу висине у радијусу од 25 NM, у односу на ARP или IAF, респективно

За потребе овог рада минимална вредност PROC ALT на IAF мора бити предефинисана на почетку процеса пројектовања процедуре. Провера примењивости овог улазног параметра

превазилази границе проблема који се разматра у оквиру овог рада. У вези са постављеном вредношћу биће само проверено да ли је примењив DG на INITIAL сегменту у оквиру прописаних граница.

5.4.2.4. MAS

MAS сегмент може бити дефинисан као:

- **неуспели прилаз у правцу** (straight-in MAS) или
- **неуспели прилаз са заокретом** (turning MAS).

Неуспели прилаз у правцу подразумева да је правац номиналне путање у MAS сегменту поравнат са продуженом осом ПСС.

Ово је најједноставнији вид пројектовања неуспелог прилаза и састоји се од праволинијског сегмента између THR и тачке MAEF (missed approach end fix), на којој се достиже потребна висина.

Међутим, како путања сегмента неуспелог прилажења обично треба да омогући безбедну транзицију ваздухоплова на позицију за поновно обављање прилаза, примена неуспелог прилаза у правцу је ретка у пракси.

Посматрајући са аспекта комплексности операција, извођење неуспелог прилажења у правцу представља мање захтеван маневар него у случају када постоји заокрет, али се ретко примењује. Поред наведеног, најчешћи разлог је непогодна конфигурација терена или постојање других препрека, које не дозвољавају пењање у правцу, већ захтевају заокрет у циљу избегавања критичног подручја. Без конструкције заокрета у том случају могу бити захтеване превелике вредности ОСА/Н и/или CG, које оперативно није могуће испунити.

У том смислу, у MAS сегменту, најчешће је потребно предвидети један или више заокрета, како би овај сегмент испунио своју намену.

Неуспели прилаз са заокретом, у општем случају, подразумева заокрет ваздухоплова на тачки MATF (missed approach turning fix) који се налази на продуженој оси ПСС. Заокрет се најчешће уводи у циљу избегавања критичних препрека или омогућавања безбедне транзиције ваздухоплова на позицију за поновно обављање прилаза или другог одговарајућег маневра, захтеваног у складу са оперативним окружењем.

У односу на први тип, неуспели прилаза са заокретом има сложенију структуру, и у већини случајева захтева дефинисање низа заокрета, што подразумева и већи број сегмената, а у неким случајевима и различите вредности градијената пењања.

Из аспекта овог рада, ови додатни захтеви би утицали на повећање сложености разматраног проблема, а са друге стране оперативне користи из угла повећања квалитета решења биле би минималне. Искуствено се показало да уколико се обезбеди адекватно надвишавање препрека у почетном делу сегмента, услед већег повећања висине ваздухоплова остатак путање не би требало да буде проблематичан.

Како би се избегло да сегмент неуспелог прилажења, који се користи у мање од 1% операција слетања обављених на аеродрому [68], има сложенију структуру у односу на сегменте процедуре који се користе при сваком извођењу операција слетања, извршена је релаксација проблема пројектовања LPV процедура.

У том смислу, дефинисање MAS сегмента је ограничено на пењање у правцу или са једним заокретом. У случају неуспелог прилаза у правцу, MAEF дефинише тачку где се постиже унапред задата висина на којој ваздухоплов мора да се нађе. У случају неуспелог прилаза са заокретом, MATF представља тачку почетног заокрета на flyover WPT, после које је дефинисана директна путања (DF leg) до MAEF, чија локација се аутоматски прорачунава, за унапред задату висину.

Са аспекта моделирања проблема није битно да ли ће МАЕФ бити дефинисан као fly-by или flyover WP, јер представља крајњу тачку путање, односно процедуре. Ради поједностављења може се претпоставити да је у питању fly-by WP.

Крајња висина на МАЕФ може представљати постојећу вредност MSA, висину дефинисану за потребе радарског векторисања, или неку другу оперативну задату вредност.

Усмерење

Неуспели прилаз у правцу је усмерен, тј. поравнат са продуженом осом ПСС.

Неуспели прилаз са заокретом може имати пројектован угао заокрета на МАТФ до максимално 270° у односу на правац продужене осе ПСС, са једне или друге стране. Међутим, за потребе овог рада ова величина може бити ограничена до вредности 180° , како би се избегло укрштање путања различитих сегмената.

За пројектовање заокрета на МАТФ, осим што је дефинисан као flyover WP, важе иста правила као и за пројектовање заокрета на IF (видети поглавље 5.4.2.5).

Дужина

MAS сегмент генерално нема дефинисане границе или оптималну дужину, осим услова да захтевани маневри буду једноставни и јасни за извођење од стране летачких посада.

Минимална дужина сегмента може бити одређена на начин да дужина номиналне путање, по дефинисаном CG, омогући пењање ваздухоплова до захтеване висине на МАЕФ, или условљена прорачунатом вредношћу MSD, шта је веће.

Најранија локација почетка заокрета на МАТФ фикси одређена је тачком почетка пењања SOC, како је описано у поглављу 2.1. Поступак одређивање локације SOC приказан је у поглављу 5.5.2.

За потребе одређивања граница MAS сегмента, примењени су и следећи принципи.

Максимална удаљеност МАЕФ од THR је дефинисана радијусом од 15 NM. Граница је установљена како би се избегла примена другог скупа критеријума, који подразумевају веће заштитне просторе и толеранције након ове удаљености. Иако се ова граница према [4] мери од ARP, за потребе овог рада, ради поједностављења прорачуна користи се локација THR, која се налази у њеној близини, обично на средини ПСС (~ 1 NM од THR).

Максимална удаљеност фикса заокрета (МАЕФ) од THR такође је утврђена за потребе моделирања проблема и износи 10 NM. Ова вредност је са експертске стране оцењена као довољна, имајући на уму оперативну примењивост такве процедуре. Такође, ова вредност одговара типичним димензијама зона дефинисаних око аеродрома, у којима се пружа услуга контроле летења.

Градијент пењања

Градијент пењања у MAS сегменту CG има стандардну вредност од 2.5%. Уколико препреке или други фактори то захтевају (постоји директна оперативна корист), примењују се друге вредности у инкрементима од 0.1%, до максималне вредности од 5.0%.

Иако ова вредност може бити значајно већа у оперативној примени и у складу са перформансама модерних ваздухоплова, за потребе овог рада је узета као горња граница.

PROC ALT

Минимална висина се не дефинише на сегменту неуспелог прилажења, већ се надвишавање препрека обезбеђује применом одговарајућег CG.

У складу са усвојеним претпоставкама, дефинише се минимална висина на крајњем фиксу МАЕФ (PROC_ALT_{МАЕФ}), која мора унапред бити дефинисана од стране пројектанта. Ова вредност висине се такође, заокружује на првих већих 50 m (100 ft).

Поред тога, у случају заокрета у MAS, прорачунава се висина за потребе утврђивања елемената номиналне путање и заштитног простора, по следећој формули:

$$PROC_ALT_{MATF} = (THR_{ELEV} + OCH - HL) + (X_{SOC} - TF_d) \cdot CG \text{ (ft)}, \quad (7)$$

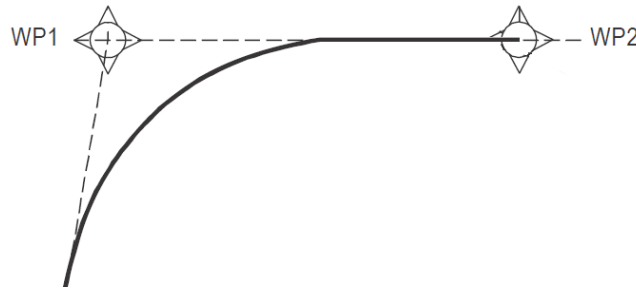
где је локација тачке SOC (X_{SOC}) дефинисана у складу са формулом (32).

Постизање задате висине на MAEF осигурано је применом следеће формуле, која дефинише најмање растојање између фиксева MATF и MAEF (EF_d):

$$EF_d \geq \max[(PROC_ALT_{MAEF} - PROC_ALT_{MATF}) / (6076 \cdot CG), MSD] \text{ (NM)}, \quad (8)$$

5.4.2.5. Конструкција путање са заокретом

Номинална путања са заокретом, састоји се од лука кружнице одговарајућег полупречника (radius of turn - r), који повезује два праволијнска дела путање (Слика 19, извор: [4]).



Слика 19. Приказ путање са заокретом на fly-by WP

Конструкција заокрета, у општем случају, спроводи се на основу следеће формуле и у складу са претходно утврђеним улазним подацима (без примене утицаја ветра):

$$r = TAS / (20 \cdot \pi \cdot R) \text{ (NM)}, \quad (9)$$

где је:

TAS (true airspeed) - стварна брзина прорачуната у односу на улазну вредност IAS, тј. прилагођена за изабрану висину (PROC ALT) и температуру (temperature - T);

R (rate of turn) - брзина извођења заокрета.

TAS се рачуна множењем фактора конверзије (conversion factor - CF) са изабраном вредношћу IAS брзине, при чему CG износи:

$$CF = 171\,233 \cdot [(288 + VAR) - 0.00198 \cdot PROC\,ALT]^{0.5} / (288 - 0.00198 \cdot PROC\,ALT)^{2.628}, \quad (10)$$

где је VAR = +15°C - варијација температуре у односу на ISA ($T = ISA + 15^\circ C$).

R се рачуна према следећој формули:

$$R = (3431 \cdot \tan(BA)) / (\pi \cdot TAS) \text{ (}^\circ/\text{s)}, \quad (11)$$

до максималне вредности од 3 °/s.

Као критичан фактор са аспекта перформанси ваздухоплова, брзина ваздухоплова (Табела 3) једна је од најбитнијих величина приликом пројектовања заокрета, а и процедура генерално. У случају постојања оперативне оправданости (најчешће у сврху избегавања препрека), вредност брзине се може ограничити.

Најчешћи приступ који користе пројектанти подразумева ограничење максималне брзине у заокрету. На тај начин се омогућава пројектовање једне путање за све категорије ваздухоплова, без потребе за приказом путања за сваку категорију посебно.

Заокрет на fly-by WPT

За потребе конструкције заокрета у односу на fly-by WP на IF, почетак заокрета се дефинише у односу на специфичну величину која се назива - **растојање за започињање заокрета** (turn initiation distance – TID).

Као и лук кружнице заокрета, и ова величина је симетрична у односу на WP на који се врши конструкција заокрета. TID зависи од полупречника и угла заокрета, а прорачунава се на следећи начин:

$$TID = r \cdot \tan(\theta/2) \text{ (NM)}, \quad (12)$$

где је θ - угао заокрета ($^\circ$).

MSD представља најкраће растојање потребно за извршење маневра заокрета, након чега је могуће започети нови маневар. MSD се користи приликом прорачуна најкраћег растојања између WP и мора бити исте или мање дужине од дужине сегмента. MSD зависи од следећих улазних података:

- тип WP између којих се прорачунава, и
- вредности θ , r , BA и TAS.

У случају заокрета на IF, MSD се рачуна на следећи начин (Слика 20, извор: [4]):

$$MSD = L1 + L2 \text{ (NM)}, \quad (13)$$

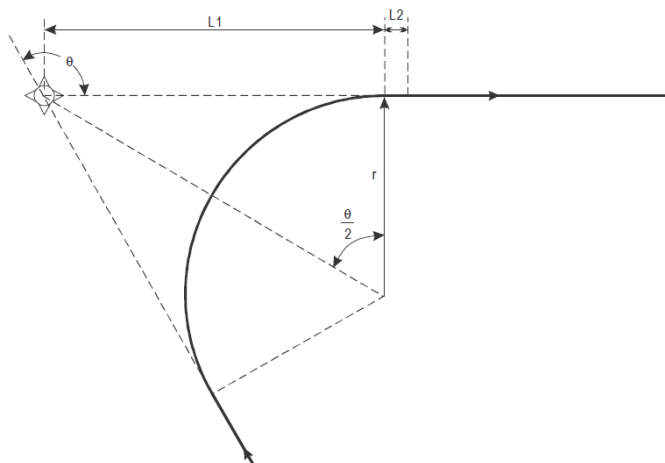
при чему је:

$L1 = TID$ - растојање између WP и почетка заокрета (NM):

$$L1 = r \cdot \tan(\theta/2) \text{ (NM)}; \quad (14)$$

$L2$ - петосекундно закашњење ($c = 5 \text{ s}$), које узима у обзир успостављање BA (ово време је мање него у случају flyover WP због мање промене путног угла):

$$L2 = c \cdot TAS/3600 \text{ (NM)}. \quad (15)$$



Слика 20. Приказ MSD за fly-by WP

Према PANS-OPS критеријумима, за све углове заокрета мање од 50° , за прорачун се узима вредност MSD која је једнака углу заокрета од 50° .

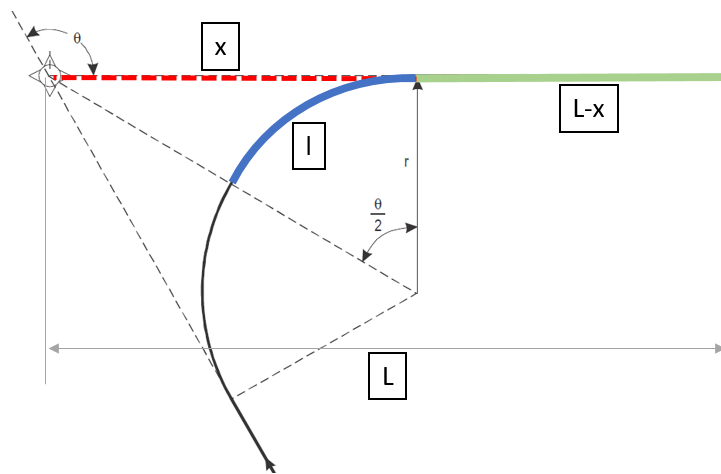
TRD представља растојање између два fly-by WP, које се добија када се од дужине сегмента одузме дужина стабилизације лета за један или два узастопна заокрета, увећана за растојање лета у заокрету (бочно од WP) до тачке у којој путања тангира радијус заокрета (Слика 21, извор: [4]):

$$TRD = L - x + l = L - r \cdot (\tan(\theta_1/2) + \tan(\theta_2/2)) + \pi \cdot r \cdot (\theta_1 + \theta_2)/360 \text{ (NM)}; \quad (16)$$

где је:

L – дужина сегмента,

$L-x$ – праволинијски део номиналне путање,
 l – део номиналне путање у заокрету (дужина лука),
 θ_1 – угао заокрета на почетку сегмента,
 θ_2 – угао заокрета на крају сегмента.



Слика 21. Приказ прорачуна TRD за fly-by WPT

Пошто је код LPV процедура у прилазним сегментима дозвољен само један заокрет на IF, претходна формула има следећи скраћени облик:

$$TRD = L - r \cdot \tan(\theta/2) + \pi \cdot r \cdot \theta/360 \text{ (NM)}. \quad (17)$$

Заокрет на flyover WP

У случају заокрета на MATF имамо заокрет на flyover WP, за који се MSD рачуна на следећи начин (Слика 22, извор: [4]):

$$MSD = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 \text{ (NM)}, \quad (18)$$

при чему је:

$L1$ - дужина путање првог дела заокрета од WP, пројектована на задати путни угао између два WP:

$$L1 = r_1 \cdot \sin(\theta) \text{ (NM)}; \quad (19)$$

$L2$ - дужина путање другог дела заокрета на WP:

$$L2 = r_1 \cdot \cos(\theta) \cdot \tan(\alpha) \text{ (NM)}; \quad (20)$$

$L3$ - дужина праволинијског дела путање заокрета за интерсекцију задатог следећег путног угла под углом од 30° :

$$L3 = r_1 \cdot (1/\sin(\alpha) - 2 \cdot \cos(\theta) / \sin(90^\circ - \alpha)) \text{ (NM)}; \quad (21)$$

$L4$ - дужина путање дела заокрета за излазак на задати путни угао:

$$L4 = r_2 \cdot \tan(\alpha/2) \text{ (NM)}; \quad (22)$$

$L5$ - дужина путање за смањење ВА на изласку из заокрета на задати путни угао, у временском трајању од 10 s:

$$L5 = c \cdot TAS/3600 \text{ (NM)}, \quad (23)$$

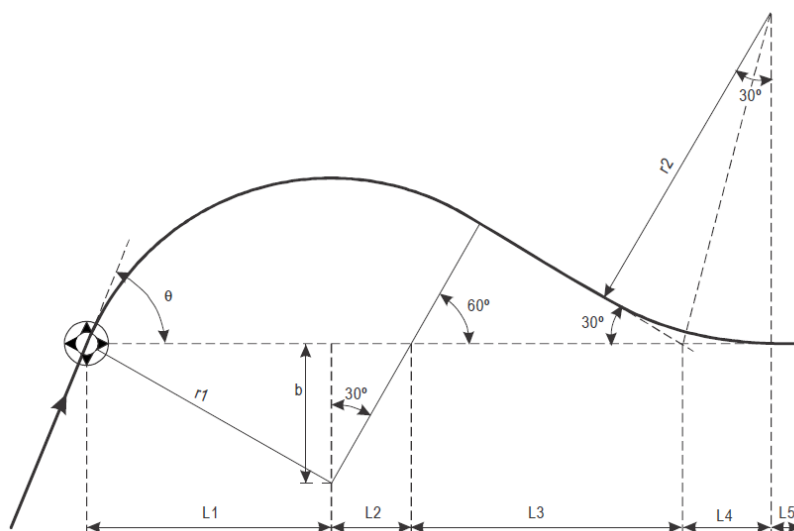
где је:

$\alpha = 30^\circ$ и представља стандардан путни угао за интерсекцију следећег дела путање,

$c = 10$ s и представља десетосекундно закашњење за успостављање ВА,

r_1 - полупречник првог заокрета (за ВА = 15°),

r_2 - полупречник другог заокрета (за ВА = 15°).



Слика 22. Приказ MSD за flyover WP

Према [4] представљени прорачуни за пројектовање номиналне путање представљају упрошћену верзију теоретске формуле, засноване на спроведеним теоретским студијама и симулацијама. Како су алгоритми који RNAV системи на ваздухопловима користе комплексни, чак се и између њих могу јавити одређене разлике.

Намена овог метода прорачуна није дефинисање заштитних простора, већ утврђивање минималног растојања између два WP на номиналној путањи. Из тог разлога утицај ветра и толеранције WP нису узете у обзир приликом дефинисања формула. У случају потребе, веће вредности од добијених MSD могу бити употребљене приликом пројектовања процедура.

За потребе прорачуна TRD између MATF и MAEF, може се користити следећа упрошћена формула:

$$TRD = L - r_1 \cdot \tan(\theta/2) + \pi \cdot r_1 \cdot \theta/360 \text{ (NM)}, \quad (24)$$

јер се између WP примењује DF PT.

5.4.3. Конструкција OAS равни

Поступак конструкције OAS равни описан је у документу [4], а детаљан преглед прорачуна дат је у извештају [69]. За боље разумевање предметног проблема, у оквиру овог рада приказани су само основни принципи конструкције OAS, који се спроводе на основу следећих података:

- CAT ваздухоплова,
- GPA,
- CG,
- RDH,
- растојање GARP-THR,
- ширина курса на прагу ПСС (course width at THR): стандардна вредност од 210 m,
- димензије ваздухоплова (aircraft dimensions): користе се следеће стандардне максималне вредности (Табела 4, извор: [4]):

Табела 4. Стандардне димензије ваздухоплова према категорији брзине

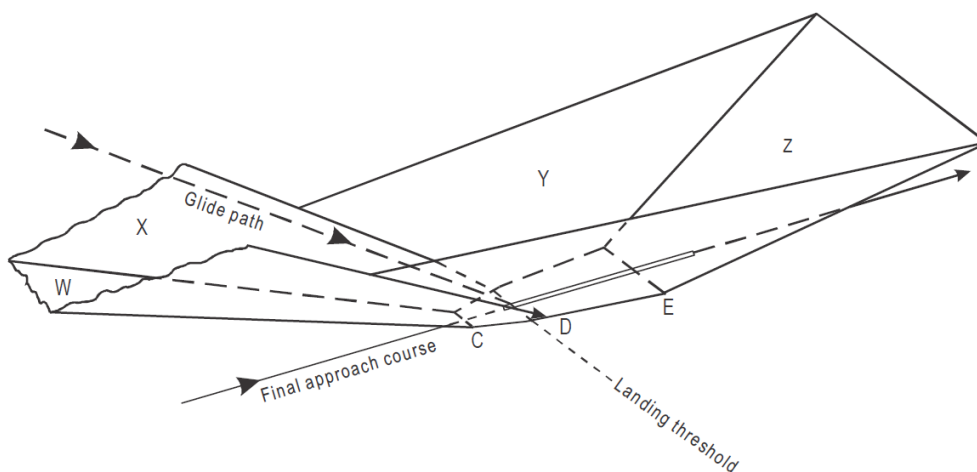
CAT	Размах крила	Вертикално растојање између газисног дела стајног трапа и GP антене на ваздухоплову
C / D	65 m	7 m
A / B	60 m	6 m

Поступак конструкције LPV CAT I OAS равни спроводи се у три корака:

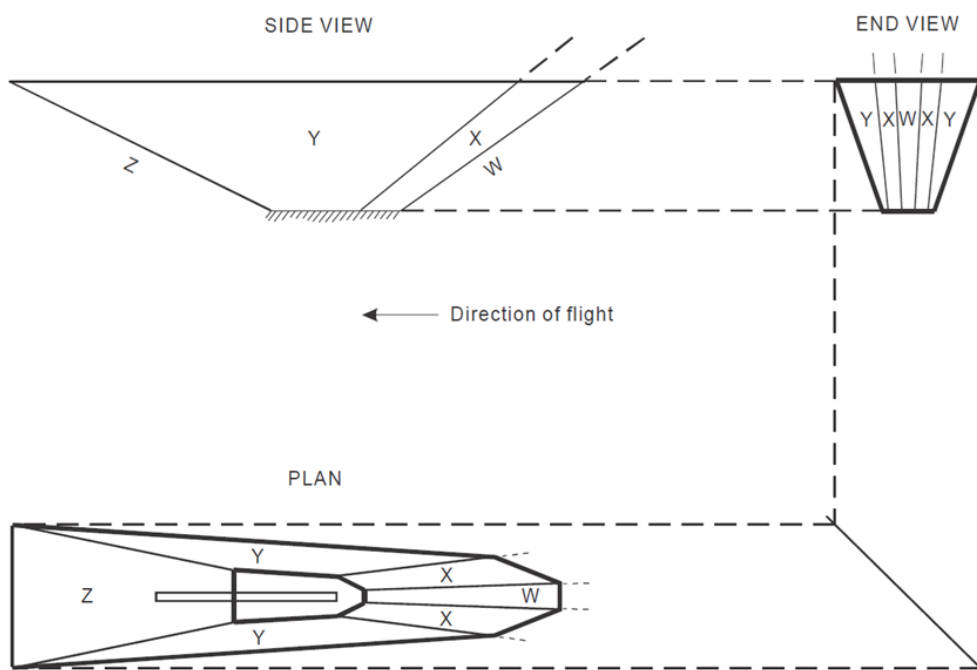
1. прорачун ILS CAT I OAS равни,
2. корекција ILS CAT I OAS константи, и
3. конструкција LPV CAT I OAS равни.

5.4.3.1. Прорачун ILS CAT I OAS равни

OAS се састоје од седам равни, које су симетрично постављене у односу на осу ПСС (Слика 23 и Слика 24, извор: [4]). Основна раван је хоризонтална, док осталих шест (W, две X, две Y и Z равани) чине косе равни или површи (заклапају одговарајући угао са хоризонталном равни).



Слика 23. ILS OAS



Слика 24. Приказ OAS равни у три пројекције

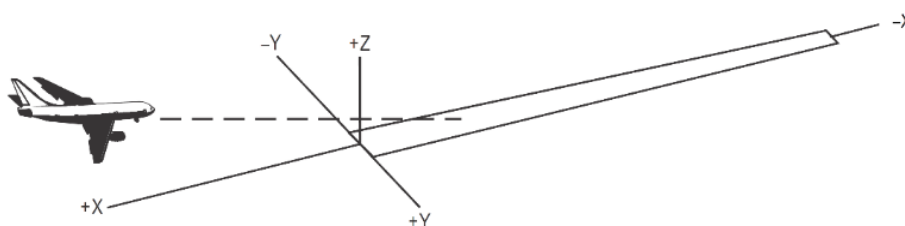
W раван штити ваздухоплов од препрека приликом слетања, у односу на номиналну путању, док Z раван штити од препрека приликом извођења неуспелог прилаза. Додатну заштиту од препрека, услед различите прецизности извођења лета, обезбеђују бочне X и Y равни, које са обе стране продужене осе ПСС повезују W и Z равани, и заједно са хоризонталном равни чине OAS целину.

Геометрија косих OAS равни одређена је линеарним једначинама које имају следећи општи облик:

$$z = A \cdot x + B \cdot y + C, \quad (25)$$

при чему се за сваку раван прорачунава засебан скуп коефицијената A , B и C , за одређене улазне (основне) податке. За потребе дефинисања константи важе правила утврђена за усвојени координатни систем са координатним почетком дефинисаним у THR. Практично, за сваку косу раван се одређује једначина праве, чији се елементи прорачунавају путем пројекције на одређене осе координатног система.

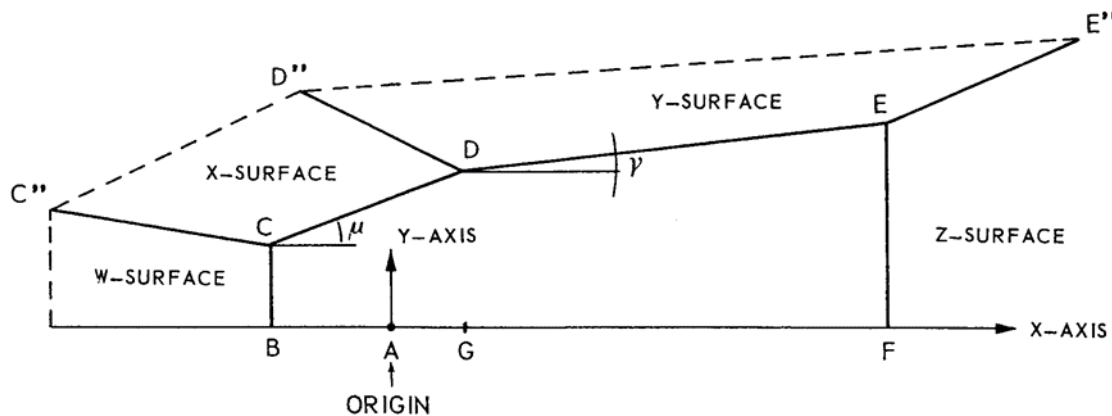
Усвојени координатни систем за дефинисање тачака у простору је тзв. Декартов правоугаони координатни систем (3D Cartesian coordinate system), који се састоји од X , Y и Z осе, са координатним почетком у THR $(0,0)$. За потребе прорачуна у координата се увек сматра позитивном.



Слика 25. Декартов координатни систем

Први корак приликом конструкције OAS равни представља прорачун координата тачака C , D и E , које дефинишу хоризонталну раван (тзв. OAS template). Ове тачке уједно чине и основне тачке осталих косих равни, на надморској висини THR ($z = 0$ m).

Горње границе OAS равни одређене су тачкама C'' , D'' и E'' , које се налазе на релативној висини од $z = 300$ m, у односу на надморску висину THR (Слика 26, извор: [69]).



Слика 26. Приказ елемената OAS равни

У случају примене FAP тачке (уместо FAF), равни W и X се додатно продужавају до вредности MOCA висине, утврђене за INTER сегмент.

Базне OAS равни чине основу за прорачун свих осталих OAS равни (са другачијим улазним подацима) и дефинисане су у односу на извршену серију летова (за димензије ваздухоплова које одговарају CAT A и B ваздухопловима), са унапред одређеним оперативним окружењем, тј. основним подацима о ПСС:

- растојање GARP-THR: **2000, 3000, 3800** и **4500 m**,
- GPA: **2.5, 3.0** и **3.5°** и
- CG: **0.020, 0.025, 0.035, 0.040** и **0.050**.

Код ПСС са другачијим основним подацима, прорачун ОАС равни се извршава применом метода интерполације на резултате добијене за дате податке код базних ОАС равни. Списак девет врста ових података дат је у следећој табели (Табела 5, извор: [69]).

Табела 5. Основни подаци утврђени за базне ОАС равни (CAT A/B)

Податак	Број вредности	Зависност
AG, AB, BC	по 3 вредности	GPA
AF	1 вредност	constant
GD	1 вредност	constant
EF	15 вредности	GPA, CG
tg X	12 вредности нагиба X равни	GPA, GARP-THR
tg W	3 вредности нагиба W равни	GPA
tg Y	60 вредности нагиба Y равни	GPA, GARP-THR, CG

За потребе прорачуна нових вредности у односу на оне дате у претходној табели, користи се Лагранжова интерполација за три или четири тачке, у зависности од елемента ОАС равни који се прорачунава. Поступак Лагранжове интерполације је заснован на следећем полиному општег облика:

$$l_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (26)$$

На основу претходног израза добија се тзв. приближна функција $P(x)$, која апроксимира функцију $f(x)$ у односу на тачке чије вредности функције су познате:

$$P(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) l_i(x) \quad (27)$$

Додатна објашњења по питању теоријског разматрања примењеног метода могу се пронаћи у [70] и [71].

5.4.3.2. Прорачун хоризонталне равни

За потребе одређивања координата тачака C, D и E (Слика 26) користи се тачка A (0, 0, 0) која одговара локацији координатног почетка (THR), затим тачке B, G и F, које представљају пројекције тачака C, D и E на x-осу, респективно (за $C_y = D_y = E_y = 0$).

За познате улазне податке могу се прорачунати следеће координате ових тачака:

$$\begin{aligned} C_z = D_z = E_z &= 0, \\ D_y = G D &= \text{const.} = 135 \text{ m}, \\ E_x = A F &= \text{const.} = -900 \text{ m}. \end{aligned}$$

C_x , C_y , D_x и E_y се добијају за изабрану вредност GPA, интерполацијом између три познате стандардне вредности GPA (за 2.5, 3.0 и 3.5°) за следеће дужине (Табела 5):

$$C_x = AB, C_y = BC, D_x = AG \text{ и } E_y = EF.$$

На овај начин су одређене све три тачке које чине хоризонталну ОАС раван:

$$C (AB, BC, 0), D (AG, 135, 0) \text{ и } E (-900, EF, 0).$$

Зависност координата тачака које дефинишу хоризонталну раван представљена је у следећој табели (Табела 6, извор: [69]).

Табела 6. Зависност координата тачака хоризонталне ОАС равни

Тачка (координате)	Зависност
C (C_x, C_y, C_z) = (AB, BC, 0)	GPA
D (D_x, D_y, D_z) = (AG, 135, 0)	GPA
E (E_x, E_y, E_z) = (-900, EF, 0)	GPA, CG

У сврху бољег разумевања прорачуна елемената ОАС равни путем методе интерполације дат је следећи пример за прорачун Dx компоненте тачке D.

Пример 1 - прорачун вредности Dx за $GPA = 3.3^\circ$:

Базне ОАС равни имају следеће стандардне вредности за растојање $Dx = AG$:

$$\text{за } x_0 = GPA_0 = 2.5^\circ \rightarrow f(x_0) = AG_0 = -344 \text{ m,}$$

$$\text{за } x_1 = GPA_1 = 3.0^\circ \rightarrow f(x_1) = AG_1 = -286 \text{ m и}$$

$$\text{за } x_2 = GPA_2 = 3.5^\circ \rightarrow f(x_2) = AG_2 = -245 \text{ m.}$$

Пошто су у питању три тачке, Лагранжов интерполациони полином за $GPA = 3.3^\circ$ има следећи облик у односу на формулу (27):

$$P(AG) = AG_0 \cdot [(GPA - GPA_1) \cdot (GPA - GPA_2) / (GPA_0 - GPA_1) \cdot (GPA_0 - GPA_2)] + \\ AG_1 \cdot [(GPA - GPA_0) \cdot (GPA - GPA_2) / (- (GPA_1 - GPA_0)) \cdot (GPA_1 - GPA_2)] + \\ AG_2 \cdot [(GPA - GPA_0) \cdot (GPA - GPA_1) / (GPA_2 - GPA_0) \cdot (GPA_2 - GPA_1)],$$

из овога следи:

$$P(AG) = -344 \cdot [0.3 \cdot (-0.20) / (-0.5) \cdot (-1)] - 286 \cdot [0.8 \cdot (-0.20) / (-(-0.5)) \cdot (-0.5)] - 245 \cdot [0.8 \cdot (-0.30) / (-1) \cdot (-0.5)] = \mathbf{-259 \text{ m}}$$

НАПОМЕНА: У односу на формулу (27), у циљу елиминисања утицаја негативних вредности координата ОАС тачака на прорачун, извршена је корекција формуле у [69] додавањем додатног рачунског оператора за одузимање, односно промену знака (-).

5.4.3.3. Прорачун косих равни

За потребе одређивања косих равни неопходно је одредити координате тачака C'', D'' и E'' (Слика 26), уз помоћ следећих једначина правих за $z = 300 \text{ m}$:

$$\mathbf{W \text{ равн:}} z = A_W \cdot x + C_W \text{ (} B_W = 0, \text{ не сече } y\text{-осу),}$$

$$\mathbf{X \text{ равн:}} z = A_X \cdot x + B_X \cdot y + C_X,$$

$$\mathbf{Y \text{ равн:}} z = A_Y \cdot x + B_Y \cdot y + C_Y,$$

$$\mathbf{Z \text{ равн:}} z = A_Z \cdot x + C_Z \text{ (} B_Z = 0, \text{ не сече } y\text{-осу),}$$

као и уз помоћ једначина:

$$\text{tg } \mu = (GD - BC) / (AG + AB),$$

$$\text{tg } \nu = (EF - GD) / (AF - AG).$$

За познате улазне податке коефицијенти датих равни се прорачунавају на једноставан начин директном применом правила геометрије и тригонометрије.

Вредност $A_W = \text{tg } W$ добија се Лагранжовом интерполацијом за три познате стандардне вредности A_W , у односу на GPA за 2.5, 3.0 и 3.5° (Табела 5).

Вредност $A_Z = \text{tg } Z$ једнака је вредности CG.

Вредност $B_X = \text{tg } X$ се добија тзв. угњежђеном Лагранжовом интерполацијом за три, а затим за четири познате стандардне вредности B_X , у односу на GPA за 2.5, 3.0 и 3.5° и GARP-THR растојања од 2 000, 3 000, 3 800 и 4 500 m (Табела 5).

Координате тачке С'' прорачунавају се у пресеку W и X равни.

Координате тачке D'' прорачунавају се у пресеку GPA равни (tg GPA) и X равни. GPA раван се у овом случају користи уместо Y равни како би се избегао утицај промене Y равни, који зависи од вредности CG, на тачку D''.

Вредност $V_Y = \text{tg } Y$ добија се на основу координата тачака D, D'' и E.

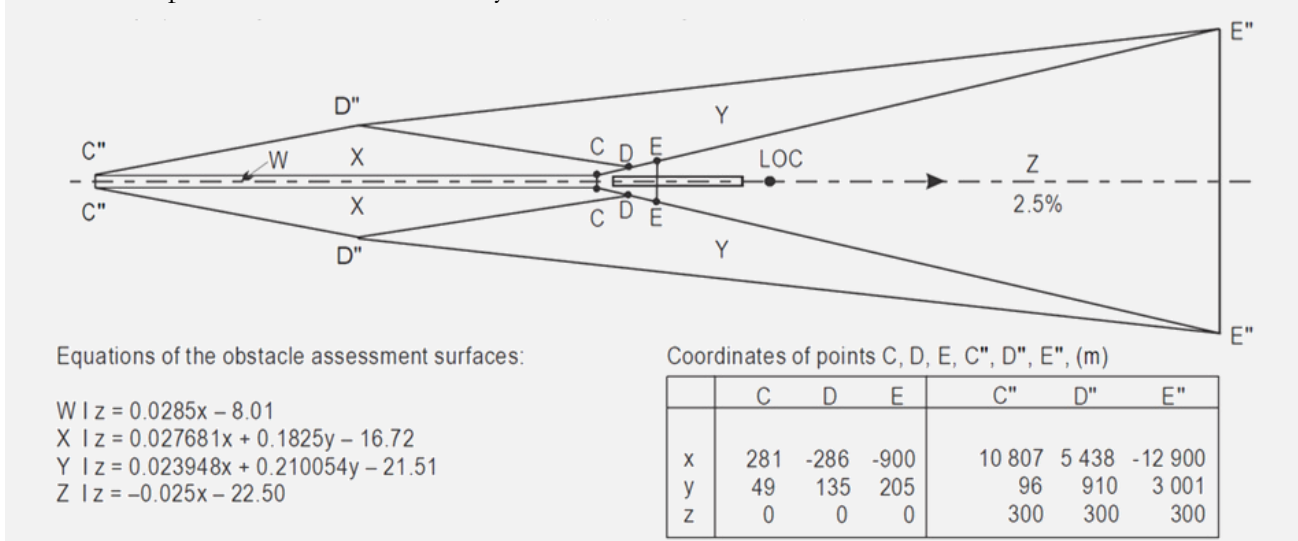
Координате тачке E'' прорачунавају се у пресеку Y и Z равни.

У ранијим верзијама [4] резултати за различите комбинације улазних података, за прорачун OAS равни, били су на располагању у оквиру посебног додатка, док се данас, још увек званично, прорачун врши путем посебно развијеног ICAO PANS-OPS софтвера, који је јавно доступан. Међутим, овај софтвер се тренутно не одржава и садржи грешке у појединим модулима за прорачун заштитних равни, али не за ILS CAT I OAS равни.

Поједини комерцијални софтверски алати такође поседују могућност прорачуна OAS равни. У ову сврху се може искористити и нови PANS-OPS софтверски пакет, који је тренутно у фази развоја за потребе ICAO од стране јапанског Electronic Navigation Research Institute (ENRI) [72].

Пример 2 - прорачуна ILS CAT I OAS равни за улазне податке: GPA = 3.0°, GARP-THR = 3000 m и CG = 2.5% (Слика 27, извор: [4]).

Резултати подразумевају прорачун координата (x, y, z) тачака C, D, E, C'', D'' и E'' (табела доле десно са горње слике), као и коефицијената A, B и C за сваки косу OAS раван - W, X, Y и Z (једначине доле лево). На основу ових излазних података могуће је извршити конструкцију ILS CAT I OAS равни за CAT A и B ваздухоплове.



Слика 27. Пример резултата прорачуна OAS равни

5.4.3.4. Корекција ILS CAT I OAS константи

Корекција добијених ILS CAT I OAS равни врши се у случају када не важе стандардни услови (вредности) за које су основне OAS равни пројектоване.

За потребе прорачуна LPV CAT I OAS равни, спроводи се корекција коефицијената косих равни у следећим случајевима:

- за повећање CG – врши се измена коефицијената Z и последично Y равни, у односу на изабрану вредност,
- за ваздухоплове већих димензија – врши се конверзија основних података из CAT A/B за потребе CAT C/D ваздухоплова (или појединачних нестандарних величина ваздухоплова):

W раван: $C_{wcorr} = C_w - (t - 6)$,

X раван: $C_{xcorr} = C_x - B_x \cdot P$,

Y раван: $C_{ycorr} = C_y - B_y \cdot P$,

где је:

$P = \max(t/B_x, S + (t - 3)/B_x) - \max(6/B_x, 30 + 3/B_x)$,

s - размах крила (m) (Табела 4),

t - вертикално растојање између газипног дела стајног трапа и GP антене на ваздухоплову (m) (Табела 4).

Корекција OAS за друге нестандардне вредности (нпр. RDH или GPA), није релевантна за пројектовање LPV процедура за потребе овог рада, јер се те величине дефинишу у оквирима стандардних вредности.

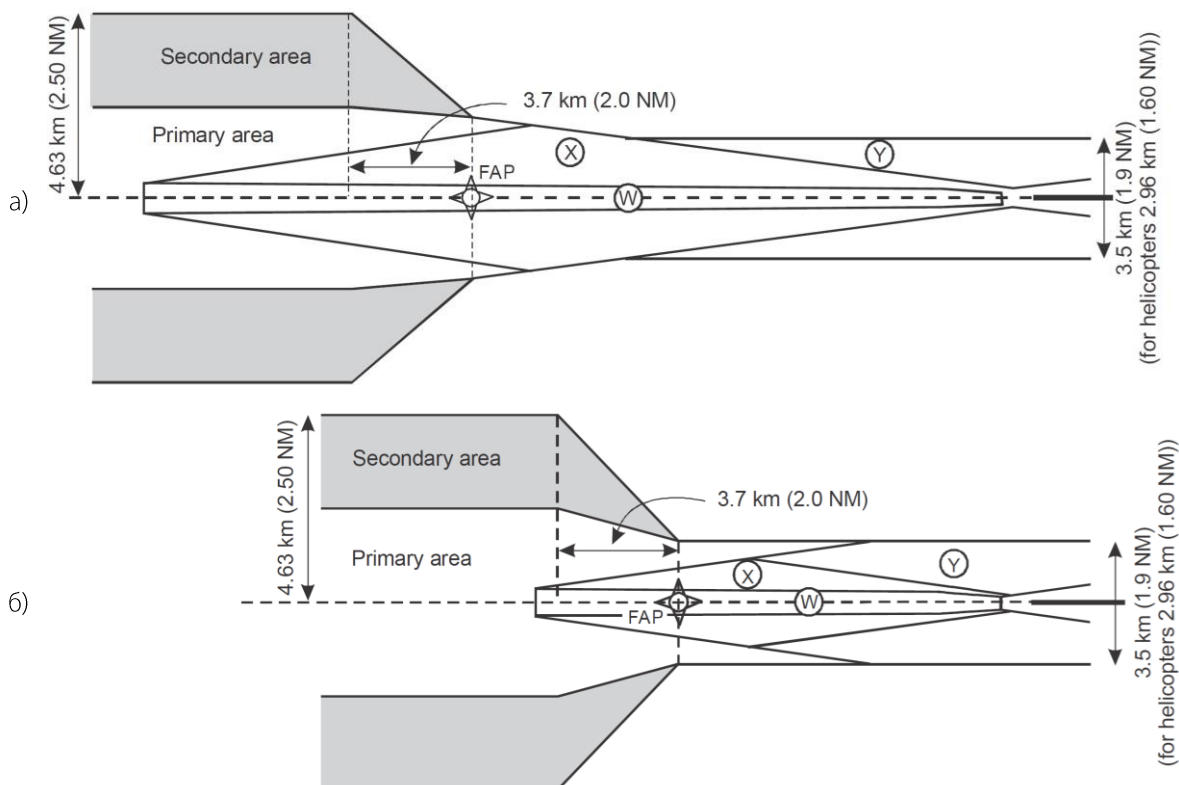
5.4.3.5. Конструкција LPV CAT I OAS равни.

LPV CAT I OAS равни су идентичне ILS OAS равнима, са разликом, да је латерална (бочна) граница Y и Z равни, у хоризонталној пројекцији, код LPV процедура ограничена заштитним коридором укупне ширине 3518.8 m (1.9 NM), а не релативном висином од 300 m (Слика 28, извор: [4]).

Ова разлика захтева прорачун другачијих координата тачака D'' и/или E''. Локација нових тачака зависи и од ширине заштитног простора на локацији FAP, која је у функцији растојања FAP од THR:

У случају локације FAP даље од THR (Слика 28 а)) простор на месту спајања OAS равни и заштитног простора сегмента међуприлажења бочно од FAP је шири од заштитног коридора и конструише се продужавањем дужи DD'' до FAP.

У случају локације FAP ближе THR (Слика 28 б)) простор на месту спајања OAS равни и заштитног простора сегмента међуприлажења бочно од FAP је идентичан ширини заштитног коридора и конструише се његовим продужавањем до FAP.



Слика 28. LPV CAT I OAS равни

5.4.4. Конструкција заштитног простора

Конструкција заштитног простора извршава се у хоризонталној равни, обухвата INITIAL, INTER и MAS final сегменте и састоји се од:

- конструкције праволинијског дела заштитног простора,
- конструкције заштитног простора заокрета и
- конструкције заштитног простора на конекцији INTER сегмента и OAS равни.

5.4.4.1. Конструкција праволинијског дела заштитног простора

Конструкција заштитног простора праволинијског дела номиналне путање се спроводи на основу података о полуширини заштитног простора за RNP APCH навигациону спецификацију, чије вредности су по сегментима дате у оквиру следеће табеле (Табела 7, извор: [4]).

Табела 7 Димензије толеранције фиксева и полуширина простора

Сегмент	XTT	ATT	BV	½ AW
INITIAL	1852 m	1482 m	1852 m	4630 m
INTER	(1.00 NM)	(0.80 NM)	(1.00 NM)	(2.50 NM)
FAS	556 m	444 m	926 m	1759 m
Inter. MAS	(0.30 NM)	(0.24 NM)	(0.50 NM)	(0.95 NM)
Final MAS	1852 m	1482 m	926 m	3704 m
	(1.00 NM)	(0.80 NM)	(0.50 NM)	(2.00 NM)

Вредност $\frac{1}{2} A/W$ је код INITIAL и INTER сегмента LPV процедура идентична и константна целом дужином праволинијског дела сегмента (до растојања од максимално 55560 m (30 NM)), као и у случају FAS сегмента, укључујући и почетни део MAS. Полуширина простора final MAS сегмент повећава се од почетка заокрета до вредности од 3704 m, на удаљености од 27780 m (15 NM) од ARP.

На праволинијском делу сегмента заштитни простор је увек симетричан у односу на номиналну путању (Слика 9).

5.4.4.2. Конструкција заштитног простора заокрета

Заокрет може бити дефинисан на три начина:

- у односу на фикс/WP (turning fix/point - TF/P),
- на висини (turning altitude/height - TA/H), или
- између два WP са константним углом заокрета – RF (radius-to-fix) метод.

За потребе овог рада биће разматран само први начин, који се још разликује и према типу WP у односу на који је дефинисан. Овај начин је тренутно обавезан према важећим критеријумима.

Коришћење заокрета на висини, као иницијалног заокрета у MAS сегменту није дозвољено, првенствено због недовољног познавања понашања SBAS пријемника у том случају [4]. RF заокрети нису разматрани због разлога наведених у оквиру поглавља 2.1.

Конструкција заштитног простора заокрета на WP се спроводи применом одговарајуће методе у односу на вредност промене угла и сегмент LPV процедуре:

- **circular arc метод:** за заокрете од 30° и мање, на IF или
- **bounding circles метод:** за заокрете веће од 30° на IF и за све заокрете на MATF.

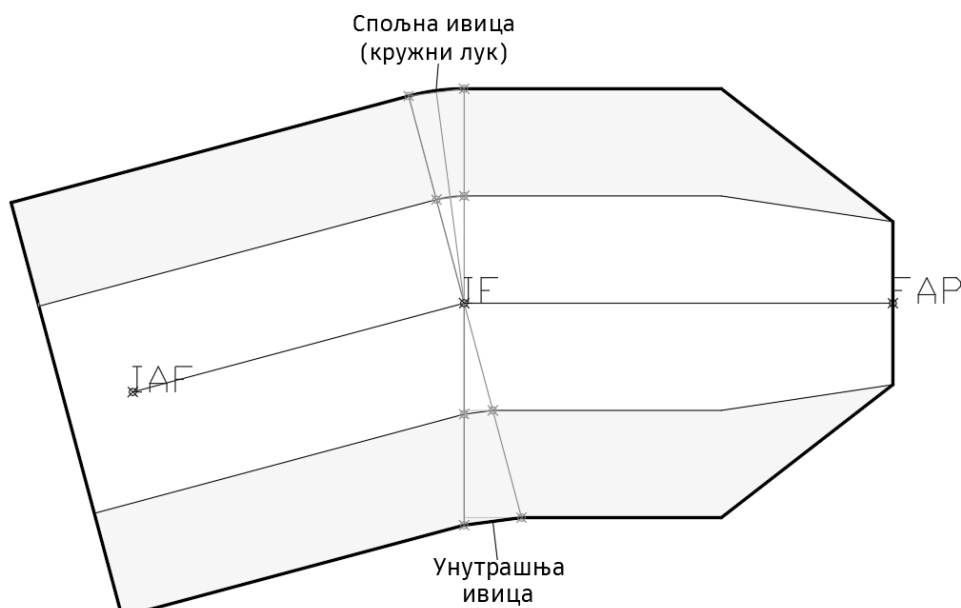
У оба случаја разликује се начин конструкције спољне и унутрашње ивице заштитног простора заокрета. Приликом конструкције спољне ивице првенствено се узима у обзир утицај

највеће дозвољене брзине ваздухоплова, док се при конструкцији унутрашње ивице разматра најспорија категорија ваздухоплова [4].

За потпуно дефинисање заштитног простора заокрета применом bounding circles метода, потребно је дефинисати и почетак заокрета, у односу на који се пројектују спољна и унутрашња ивица заокрета, који између осталог зависи и од типа WP.

5.4.4.3. Circular arc метод

Circular arc представља једноставан графички метод повезивања заштитних простора два узастопна сегмента кружним луковима (INITIAL и INTER сегмента код LPV процедура). Овај метод је карактеристичан за fly-by тип WP и за његову примену практично не требају додатни улазни подаци, осим података о полуширини заштитног простора (Слика 29, извор: [55]).



Слика 29. Примена circular arc метода

Први корак у оквиру ове методе подразумева конструкцију заштитних простора оба сегмента у односу на праволинијску номиналну путању. Заштитни простор се конструише између почетне и крајње тачке сегмента, и пружа се до линије која пролази кроз тачке и управна је на номиналну путању.

Спољна ивица

Линија спољне ивице заокрета има облик кружног лука, који се конструише између крајњих тачака добијених заштитних простора (примарног и секундарног). Лук се конструише са центром у тачки пресека осе симетрије дужи између две тачке на крајевима заштитног простора и линије управне на номиналну путању која пролази кроз WP.

Како је код LPV процедура заштитни простор INITIAL и INTER сегмента једнаке ширине, центар за конструкцију лука се увек налази у самом WP у односу на који се конструише заокрет.

Унутрашња ивица

За конструкцију унутрашње ивице примењује се још једноставнији захват, који подразумева директно спајање крајњих тачака заштитних простора једном дужи. За разлику од спољне ивице заокрета, крајње тачке се добијају у пресеку заштитног простора једног сегмента са линијом управном на номиналну путању другог сегмента, која пролази кроз WP.

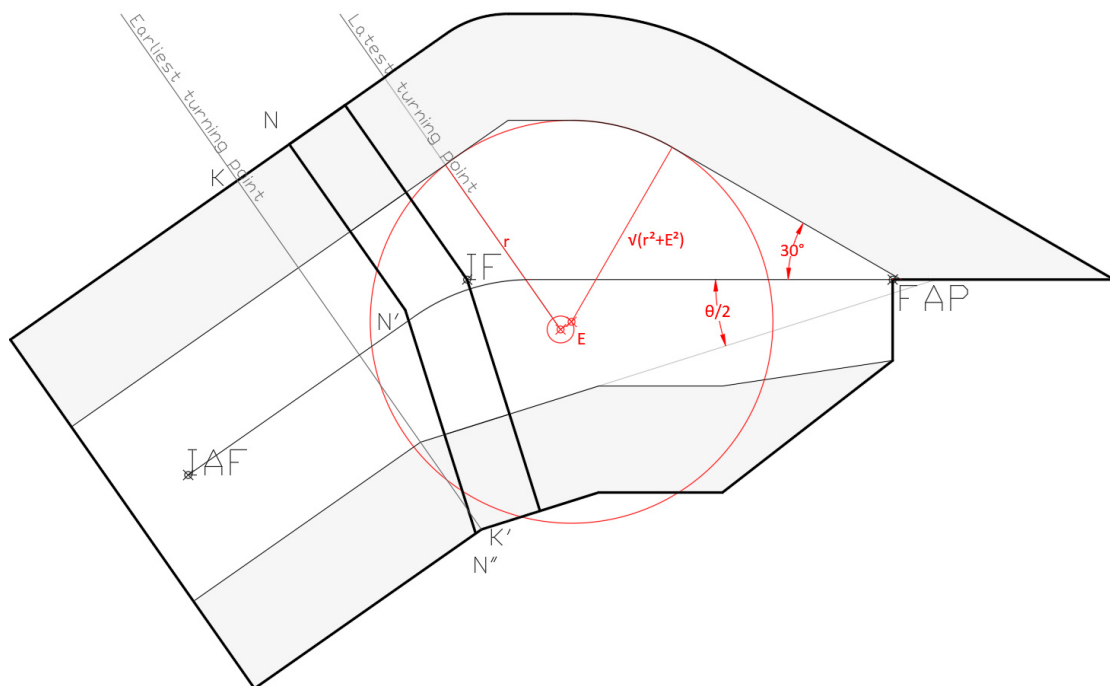
Код LPV процедура, угао добијене дужи износи половину угла заокрета на WP ($\theta/2$).

5.4.4.4. Bounding circles метод

Bounding circles или метод граничних кругова престава нешто једноставнији метод у односу на тзв. wind spiral метод, који није коришћен за потребе овог рада. Основни разлог примене првог метода јесте могућност поједностављене конструкције, односно прорачуна елемената заокрета, на супрот захтевнијој конструкцији посебних спирала, у оквиру другог метода. Оба метода су еквивалентна са аспекта примене према важећим критеријумима, с тим да метод граничних кругова обухвата нешто већи простор, што га чини критичнијим са безбедносне стране.

Метод је назван према граничним круговима, односно кружницама, које ограничавају простор заокрета са спољне стране (Слика 30, извор: [55]). Елементи метода неопходни за конструкцију заокрета означени су црвеном бојом на слици.

У наставку текста приказани су основни принципи примене bounding circles метода конструкције заштитног простора, неопходни за разумевања овог аспекта пројектовања LPV процедура. Принципи су приказани на примерима заокрета на IF и MATF, који су предмет моделирања проблема. Детаљан опис примене датог метода може се пронаћи у оквиру [4].



Слика 30. Примена bounding circles метода - fly-by

Спољна ивица

Спољна ивица заокрета дефинише се у односу на граничну кружницу полупречника $(r^2 + E^2)^{1/2}$, где r одговара полупречнику прорачунатом за потребе конструкције заокрета номиналне путање на истом фиксу (видети поглавље 5.4.2.5). Вредност E означава пројектовани утицај ветра (wind effect), који се код овог метода конструкције додаје на сваких 90° промене угла. E се прорачунава путем следеће формуле:

$$E_{90^\circ} = (90^\circ/R) \cdot (w/3600) \text{ (NM)}, \quad (28)$$

где је R величина описана у поглављу 5.4.2.5, док w представља брзину ветра, која по критеријумима износи 30 kt (56 km/h), као свесмерни ветар, или се користи вредност статистичког 95% свесмерног ветра (где су историјски подаци доступни).

Како је код заокрета на IF 90° максимална промена угла, не пројектује се додатан утицај ветра, док код заокрета на MATF, теоретски можемо имамо још једну примену на 180° (Слика 31). У случају примене другог ефекта ветра, дефинише се кружница већег полупречника, који износи $r + E$.

Вредност од 90° , односно 180° се мери у односу на дуж управну на номиналну путању INITIAL сегмента., чија дужина је једнака полупречнику r (Слика 30). Ова дуж се мери од тачке на ивици примарног простора у којој се налази тачка најкаснијег почетка заокрета (latest turning point).

Тачка најкаснијег почетка заокрета се код fly-by WP прорачунава као:

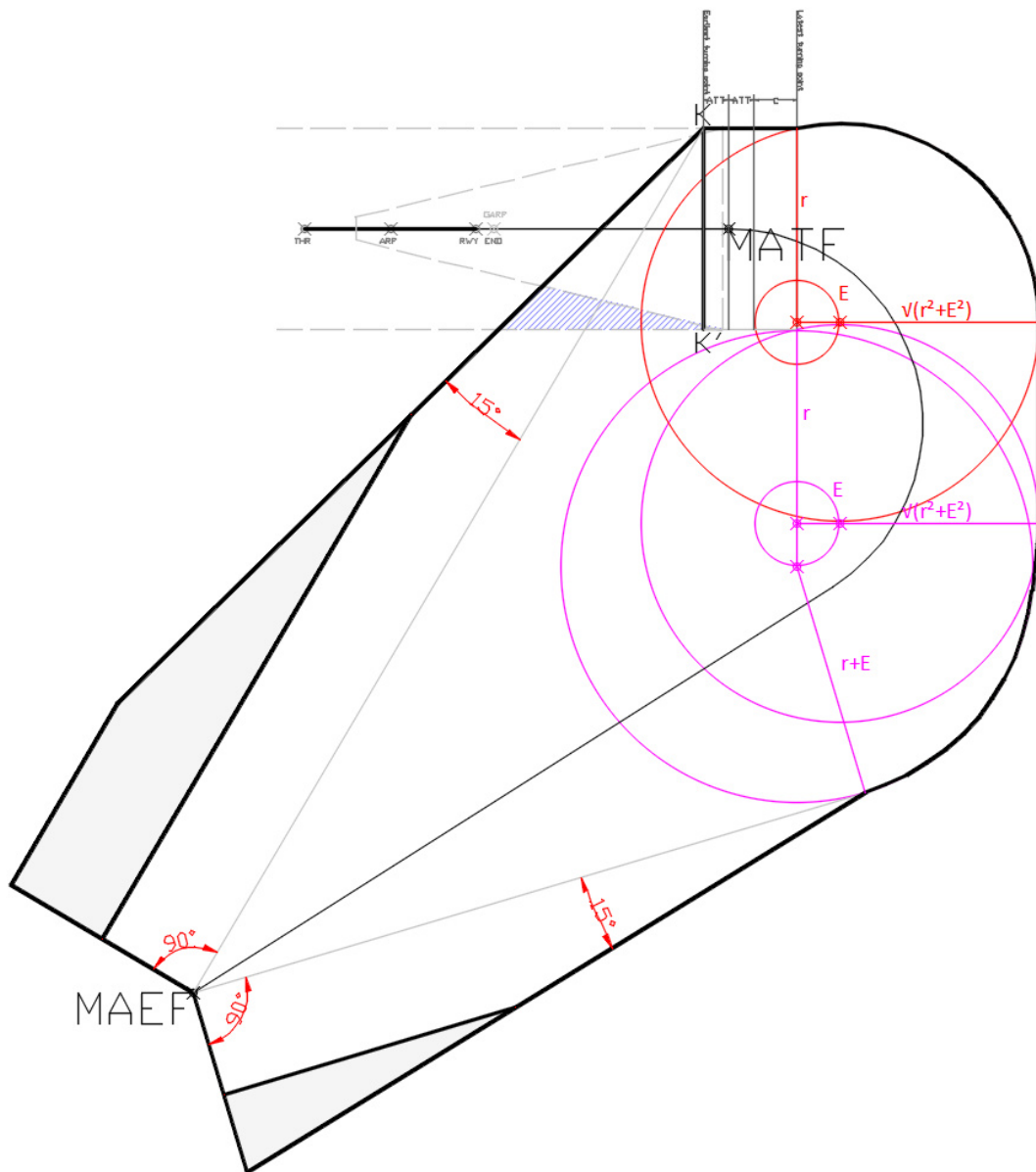
$$TID - ATT - \text{време реакције пилота} \cdot (TAS + w),$$

где је величина TID представља величину дефинисану у оквиру поглавља 5.4.2.5, која се рачуна као $\min(r \cdot \text{tg}(\theta/2), r)$, а време за реакцију пилота (pilot reaction time) износи $6s$. Уколико је добијена вредност негативна, тачка се налази иза WP.

Код flyover WP (Слика 31, извор: [55]), тачка најкаснијег почетка заокрета се прорачунава као:

$$ATT + c \cdot (TAS + w),$$

где је $c = 6s$, и представља толеранција пилотирања (flight technical tolerances), која укључује и $3s$ времена за реакцију пилота и $3s$ времена потребног за успостављање нагиба ваздухоплова.



Слика 31. Примена bounding circles метода - flyover

Код веће промене угла на фиксу потребно је пројектовати и додатни пар кружница по истом принципу, али на удаљености r од тачке пресека линије најкаснијег почетка заокрета и ивице примарног заштитног простора са унутрашње стране заокрета. Јединствена спољна ивица заокрета се добија спајањем тангенти ових кружница.

Код заокрета на IF, само у случају промене угла веће од 60° потребно је применити овај корак, јер се заштитни простор са спољне стране затвара тангентом на критичну граничну кружницу, која је постављена под углом од 30° у односу на правац номиналне путање у INTER сегменту (Слика 30). На добијену спољну ивицу додаје се ширина секундарног простора и дефинишу коначне границе заштитног простора заокрета са спољне стране. Код заокрета на IF је карактеристично спајање ивица примарног простора на првој граничној кружници, које се постиже у пресеку тангенти које су паралелне номиналној путањи INITIAL и INTER сегмента. На овај начин се добија тзв. „шшиц“ простора у којем је, у практичном смислу летења, мала вероватноћа појављивања ваздухоплова, али постоји као додатна теоријска заштита за различите брзине ваздухоплова.

Код заокрета на MATF, овај корак се примењује у случају промене угла веће од 90° (Слика 31). Заштитни простор са спољне стране затвара се тангентом на критичну граничну кружницу конструисану из завршног фикса MAEF, која представља најкаснију могућу путању. Она се додатно ротира за 15° на спољну страну простора. Ротирана тангента сече заштитни простор који се пружа од MAEF у правцу добијеном пре поступка ротирања и тако се добијају коначне границе заокрета за спољне стране.

Унутрашња ивица

Унутрашња ивица заокрета дефинише се од тачке најранијег почетка заокрета (earliest turning point), која је дефинисана у пресеку K-K' линије, управне на номиналну путању INITIAL сегмента, и ивице заштитног простора.

Код заокрета на IF (fly-by WP) ова тачка се дефинише на растојању ATT + TID испред WP, док се унутрашња ивица повлачи под углом у односу на правац INITIAL сегмента, који износи половину угла заокрета на WP: $\theta/2$ (Слика 30). Исти поступак се примењује за примарни и секундарни простор.

Код заокрета на MATF (flyover WP) тачка најранијег почетка заокрета се дефинише на растојању ATT испред WP (Слика 31). У случају промене угла до 90° , унутрашња ивица дефинише се из тачке са унутрашње стране заокрета, на полуширини заштитног простора у FAS сегменту. У случају веће промене угла, ивица се дефинише из тачке са спољне стране заокрета, на истој полуширини. У оба случаја заокрет са унутрашње стране се затвара у односу на дуж која представља најранију могућу путању, тј. повезује тачку најранијег почетка заокрета и MATF и ротирана је за 15° на спољну страну, тако да шири и сече заштитни простор заокрета дефинисан са MAEF, као и у случају спољне ивице заокрета.

5.4.4.5. Конекција INTER и CAT I сегмента (OAS равни)

Разликују се два приступа за спајање заштитног простора INTER сегмента и OAS равни:

- конекција када је X раван шири од заштитног коридора и
- конекција када је X раван ужа или једнака ширини заштитног коридора.

Конекција за ширу X раван

Када је највећа ширина X равни (пуна ширина са обе стране осе ПСС) већа од ширине заштитног коридора од 3518.8 m (1.9 NM), ширина заштитног простора INTER сегмента се сужава од растојања 3704 m (2.0 NM) испред FAP, до тачке бочно од FAP, коју дефинише пресек нормале на путању прилаза (у тачки FAP) и продужетак дужи DD'' (чини је пресек X и Y равни). Оваква ситуација се дешава када је FAP лоциран на већем растојању од THR (Слика 28 а).

Конекција за ужу X раван

Када је највећа ширина X равни (пуна ширина са обе стране осе ПСС) мања или једнака ширини заштитног коридора од 3518.8 m (1.9 NM), ширина заштитног простора сегмента међуприлажења се сужава од растојања 3704 m (2.0 NM) испред FAP, до тачке бочно од FAP, коју дефинише пресек нормале на путању прилаза (у тачки FAP) и продужетак ивице заштитног простора, која ограничава Y раван. Оваква ситуација се дешава када је FAP лоциран ближе THR (Слика 28 б)).

5.5. Поступак анализе надвишавања препрека

Општи поступак анализе надвишавања препрека се састоји од три основна корака:

1. Идентификација потенцијалних препрека - препреке у односу на које се дефинишу МОСА висине су оне које се налазе у оквирима граница заштитних простора сегмената, тј. OAS равни;
2. Примена норми надвишавања - на надморску висину идентификованих препрека додаје се прописана норма надвишавања - МОС;
3. Утврђивање контролне или критичне препреке - контролна препрека је она препрека која дефинише вредност МОСА (то не мора увек бити највиша препрека из скупа идентификованих), док се критична препрека идентификује у оквиру MAS сегмента и дефинише минималну дозвољену вредност CG.

Наведене величине иницијално су описане у оквиру одељка 2.3. Вредности МОС према сегментима дате су у наредне две табеле (Табела 8 и Табела 9, извор: [4]).

Табела 8. Приказ МОС вредности по сегментима за LPV процедуре

Сегмент		МОС
INITIAL		300 m (984 ft)
INTER		150 m (492 ft)
PRECISION	FAS	HL (према CAT)
	Inter. MAS	
MAS	straight	HL (према CAT)
	turn $\leq 15^\circ$	30 m (164 ft)
	turn $> 15^\circ$	50 m (98 ft)

За потребе надвишавања препрека користе се вредност HL за барометарски висиномер, према следећој табели (Табела 9).

Табела 9. HL вредност за коришћење барометарског висиномера

CAT	HL	
	Барометарски висиномер	Радио висиномер
D	49 m (161 ft)	26 m (85 ft)
C	46 m (150 ft)	22 m (71 ft)
B	43 m (142 ft)	18 m (59 ft)
A	40 m (130 ft)	13 m (42 ft)

Постоје два случаја, када је вредност HL барометарског висиномера неопходно додатно повећати, односно извршити корекцију HL [4]:

- Када је надморска висина ПСС већа од 900 m (2953 ft), нова НЛ се добија када се на вредност НЛ барометарског висиномера дода увећање од 2% од вредности НЛ радио висиномера (за исту САТ), за сваких 300 m (984 ft) надморске висине ПСС;
- Када је угао прилаза већи од 3.2°, нова НЛ се добија када се на вредност НЛ барометарског висиномера дода увећање од 5% од вредности НЛ радио висиномера (за исту САТ), за сваких 0.1° повећања (у опсегу од 3.2 до 3.5°).

Због специфичности начина спровођења ова три корака између различитих сегмената LPV процедура, поступак анализе надвишавања препрека биће објашњен по сегментима:

- анализа INITIAL и INTER сегмената,
- анализа САТ I сегмента (FAS и initial и intermediate фаза MAS сегмента) и
- анализа MAS сегмента.

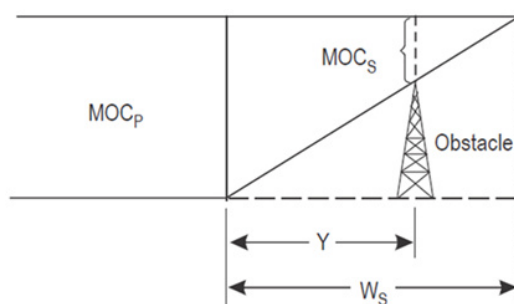
У случају било какве промене у улазним подацима или елементима конструкције поступак анализе надвишавања препрека се понавља.

5.5.1.Анализа INITIAL и INTER сегмената

Предуслов за спровођење поступка анализе препрека у ова два сегмента представља конструисање примарног и секундарног заштитног простора. Како се овај простор дефинише у хоризонталној равни, норме надвишавање се додају на све препреке идентификоване у оквиру њихових граница.

На препреке у оквиру примарног простора примењује се пуна вредност норми надвишавања - MOC_P (Слика 9), што значи да је контролна препрека она која има највећу надморску висину.

На препреке идентификоване у оквиру секундарног простора примењује се вредност норми надвишавања сразмерно смањена у односу на удаљеност од ивице примарног простора - MOC_S (Слика 32, извор).



Слика 32. Прорачун MOC_S у секундарном простору

Формула за прорачун MOC_S у секундарном простору је следећа:

$$MOC_S = MOC_P \cdot \left(1 - \frac{Y}{W_S}\right) (m), \quad (29)$$

где је:

W_S - ширина секундарног простора, мерена управно на номиналну путању,

Y - растојање препреке од спољне ивице примарног простора, мерено управно на номиналну путању.

Коначна контролна препрека на сегменту је она у односу на коју је установљена највећа вредност минималне висине летења.

Када се разматра праволинијски сегмент, утврђена контролна препрека и минимална висина сегмента су исте за све САТ ваздухоплова, јер су димензије заштитног простора идентичне. Због различитих брзина ваздухоплова, сегменти са заокретом имају различите димензије заштитног

простора, па се анализа надвишавања спроводи посебно за сваку CAT за коју се процедура пројектује.

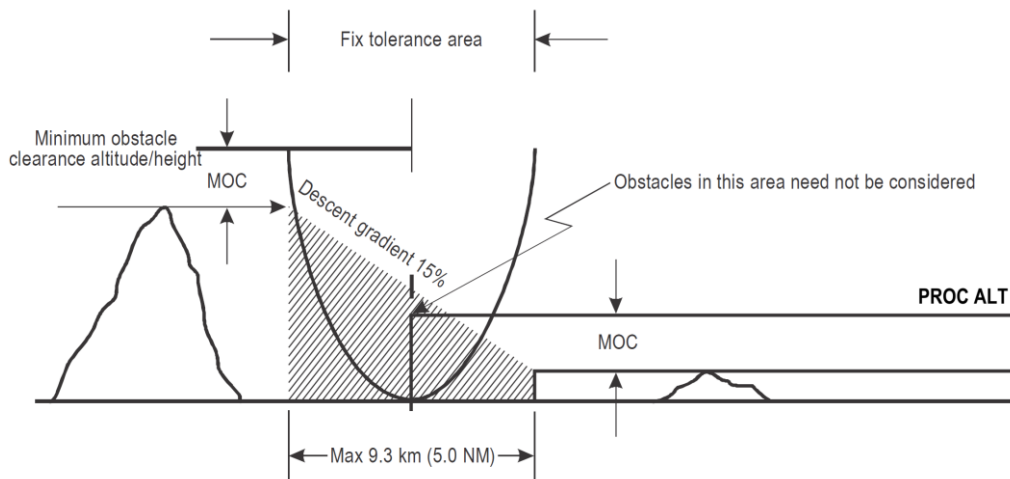
У случају заокрета, потребно је конструисати посебну линију у односу на коју се утврђује да ли препрека припада претходном или следећем сегменту, што утиче на коначне вредности минималних висина на тим сегментима. Ова линија је названа NN'N^с линија, и карактеристична је само за заокрете на IAF и IF, јер припадају fly-by типу WP, као и код примене SDF, када је потребно омогућити додатно снижавање висине ваздухоплова. У наведеним случајевима NN'N^с линија представља линију најранијег снижавања висине, при чему она није колоцирана са локацијом линије на којој се налази тачка најранијег почетка заокрета (Слика 30).

Са спољне стране заокрета, NN' део линије конструише се управно на правац номиналне путање претходног сегмента, на удаљености од АТТ испред WP.

Други део линије, N'N^с, који се конструише са унутрашње стране заокрета, паралелан је правцу линије која полови угао заокрета у WP (тзв. bisector), и дефинише се на растојању од АТТ испред те линије.

Први и други део линије се секу у тачки N'. Удаљеност до препреке се мери по најкраћем растојању, односно по правцу управном на најближи део NN'N^с линије.

Предвиђено је да се принципи SDF аутоматски примењују на IAF и IF фиксевима како би се у иницијалном кораку избегле препреке у њиховој близини, које се налазе испод теоретске равни са нагибом од 15% (Слика 33, извор: [4]). За потребе прорачуна висине на претходном сегменту, користи се PROC ALT утврђена за тај сегмент на основу вредности прорачунатог TRD и изабраног DG/GPA.



Слика 33. Поступак елиминације препрека

Иако овај приступ није у потпуности у складу са PANS-OPS критеријумима, који подразумевају употребу MOCA у ову сврху, његова примена се врши у циљу превазилажења ограничења која могу настати у изворном случају. Наиме, приликом дефинисања формуле за максималну висину препреке након SDF није разматран случај када претходна MOCA има нижу вредност од MOCA дефинисане на следећем сегменту, или када та разлика није велика. У том случају раван од 15% неће имати никакву функцију јер ће бити испод свих препрека у наставку лета. Зато је предложена употреба PROC ALT, које представљају стварне вредности висина, које прате расположиву дужину путање и прописане градијенте понирања, испод којих се ваздухоплови не могу наћи.

Општа формула за дефинисање максималне дозвољене надморске висине препреке ($\max OBST_{ELEV}$) испод равни од 15%, која се примењује на тзв. „close-in“ препреке на растојању до 9260 m (5 NM) у односу на описану линију од које се одређује почетак сегмента, има следећи облик:

$$\max OBST_{ELEV} \leq PROC_ALT - MOC_p - d_o \cdot 0.15 (m), \quad (30)$$

где је:

PROC ALT - PROC ALT на сегменту пре заокрета,
 МОС_р - МОС у примарном простору на сегменту пре заокрета,
 d₀ - удаљеност препреке од "NN'N" линије.

5.5.2. Анализа CAT I сегмента

Анализа препрека у тзв. „прецизном сегменту“ обавља се у односу на дефинисане OAS равни.

Након идентификације потенцијалних препрека које се налазе у границама хоризонталне пројекције OAS равни на земљу, проверава се продор OAS равни.

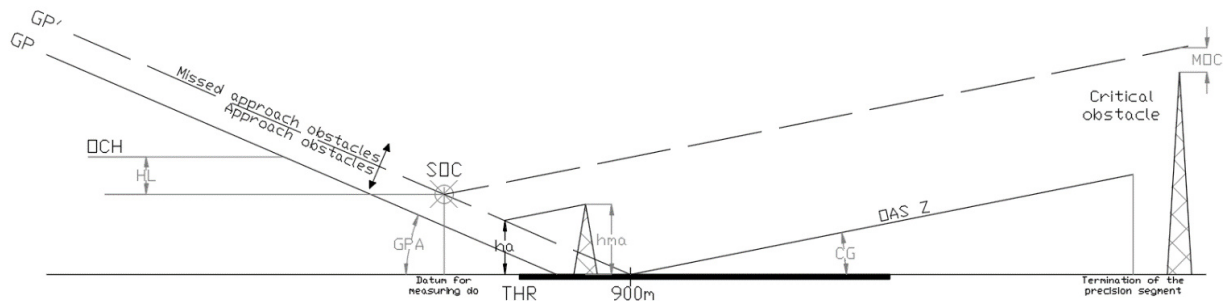
За разлику од INITIAL и INTER сегмента, само оне препреке које врше продор хоризонталне и косих равни узимају се у обзир приликом одређивања вредности OCA/H. Провера продора OAS равни врши се за локацију препреке у односу на усвојени координатни систем (Слика 25), према једначини OAS равни у оквиру чијих граница се препрека налази: $z = Ax + By + C$, где z представља релативну висину равни на локацији препреке (x, y), у односу на THR. Препрека пробија OAS раван уколико је $h > z$, где h , такође, представља релативну висину препреке у односу на THR.

У циљу одређивања коначне вредности OCA/H, релативне висине препрека које продиру OAS равни је потребно свести на исту основу. У том смислу, препреке у прецизном сегменту су класификоване као препреке у прилазу (approach obstacles), са релативном висином у односу на THR - h_a и препреке у неуспелом прилазу (missed approach obstacles), са релативном висином у односу на THR - h_{ma} .

Класификација препрека је првенствено намењена за потребе анализе надвишавања препрека у оквиру хоризонталне OAS равни, у чијем опсегу се налази граница краја FAS сегмента и почетак почетне фазе MAS сегмента. Иако формално оба дела ова два сегмента припадају прецизном (CAT I) сегменту, за који заштитни простор представљају OAS равни, потреба за класификацијом препрека настаје због различитог начина анализирања надвишавања препрека када се пређе у MAS сегмент (биће објашњено у наредном поглављу).

Постоје два метода за спровођење класификације препрека. Према првом, једноставнијем, методу граница између припадности препрека је утврђена на растојању X_E , које се код LPV процедура налази на 900 m иза THR (Слика 34, извор [55]). У овом случају, гранична линија је управна на хоризонталну раван.

Међутим, како овај метод, у екстремним ситуацијама, може узроковати превелику пенализацију процедуре од стране појединих препрека у неуспелом прилазу, препоручује се употреба другог метода за класификацију препрека.



Слика 34. Класификација препрека у прецизном сегменту и локација SOC

Према другом методу граница између припадности препрека је, такође, утврђена на растојању X_E (на 900 m иза THR), али у овом случају гранична линија није управна на хоризонталну раван, већ је паралелна равни понижавања GP и означава се са GP' (Слика 34). У овом случају све препреке чија релативна висина прелази $(X - X_E) \cdot \tan GPA$ сматрају се препрекама у неуспелом прилазу.

За класификоване препреке у прилазу вредност ОСН се добија када се на релативну висину препреке (h_a) дода вредност НЛ за одређену САТ.

У случају препрека у неуспелом прилазу, пре прорачуна вредности ОСН, њихова релативна висина (h_{ma}) се своди на еквивалентну релативну висину препреке у прилазу (h_a), према следећој формули:

$$h_a = \frac{h_{ma} \cdot \cot Z + (X + 900)}{\cot Z + \cot GPA} \quad (m) \quad (31)$$

где је:

h_a - релативна висина (еквивалентне) препреке у прилазу,

h_{ma} - релативна висина препреке у неуспелом прилазу,

GPA - угао прилаза ($^\circ$),

Z - угао ОАС Z равни неуспелог прилажења ($^\circ$), $Z = \arctg (CG/100)$

X - растојање препреке од ТНР (m), узима негативну вредност иза ТНР,

X_E - растојање од ТНР на коме почиње Z ОАС раван (локација тачке Е), $X_E = -900$ m.

За утврђивање вредности ОСН за препреке у неуспелом прилазу, НЛ се додаје на еквивалентну релативну висину препреке у прилазу (h_a).

Контролна препрека је највиша препрека из скупа идентификованих препрека у прилазу (h_a) и препрека у неуспелом прилазу, које се своде на еквивалентну h_a .

Крајња вредност ОСН зависи и од других улазних елемената процедуре, као што је нпр. бочни прилаз. Његова геометрија у појединим случајевима може проузроковати и већу вредност ОСН него ону прорачунату у односу на препреке које продиру ОАС равни.

У том контексту, приликом примене бочног прилаза дефинисано је ограничење у виду минималне дозвољене вредности ОСН, које се рачуна на следећи начин:

$$\text{релативна висина пресека} + 20 \text{ m (66 ft).}$$

Како најмања дозвољена релативна висина пресека бочног прилаза и продужене осе ПСС износи 55 m (180 ft), минимална вредност ОСН износи:

$$55 \text{ m (180 ft)} + 20 \text{ m (66 ft)} = 75 \text{ m (246 ft)},$$

што је изнад вредности системског минимума од 60 m (200 ft) [4]. Применом бочног прилаза се директно пенализује процедура по питању оперативних минимума. Када је тачка пресека даља од ТНР, пенализација је већа, али се комплексност процедуре смањује, јер је заокрет у правац ПСС на већем растојању, тако да посаде имају више времена за реакцију.

5.5.3. Анализа MAS сегмента

За разлику од INITIAL и INTER сегмената, где се дефинише МОСА, и САТ I сегмента где се дефинише ОСА/Н, у оквиру MAS сегмента дефинише се градијент пењања CG, како би се изнад критичне препреке обезбедила прописана норма надвишавања. Ово је једини сегмент LPV процедуре у оквиру кога се пројектује номинална путања у пењању за потребе достизања одговарајуће висине и наставка лета.

Ширина заштитног простора на почетној тачки заокрета у финалној фази MAS сегмента, пре и након завршетка ОАС равни, задржава вредност ширине ОАС равни, тако да се не примењује принцип секундарног простора [4]. Секундарни простор се примењује тек након заокрета. Ова карактеристика LPV процедура је веома битна јер обезбеђује мање димензије заштитног простора, чиме се повећава могућност имплементација процедура.

Анализа препрека у MAS сегменту се, као и његова конструкција, врши у зависности да ли је номинална путања дефинисана у правцу (праволинијски сегмент) или са заокретом:

- неуспели прилаз у правцу (straight-in MAS) или
- неуспели прилаз са заокретом (turning MAS).

У оба наведена случаја, референцу у односу на коју се врши прорачун надвишавања препрека и градијента пењања, представља тачка SOC (Слика 34).

У случају straight-in MAS, ширина заштитног простора након завршетка OAS равни остаје иста као и у случају прецизног сегмента, све до MAEF. Примењује се принцип примарног заштитног простора.

У случају turning MAS, прецизни сегмент се скраћује и завршава на линији најранијег почетка заокрета прорачунатог у односу на MATF. Ширина заштитног простора, такође, остаје иста, али се након заокрета шири до MAEF, до ширине заштитног простора RNP APCH навигационе спецификације (Табела 7).

У оба случаја, локација SOC се прорачунава путем наредне формуле:

$$X_{SOC} = -900 + (OCH \cdot 0.3048 - HL) / \tan GPA (m) \quad (32)$$

Након сваког прорачуна OCH неопходно је поново извршити прорачун SOC и проверити да ли се тачка евентуалног заокрета у MAS, налази у прописаним границама, тј. на растојању од најмање ATГ од SOC. Уколико ово није случај, решење није допуштено.

У циљу потврде да је изабрана CG вредност у улазним подацима довољна за надвишавање препрека у MAS сегменту, неопходно је упоредити је са максималним градијентом добијеним у односу на критичну препреку из скупа идентификованих препрека ($i \in [1, N]$):

$$CG \geq \max_{i \in [1, N]} \left(\frac{OBST_{ELEV_i} + MOC_i - (THR_{ELEV} + OCH - HL)}{d_o} \right) \quad (33)$$

где d_o представља најкраће растојање од препреке до SOC, у случају straight-in MAS, односно, представља збир хоризонталног растојања од SOC до тачке најранијег почетка заокрета (KK' линија) - d_z и најкраћег растојања од те тачке до препреке, код turning MAS. Табела 8 и Табела 9 садрже улазне податке за прорачун, с тим што је за straight-in MAS $MOC = 0$. THR_{ELEV} представља надморску висину прага слетања.

Приликом спровођења анализе надвишавања препрека у MAS сегменту са заокретом у оквиру граница OAS равни, препреке које се налазе испод Y OAS равни (које је не пробијају - осенчени део простора, Слика 31), не морају се узети у обзир приликом идентификације критичних препрека. Овај део простора се налази са спољне стране и вероватноћа колизије ваздухоплова са препрекама испод ове равни у заокрету са пењањем је минимална.

5.6. Опште претпоставке за апроксимацију проблема

У оквиру поступка апроксимације реалног проблема, а у циљу утврђивања његових граница за потребе израде модела, поред уведених специфичних ограничења, коришћене су следеће опште претпоставке:

- П1:** Општа правила за пројектовање LPV процедура подразумевају примену прописаних PANS-OPS критеријумима и повезаних принципа која из њих произилазе. Оперативни захтеви, који ограничавају употребу критеријума, морају бити утврђени унапред од стране експерта (пројектанта/доносиоца одлуке), и унета у виду одговарајућих ограничења у математички модел.
- П2:** Модел првенствено разматра употребу процедуре од стране летачких посада ваздухоплова и утицај изабраног решења на обављање њихових активности.
- П3:** Модел разматра пројектовање процедура искључиво за тзв. „fixed-wing“ ваздухоплове стандардних димензија (хеликоптерске процедуре (Cat H) нису разматране).

- П4:** Модел узима у обзир С и D категорију ваздухоплова према брзини. Највећу групу комерцијалних транспортних ваздухоплова који слећу на цивилне међународне аеродроме чине фамилије Airbus A320 и Boeing 737 ваздухоплова, који припадају CAT C. Када су препреке безбедно надвишене за CAT C и D ваздухоплове, подразумева се да је тај услов испуњен и за ниже CAT (A и B), јер су заштитни простори мањих димензија и налазе се у границама простора утврђених за веће CAT.
- П5:** Модел као главну излазну вредност разматра OCH. У оквиру модела се не разматра дефинисање оперативних минимума - DA/H и захтева видљивости.
- П6:** Модел не разматра пројектовање и проверу препрека у односу на површ визуелног сегмента (visual segment surface - VSS), између OCH и THR. Овај поступак мора бити накнадно спроведен, у складу са изабраним решењем. У највећем броју случајева, његови резултати не би требало да представљају ограничавајући фактор за имплементацију процедуре (најчешће критичне препреке представља дрвеће у околини THR, чија висина се може контролисати редовним одржавањем).
- П7:** Моделом није предвиђено пројектовање посебне процедуре чекања (holding procedures) на крају неуспелог прилаза, већ је завршетак процедуре дефинисан на тачки MAEF, на одговарајућој висини, која мора бити предефинисана.
- П8:** У процесу пројектовања не разматра се испуњеност регулаторних захтева по питању карактеристика ПСС за тип инструменталне стазе за прецизни прилаз (димензија ПСС и основне стазе, постојање система светлосног обележавања и сл.).
- П9:** У процесу пројектовања не узимају се у обзир евентуалне постојеће процедуре и системи слетања на аеродрому.
- П10:** Пројектовање елемената процедура се спроводи у планарној геометријској пројекцији, која се најчешће користи у рачунарској графици и у складу је са PANS-OPS критеријумима. Користи се паралелна ортогонална пројекција, код које је пројекциона раван нормална на Z осу (ортографска пројекција - поглед одозго), дефинисану у односу на координатни почетак који се налази у прагу за слетање.
- П11:** За потребе извршавања прорачуна у оквиру модела користи се основна јединица мере - метар (m), која припада међународном систему јединица (système international d'unités - SI). Вредности изабраних улазних променљивих и прорачунатих излазних променљивих се, у зависности од потребне мерне јединице, врше у стопама (feet - ft) или морским (наутичким) миљама (nautical miles - NM), које представљају тзв. non-SI јединице. Њихове вредности су заокружене и конвертоване у складу са PANS-OPS критеријумима.
- П12:** Пројектовање процедуре се спроводи искључиво за потребе обављања нормалних операција, када су испуњени сви предуслови за коришћење процедуре; утицај отказа GNSS сигнала, мотора ваздухоплова и друге ванредне ситуације налазе се ван опсега овог рада.
- П13:** Приликом решавања проблема није разматрана употреба додатних функционалности ваздухоплова које не представљају стандард за RNP APCH навигациону спецификацију, као што је нпр. могућност обављања заокрета са константним радијусом, тј. „RF leg“ способност.
- П14:** У складу са П2, модел не разматра примену поступака радарског векторисања за прилажење ваздухоплова, већ се претпоставља употреба процедуре у потпуности у складу са начином како је пројектована (без додатних инструкција од стране контроле летења).
- П15:** Појављивање ваздухоплова у систему је дефинисано на IAF и сматра се да они долазе поравнати у односу на правац сегмента почетног прилажења (без заокрета на IAF).

6. ТИП ПРОБЛЕМА

Квалитет решења пројектованих LPV процедура зависи од вредности низа излазних променљивих, које се прорачунавају у оквиру граница прописаних PANS-OPS критеријума. У циљу добијања најбољег решења, потребно је пронаћи скуп вредности улазних променљивих који обезбеђује (приближно) оптималне вредности излазних фактора квалитета, у оквиру области допустивих решења.

6.1. Тежина проблема

Имајући на уму природу и структуру проблема, која подразумева постојање коначног пребројивог скупа могућих дискретних вредности за његово решавање [73], јасно је да описани проблем спада у домен **комбинаторне оптимизације**. Општи облик модела комбинаторне оптимизације (combinatorial optimization – CO) се састоји од коначног простора претраге (F), коначног скупа ограничења (Ω) и функције циља (f): CO = (F, Ω , f) [74].

У случају проблема пројектовања LPV процедура, простор претраге је ограничен вредностима улазних променљивих, скуп ограничења је дефинисан скупом PANS-OPS критеријума, и функција циља представља меру квалитета решења, тј. пројектоване процедуре. Даља разрада елемената модела комбинаторне оптимизације извршена је у оквиру поглавља 7.

Проблеми из домена комбинаторне оптимизације се, не залазећи дубље у рачунарску теорију сложености (computational complexity theory) могу грубо поделити у две групе [75].

Прву групу чине проблеми који се могу решити на једноставан начин и у оквиру краћег временског периода, које се још назива и **полиномијално време** (polynomial time), и означавају се латиничним словом P.

У другу групу проблема спадају сви проблеми за чије решавање је неопходна изузетно велика количина времена, што обично подразумева да је добијање решења практично неизводљиво. Ова група проблема се још назива и **NP-тешки проблеми** (NP-hard), где NP значи недетерминистичко полиномијално време (non-deterministic polynomial time).

Најпознатији представници ове групе проблема су: проблем трговачког путника (traveling salesman problem - TSP), проблем кинеског поштарца (chinese postman problem или route inspection problem), проблем ранца (knapsack problem), проблем партиционисања (бојења) графова (graph partitioning (coloring) problem), проблем распоређивања послова на машине (job (shop) scheduling problem – J(S)SP), проблем оптимизације мреже (network optimisation problem - NOP) и нпр. проблем рутирања возила (vehicle routing problem - VRP), као и други слични типски проблеми.

У теорији, наведени проблеми комбинаторне оптимизације би применом **класичних алгоритама оптимизације** могли бити решени само у бесконачном периоду времена, јер се континуални, односно диференцијални карактер њихових функција циља не може једноставно препознати и формулисати [76]. Алтернативни приступ подразумева примену другачије класе алгоритама, који се зову **хеуристички алгоритми оптимизације**, и који за наведене проблеме могу понудити решења приближно оптималним, у коначно кратком временском периоду. Због наведеног својства ова група алгоритама се још назива приближним алгоритмима. Више речи о овим алгоритмима биће у поглављу 8.

На основу броја улазних променљивих, које представљају одлуке у оквиру процеса пројектовања LPV процедура, у односу на које се формира коначно решење, може се без сумње закључити да овај проблем има **вишедимензиони карактер**.

Даље, у сврху одређивања сложености проблема потребно је одредити укупан број комбинација за пројектовање једне процедуре. Како за дати проблем тренутно не постоји утврђена математичка формулација, биће искоришћени резултати моделирања из овог рада, који су представљени у оквиру Прилога 5.

Уколико се искористе вредности из домена управљачких променљивих, дефинисаних за потребе формулације математичког модела у оквиру овог рада, уз сва примењена ограничења, претпоставке и апроксимације, које оправдано умањују сложеност реалног проблема пројектовања LPV процедура, добија се укупан број од $1.53E+22$ могућих комбинација решења. Укупан број комбинација решења добијен је множењем броја могућих вредности у оквиру домена једне улазне променљиве са истим бројем дефинисаним за сваку следећу улазну променљиву. Реалан број комбинација решења, када се узму у обзир недискретизоване вредности улазних елемената процедура, је значајно већи.

На основу овог броја може се прорачунати оквирно време потребно за претрагу скупа решења, за пројектовање LPV процедура. У ту сврху извршено је поређење са познатим временским интервалом потребним за претрагу решења типског проблема, које има еквивалентне димензије.

Разматран је проблем ранца са 74 предмета, од којих је сваки одређен својом вредношћу (нпр. новчаном) и масом. Из датог скупа потребно је изабрати предмете са што већом вредношћу који ће бити стављени у ранца, при чему се не сме прећи максимална дозвољена носивост ранца. Иако су структура и процес претраге проблема ранца доста једноставнији, за његово решавање могуће је изабрати укупно $1.15E+18$ различитих решења, што је релативно приближна вредност сложености утврђена за проблем пројектовања LPV процедура. Познато је да овај ниво сложености одговара укупном времену од преко 21 700 година колико би било потребно да се провери резултат за свако од њих [77]. То значи да би за случај проблема пројектовања LPV процедура укупно потребно време било још веће, поготово имајући на уму чињеницу да време рада алгоритма има експоненцијалан раст.

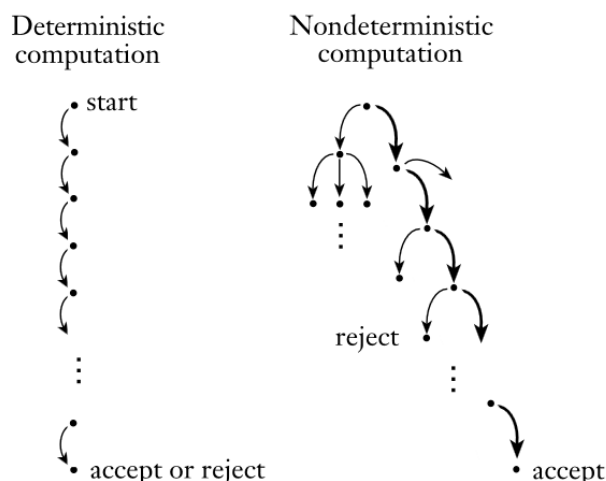
Иако се у оквиру овог рада нећемо бавити формалним доказивањем припадности описаног проблема одређеној групи према тежини решавања, на основу добијених резултата индикативно је да проблем пројектовања LPV процедура има превелике димензије за решавање класичним детерминистичким техникама, и да је за ту сврху потребно применити неки од недетерминистичких алгоритама.

За разлику од **детерминистичких алгоритама**, који се понашају увек на исти начин, у складу са стриктно прописаним правилима, **недетерминистички алгоритми** своју способност промене понашања дугују принципу доношења одлука на стохастички начин, уграђеном у њихов механизам извршавања [78]. Они имају способност другачијег понашања чак и за исте улазне податке, након поновљеног извршавања. Због тога се називају и алгоритмима стохастичке оптимизације [75]. Ови алгоритми на случајан начин врше избор једне од ограниченог броја понуђених опција и те одлуке такође верификују у полиномијалном времену.

Међутим, у складу са [78], процес рада недетерминистичких алгоритама ни у ком случају не треба сматрати случајним у потпуности, већ као адекватну систематичну процедуру претраживања решења, која није вођена простом ефикасношћу својих корака, већ крајњим стањем, а то је успешно постизање циља и избегавање неуспеха претраге решења.

Ради лакше визуелизације начина рада детерминистичких и недетерминистичких алгоритама, графички приказ њихове структуре дат је на следећој слици (Слика 35, извор: [79]).

За разлику од детерминистичких, чија је структура једносмерна и директно води ка једном решењу, односно његовом прихватању или одбијању, структура недетерминистичких алгоритама је разграната и вишесмерна, и омогућава разматрање већег броја различитих решења у истом времену или броју корака.



Слика 35. Структура детерминистичких и недетерминистичких алгоритама

6.2. Класификација проблема

Поред усвојене претпоставке да проблем пројектовања LPV процедура припада групи NP-тешких проблема, у циљу олакшавања поступка формулације математичког модела извршена је његова додатна прелиминарна класификација, заснована на радовима [75] и [52].

Имајући у виду описана ограничења која су присутна у процесу пројектовања LPV процедура, може се рећи да овај проблем припада класи тзв. **ограничене оптимизације** (constrained optimization). Сва ограничења морају бити уграђена у будући математички модел.

Даље, како постоји посредна веза улазних променљивих и квалитета добијених решења, евидентно је да ће улазне променљиве бити део будуће функције циља модела, а пошто се налазе и у оквиру дефинисаних ограничења, говоримо о тзв. **неодвојивом проблему** (non-separable problem).

Описани проблем се на основу улазних променљивих, као скупа дискретних променљивих, може окарактерисати и као проблем **дискретне оптимизације** (discrete optimization).

На крају, на основу наведених фактора који утичу на оцену квалитета решења, дефинитивно се може закључити да предметни проблем спада у класу проблема **вишекритеријумске оптимизације** (multi-objective optimization).

7. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ

7.1. Основни елементи модела

Након дефинисања главних аспеката проблема, следећа фаза моделирања подразумева прилагођавање проблема форми погодној за спровођење анализа, односно адекватну транзицију из стварног у математичко окружење.

Описани проблем се, услед својих карактеристика, може представити у аналитичком облику, али се не може и решити на аналитички начин (нпр. системом алгебарских или диференцијалних једначина). Из тог разлога, потребно је применити тзв. **нумерички метод** за моделирања проблема [80]. Нумеричким методом се аналитички облик проблема решава нумеричким приступом, односно налажењем одређеног скупа вредности зависних и независних променљивих, које задовољавају задате једначине модела.

Овај поступак обухвата дефинисање математичког модела, који се у општем случају састоји од функције циља, управљачких променљивих, ограничења и параметара. Код проблема комбинаторне оптимизације може бити написан у следећој генеричкој форми [52]:

$$\text{функција циља:} \quad \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d} f_i(\mathbf{x}), \quad i = (1, 2, \dots, M) \quad (34)$$

уз ограничења:

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j = (1, 2, \dots, J) \quad (35)$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0, \quad k = (1, 2, \dots, K) \quad (36)$$

где су $f_i(\mathbf{x})$, $h_j(\mathbf{x})$ и $g_k(\mathbf{x})$ функције управљачких променљивих, односно вектора управљачких променљивих:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T \quad (37)$$

Вредности M , J и K означавају укупан број критеријумских функција, једнакосних и неједнакосних ограничења, респективно. Поред тога, вредност d представља број променљивих у вектору решења, док вредност T означава операцију транспоновања, за претварање вектора реда у вектор колоне:

$$[x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_d]^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_d \end{bmatrix} \quad (38)$$

Функција циља представља основни елемент модела. Њена намена је да изврши мерење учинка (перформанси) модела приликом решавања постављеног проблема. Дефинисана је као математичка функција управљачких променљивих \mathbf{x} .

У зависности од тога да ли се моделом жели добити највећа или најмања вредност функције циља, говоримо о проблему максимизације или минимизације, респективно. Према [75] функција циља која се максимизира се назива и функцијом квалитета, профита или ефикасности (quality/profit/efficiency function), односно функцијом трошка или казне (cost/penalty function) у случају минимизације. У општем случају, превођење функције максимизације у функцију минимизације, и обратно, је једноставан и реверзибилан поступак, тако да се у зависности од карактеристика моделираног проблема може користити један или други облик.

Управљачке променљиве (design или decision variables) представљају тачно одређен број повезаних мерљивих одлука које морају бити донесене, односно чије вредности треба да буду утврђене приликом решавања проблема. Управљачке променљиве се у оквиру математичког модела могу дефинисати као реалне континуалне, дискретне или комбинација ова два типа вредности.

Иницијализација променљиве представља поступак додељивања вредности (v_d^r) променљивој x_d из расположивог скупа, тј. домена вредности дате променљиве D_d . Поступак иницијализације променљиве представља се једначином $x_d = v_d^r$ ($v_d^r \in D_d$), при чему r означава укупан број решења.

Ограничења представљају математичке изразе којима се на било који начин ограничавају вредности управљачких променљивих. Најчешће се исказују помоћу система неједначина и/или једначина.

Параметри представљају константне вредности које се налазе у оквиру ограничења и функције циља. Параметри су непроменљиви елементи модела, и називају се још и коефицијенти. Избор вредности параметара представља критичан корак приликом дефинисања математичког модела, јер од њега може зависити успешност апроксимације проблема који ће се посредно одразити и на квалитет решења добијених моделом. Из тог разлога, приликом избора вредности параметара често се спроводи поступак који се назива анализа осетљивости (sensitivity analysis), у оквиру кога се на експерименталан начин утврђује да ли ће и у којој мери измена вредности параметара утицати на квалитет добијених решења.

На основу наведеног, може се рећи да је сврха математичког модела избор вредности управљачких променљивих у циљу оптимизације (максимизације или минимизације, у зависности од поставке проблема) функције циља, уз поштовање прописаних ограничења. Како за било који специфичан проблем не постоји један идеалан математички модел, добијени резултати директно зависе од правилног подешавања свих наведених елемената модела.

7.1.1. Додатне карактеристике модела

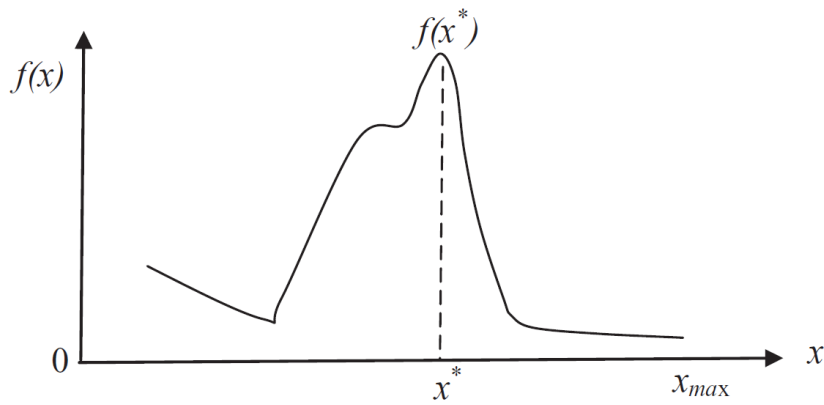
Вредност M у оквиру функције циља $f_i(\mathbf{x})$ представља број критеријума које треба оптимизовати. У случају када је $M = 1$ говоримо о проблему једнокритеријумске (single objective) оптимизације. Када је $M > 1$ у питању је проблем вишекритеријумске или вишеатрибутне (multi-objective/multi-criteria/multi-attribute) оптимизације. Већина реалних проблема спада у класу вишекритеријумских проблема.

Такође, код једнокритеријумске оптимизације функција циља најчешће узима скаларну вредност $f_i(\mathbf{x})$, док код вишекритеријумске има векторски облик $f_i(\mathbf{x})$, где је према [52] $\mathbf{x} = \vec{x}$. У том смислу, можемо разликовати скаларну и **векторску оптимизацију**.

За потребе поставке проблема комбинаторне оптимизације, неопходно је разумети и термине простор претраге и простор или скуп допустивих решења (већ поменуте у поглављу 6.1). Простор ограничен могућим вредностима управљачких променљивих назива се простор претраге $F = R^d$ (design space или search space), док се простор формиран постављеним ограничењима назива скуп допустивих решења $S = R^M$ (solution space или response space), и он је подскуп скупа F ($S \subseteq F$).

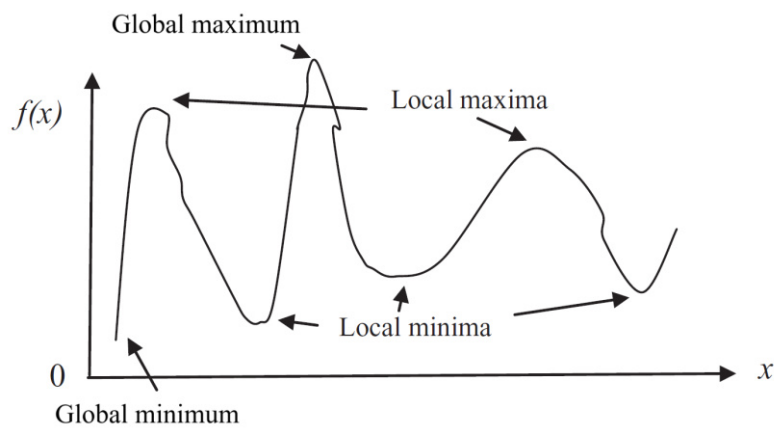
За решење \mathbf{x}^* кажемо да је оптимално када не постоји друго решење у оквиру скупа допустивих решења S које је боље од њега, односно важи да је $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x}) \forall \mathbf{x} \in S$ (у случају минимизације).

На следећој слици (Слика 36, извор: [75]) приказане су вредности функција циља $f(\mathbf{x})$ у односу на једну управљачку променљиву (димензију) x , од које је зависна, која припада континуалном типу променљивих (може да узме било коју вредност између 0 и x_{max}). Са слике се види да у тачки \mathbf{x}^* функција има највећу вредност и да ова тачка, односно управљачка променљива, представља оптимално решење у случају проблема максимизације.



Слика 36. Једнодимензионална функција $f(x)$

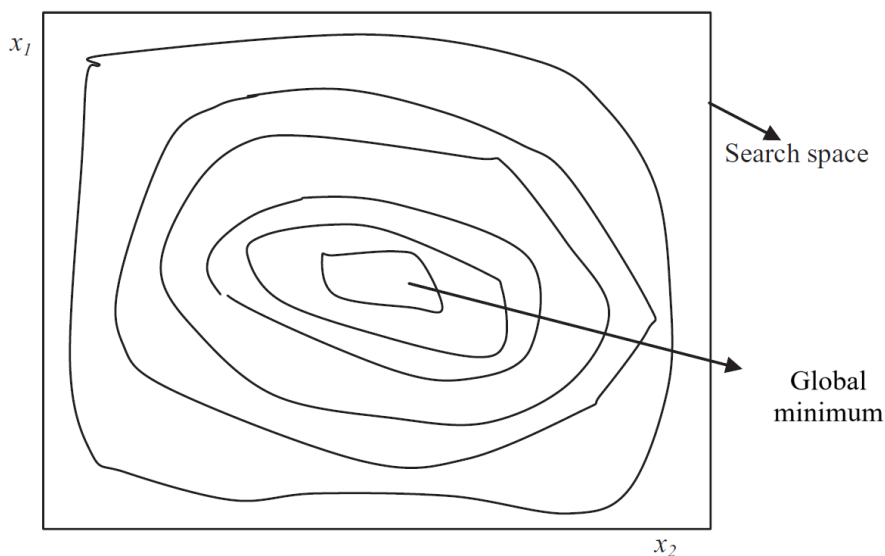
Такође, поред овог ређег случаја, код проблема оптимизације се јавља и ситуација када функција циља има комплекснији облик (Слика 37, извор: [75]).



Слика 37. Једнодимензионална функција са више локалних MAX и MIN

У овом случају проблем оптимизације је тежи, јер је глобални максимум или минимум (оптимално решење) потребно пронаћи у низу решења приближних вредности, која представљају локалне максимуме или минимуме.

Код функција циља са више управљачких променљивих (димензија – $f(x_1, x_2, \dots)$) проблем оптимизације се додатно усложњава, јер се и сам простор претраге увећава и мења (Слика 38, извор: [75]).



Слика 38. Дводимензионална функција са једним оптимумом

Проблем пројектовања LPV процедура сврстава се у домен вишекритеријумске оптимизације, при чему простор допустивих решења може бити високодимензионалан због већег броја променљивих који се могу јавити у оквиру математичког модела.

Теоретски, већи број критеријумских функција, односно функција циља, може се истовремено узети у обзир, с циљем да се постигне њихово што боље усклађено задовољење. То значи да је могуће пронаћи **идеалан вектор решења** (ideal objective vector), односно идеалне вредности функција циља. Идеалне вредности функције циља одређују **идеалну тачку** у простору допустивих решења, односно идеалну вредност векторске функције приказане поједностављено на следећи начин: $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_M^*)$.

Вектор управљачких променљивих x^* који даје идеалне, односно оптималне вредности свих појединачних критеријума, тј. функција циља, назива се **савршено решење**.

Остваривост савршеног решења код вишекритеријумских проблема у пракси је врло мало вероватна, јер подразумева проналажење једног оптималног решења, под условом да функције циља нису у конфликту. Међутим, код пројектовања процедура за инструментално прилажење добијање оваквог оптималног решења је могуће и зависи искључиво од испуњености критеријума по питању безбедног надвишавања препрека, што је условљено конфигурацијом терена и расподелом вештачких објеката око посматраног аеродрома.

У сваком другом случају, свака од функција циља има своје посебно решење, односно посебан вектор управљачких променљивих, за које узима оптималну вредност. Таква решења се називају **маргинална решења**.

Када није могуће добити савршено решење, добија се тзв. **парето-оптимално решење** (pareto-optimal). Према [52], за решење x_* (где $x_* \in F$) се каже да је парето-оптимално уколико не постоји ни један други могући вектор решења који би обезбедио смањење вредности једне функције циља (критеријума), а да при томе истовремено не дође до повећања вредности друге функције циља (критеријума). Овакво решење се назива недоминирано (non-dominated) решење, када не постоји ни једно друго решење које је у односу на њега доминантно. Из тог разлога се још назива и доминантно или ефикасно решење.

За разлику од једнокритеријумске оптимизације која најчешће садржи једно оптимално решење, у оквиру оптимизације са више критеријума добија се скуп решења. Овај скуп се назива парето-оптималан скуп p_* и састоји се од вектора управљачких променљивих x_* , који се називају недоминираним у простору претраге парето-оптималног скупа. Због тога се вишекритеријумска оптимизација још назива и **парето оптимизација**.

7.2. Управљачке променљиве

Један од највећих изазова, уједно је и један од првих корак у оквиру поступка моделирања проблема пројектовања и оптимизације LPV процедура, јесте избор адекватних управљачких променљивих (УП), у оквиру математичког модела. Овај избор је кључан за структуру и дефинисање понашања целокупног модела.

УП су утврђене узимајући у обзир описане улазне променљиве, факторе који утичу на квалитет решења, опште претпоставке за апроксимацију проблема пројектовања процедура, као и додатне претпоставке, које ће бити посебно појашњене у оквиру овог поглавља.

Основна идеја приликом дефинисања УП била је да се рад модела, тј. алгоритма за решавање постављеног проблема, базира на што мањем броју улазних података, односно да се аутоматизује прорачун свих променљивих за које није потребна додатна интеракција са корисником модела (пројектантом или другим доносиоцем одлуке), водећи рачуна о његовој основној намени.

У складу са постављеним принципима, идентификован је скуп од укупно 17 неопходних, међусобно зависних и дискретних УП, из групе улазних и излазних променљивих, које се користе приликом пројектовања LPV процедура:

- Улазне променљиве:

- **THRd** - удаљеност измењеног прага од THR,
- **APPta** - угао бочног прилаза,
- **CPd** - удаљеност тачке укрштања бочног прилаза од THR,
- **GPA** - угао понирања,
- **CG** - градијент пењања,
- **FAPd** - удаљеност FAP од THR,
- **IFta** - угао заокрета на IF,
- **IFias** - брзина заокрета на IF,
- **IFd** - удаљеност IF од FAP,
- **SDFd** - удаљеност SDF од FAP,
- **IAFd** - удаљеност IAF од IF,
- **OCHadj** - корекција OCH,
- **MATFd** - удаљеност MATF од THR,
- **MATFta** - угао заокрета на MATF,
- **MATFias** - брзина заокрета на MATF,
- **MATFba** - угао нагиба крила ваздухоплова у заокрету на MATF;

- Изразне променљиве:

- **OCH** - прорачуната вредност OCH,

при чему, по конвенцији усвојеној у циљу олакшавања приказа променљивих, индексне ознаке имају следеће значење:

- ta - угао заокрета (turn angle),
- d - удаљеност (distance),
- ias - брзина, тј. индицирана брзина ваздухоплова (indicated air speed), и
- ba - угао нагиба крила ваздухоплова (bank angle).

За потребе дефинисања коначног облика функције циља, претпостављено је да се вредности УП дефинисане на основу улазних променљивих **бирају** од стране алгорита, док се остале УП **прорачунавају** на основу поступка анализе надвишавања препрека. Домени УП описани су у наредној табели (Табела 10).

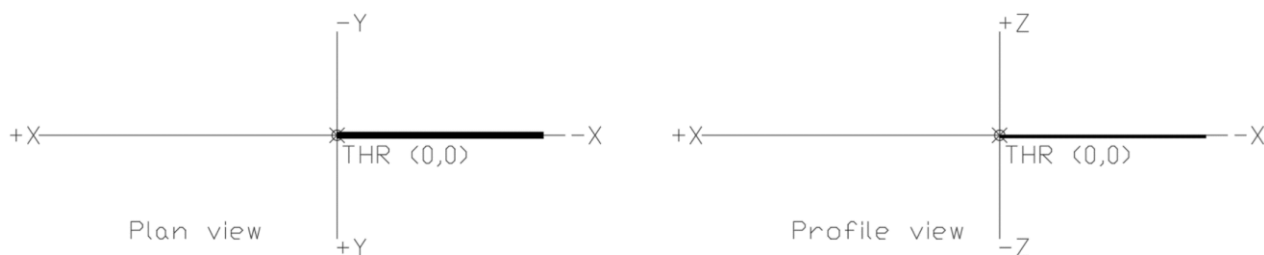
У колонама 1, 2 и 3, приказани су редом називи, ознаке и јединице мере УП. У колонама од 4 до 6, дате су минималне, максималне и оптималне (препоручене) вредности УП, респективно. Ове вредности су дефинисане у складу са PANS-OPS критеријумима и утврђеним границама проблема у оквиру поглавља 5. Колона 7 обухвата вредности УП које имају максимално, тј. највеће одступање од оптималне вредности посматране УП. Како су ове вредности са аспекта оптимизације најнеповољније, називају се још и критичне вредности.

Додатно, у колони 8 дати су инкременти за промену/избор вредности УП, који заједно са минималним и максималним вредностима дефинишу **домен УП** (комплетне вредности домена појединачних УП су приказани у табели у Прилогу 5). Инкременти су по истом принципу дефинисани у складу са PANS-OPS критеријумима, осим ако у наставку текста није другачије назначено. У последњој колони (9) дат је укупан број стања која дата УП може узети у складу са дефинисаним границама домена и примењеним инкрементом. Ова вредност је искоришћена за прелиминарну процену сложености проблема.

Табела 10 Домени управљачких променљивих

УП	Ознака	Јед. мере	Мин. вред.	Макс. вред.	x^*	x^{\max}	Инкремент	Бр. стања
1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	THRd	m	0	1500	0	1500	300	6
x_2	APPta	°	0	(±) 5	0	(±) 5	1	11
x_3	CPd	NM	0.4 f(OCH)	2.3 f(OCH)	2.3	0.4	0.1	20
x_4	GPA	°	3.0	3.5	3.0	3.5	0.1	6
x_5	CG	%	2.5	5.0	2.5	5.0	0.1	26
x_6	FAPd	NM	3.0	10.0	5.0	3.0	0.1	71
x_7	IFta	°	0	(±) 90	0	(±) 90	5	37
x_8	IFias	kt	185	250	250	185	5	14
x_9	IFd	NM	2.8 f(MSD, ATT)	10.0	5.0	2.8	0.1	73
x_{10}	SDFd	NM	1.1 f(ATT)	9.2 f(IFd, MSD, ATT)	0 f(IFd, MSD)	9.2	0.1	83
x_{11}	IAFd	NM	0.8 f(MSD, ATT)	10.0	5.0	0.8	0.1	93
x_{12}	OCHadj	ft	0	800	0	800	50	17
x_{13}	MATFd	NM	(-) 10.0	2.0 f(OCH)	(-) 10.0	2.0	0.1	121
x_{14}	MATFta	°	0	(±) 180	0	(±) 180	5	73
x_{15}	MATFias	kt	185	250	250	185	5	6
x_{16}	MATFba	°	15	30	15	30	5	4
x_{17}	OCH	ft	200	1000	200	1000	1	n/a

Предзнак \pm додељен је вредностима УП у складу са конвенцијом усвојеном у оквиру PANS-OPS критеријумима за пројектовање OAS равни. У том смислу, усвојен је идентичан координатни систем (Слика 39, извор: [81]), са координатним почетком у стварном прагу слетања (THR), где вредности на x-оси, испред THR имају предзнак +, а вредности иза THR предзнак –. Исти приступ је примењен и за вредности у односу на y-осу, са разликом да се за вредности на левој страни додељује предзнак – (нпр. да се означи заокрет са леве стране у односу на осу ПСС), а са десне стране предзнак + (нпр. заокрет са десне стране). За све прорачуне користи се позитивна вредност утврђена у односу на y-осу. Вредности изражене на z-оси имају предзнак + изнад THR.



Слика 39 Усвојени координатни систем

Додатан опис начина дефинисања домена појединих УП, примењеног за потребе овог рада, а који превазилази детаље из претходних поглавља, дат је у наставку текста.

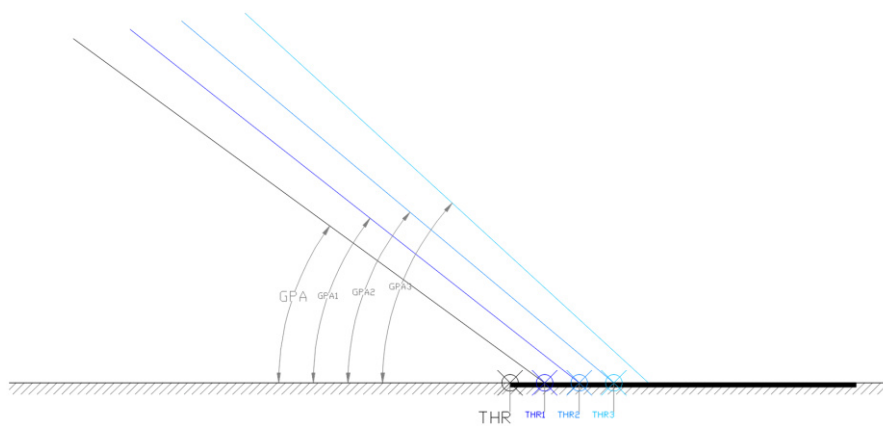
7.2.1. Дефиниција УП

7.2.1.1. Измештен праг

Могућност измештања прага слетања је опција која се у реалним примерима често среће као последица превисоких препрека у сегменту прилаза. Неки од користи оваквог приступа, као и могућност комбиновања са другим елементима конструкције описани су у [82]. Иако се померањем прага ка другом крају ПСС скраћује расположива дужина ПСС за слетање, оно је некад неопходно да би се имплементација процедура и безбедно обављање операција уопште омогућили на једном аеродрому.

У овом раду могућност измештања прага је моделирана променљивом **THR_d**, која омогућава проверу пројектовања LPV процедура у инкрементима по 300 m, колико износи растојање од прага слетања до тзв. зоне додира (touchdown zone - TDZ), у којој ваздухоплов стварно први пут додирне површину ПСС (Слика 40, извор: [81]). Вредност овог инкремента изабрана је тако да се променом УП може остварити значајнији ефекат са аспекта надвишавања препрека, али може бити коригована у складу са потребама на специфичној локацији аеродрома.

Крајња граница домена ове УП у општем случају (Табела 10) ограничена је на 1500 m, што може одговарати стандардној дужини ПСС од 3000 m. Приликом примене модела, ово је параметар који се на експертски начин мора утврдити у односу на стварну инфраструктуру и структуру саобраћаја, пре његовог извршавања.

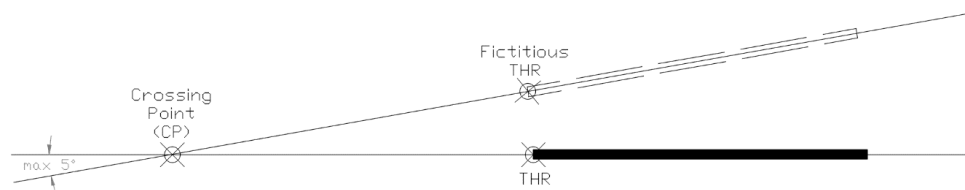


Слика 40. Измештање прага слетања

Иако измештање прага прати одговарајућа процедура обележавања на маневарским површинама аеродрома [83], он ипак представља одступање од стандардног плана и изгледа ПСС, које заједно са смањеним дужинама за слетање повећава оперативну сложеност приликом обављања операција слетања.

7.2.1.2. Бочни прилаз

Могућност пројектовања бочног прилаза, моделирана је путем две променљиве у овом раду: углом под којим путања бочног прилаза сече продужену осу ПСС - **APP_{ta}**, и растојањем тачке пресека (CP) од THR - **CP_d** (Слика 40, извор: [55]).



Слика 41. Структура бочног прилаза

И док је домен APP_{ta} у потпуности индикативан, границе вредности CP_d нису експлицитно објашњене у овире критеријума за пројектовање.

CPd представља УП која је изражена као растојање, у хоризонталној равни, од THR до CP, која има ефекта на избор решења само у случају када је променљива APPta <> 0°.

Општи домен CPd зависи од прописане минималне релативне висине CP (у односу на THR) од 55 m (180 ft), вредности RDH и GPA, као и максималне дозвољене вредности OCH.

Минимална вредност домена CPd се добија на следећи начин:

$$\min CPd = (55 - RDH) / \text{tg}(GPA) = 40 / \text{tg}(GPA),$$

за RDH = 15 m (50 ft). Приликом прорачуна домена није примењен ефекат закривљености Земљине површине, пошто су у питању релативно мала растојања у односу на THR.

Према датој једначини:

- за $\min GPA = 3.0^\circ$, $\min CPd \approx 763.245 \text{ m} = 0.412119 \text{ NM}$;
- за $\max GPA = 3.5^\circ$, $\min CPd \approx 653.994 \text{ m} = 0.353129 \text{ NM}$.

У сврху поједностављења, као доња граница домена GPd усвојена је заокружена минимална вредност од 0.4 NM.

Максимална вредност домена CPd се добија према следећој једначини:

$$\max CPd = (\max OCH - 20 - RDH) / \text{tg}(GPA) = 269.8 / \text{tg}(GPA),$$

за $\max OCH = 304.8 \text{ m}$ (1000 ft), RDH = 15 m (50 ft) и вредност од 20 m (66 ft), која се додаје на релативну висину тачке укрштања за утврђивање вредности OCH.

Вредност $\max OCH$ од 1 000 ft није прописана, него је усвојена у складу са документом [84]. За потребе овог рада, искоришћене су вредности из табеле која прописује најмање вредности оперативних минимума за прилаз и слетање у правцу. Практично, за све вредности изнад 1 000 ft, употреба било ког система светлосног обележавања нема значајније оперативне користи, и операције се могу обавити искључиво у визуелним метеоролошким условима летења (visual meteorological conditions - VMC), који подразумевају видљивост дуж ПСС (runway visual range - RVR) од најмање 5 000 m.

Према датој једначини:

- за $\min GPA = 3.0^\circ$, $\max CPd \approx 5148.091 \text{ m} = 2.779747 \text{ NM}$;
- за $\max GPA = 3.5^\circ$, $\max CPd \approx 4411.191 \text{ m} = 2.381853 \text{ NM}$.

Као горња граница домена GPd усвојена је заокружена максимална вредност од 2.3 NM, што износи 4444.8 m.

На основу усвојених претпоставки, домен CPd обухвата вредности [0.4, 2.3], са инкрементом од 0.1 NM.

Са аспекта дефинисања OCH тачка укрштања би требала да буде што ближа THR, јер је тада и вредност релативне висине укрштања бочног прилаза и осе ПСС мања, а самим тим и вредност OCH. Вредност OCH без додатног увећања се може постићи само у случају прилаза из правца.

Међутим, са аспекта оптерећења летачке посаде, једноставнији маневар подразумева извођење закрета на већој удаљености и висини у односу на THR. Из тог разлога, усвојена је коначна оптимална вредност УП у износу од 2.3 NM.

7.2.1.3. Дужине сегмената

Домени УП, које се односе на одређивање дужина сегмената процедуре, одређени су у зависност од MSD, АТТ и вредности OCH.

INTER

Минимална вредност домена IFd се добија према следећој једначини:

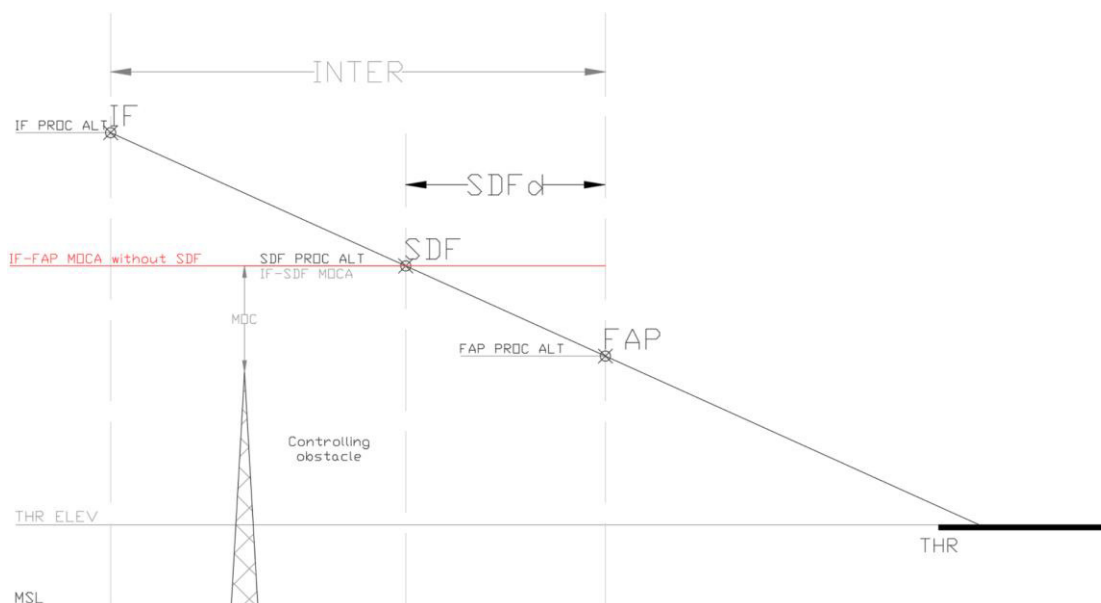
$$\min IFd = 3700 \text{ m (2.0 NM)} + \max(\text{MSD}, \text{ATT}).$$

У случају када заокрет није дефинисан минимална вредност је једнака $3700 \text{ m (2.0 NM)} + \text{ATT}_{\text{IF}}$, што је једнако 5182 m (2.79 NM) , за $\text{ATT}_{\text{IF}} = 1482 \text{ m (0.8 NM)}$ (Табела 7).

На основу прорачуна, домен IFd обухвата вредности $[2.8, 10]$ са инкрементом од 0.1 NM .

SDF

SDFd представља дужину, у хоризонталној равни, између FAP и IF. Увођењем SDF фикса је некада неопходно како би се обезбедило континуално снижавање висине на INTER сегменту (Слика 42). Домен SDFd има променљиве границе, које зависе од дужине праволинијског дела INTER сегмента (у хоризонталној равни).



Слика 42. Приказ SDFd УП

Минимална вредност домена SDFd износи 0, што означава случај када ова УП није примењена. Међутим прва следећа минимална вредност у домену добија се према следећој једначини:

$$\min SDFd = \text{ATT}_{\text{IF}} + \text{ATT}_{\text{FAP}} = 1926 \text{ m (1.04 NM)},$$

за $\text{ATT}_{\text{SDF}} = \text{ATT}_{\text{IF}} = 1482 \text{ m (0.8 NM)}$ и $\text{ATT}_{\text{FAP}} = 444 \text{ m (0.24 NM)}$ (Табела 7).

Као доња граница домена SDFd усвојена је заокружена вредност од 1.1 NM . Овакав корак је спроведен у циљу поједностављења и стандардизације избора УП. Такође, усвојена вредност је на адекватној удаљености од следећег WP - FAP, која обезбеђује довољно времена летачкој посади да изврши евентуалне корекције параметара за слетање, јер обухвата простор толеранција оба фикса.

Максимална вредност домена SDFd износи:

$$\max SDFd = IFd - \max(\text{MSD}, \text{ATT}).$$

То значи да се горња граница домена дефинише као функција од IFd, и IF_a и IF_{ias}, у случају заокрета, односно ATT (на IF), у случају када заокрет није дефинисан. У случају када заокрет није дефинисан минимална вредност SDFd, за $\text{ATT}_{\text{IF}} = 0.8 \text{ NM}$ (Табела 7) и максималну дужину IFd = 10 NM , износи 9.2 NM .

На основу усвојених претпоставки, домен SDFd обухвата вредности $[0, 9.2]$, са инкрементом од 0.1 NM , с тим што је прва вредност доступна после минималне 1.1 NM .

Оптимална вредност са аспекта комплексности се у реалним условима постиже без употребе SDF фикса, јер у супротном летачка посада, у циљу отпочињања маневра снижавања, има додатну активност мониторинга висине прелета изнад датог SDF. У зависности од логике рада FMS, подаци о SDF углавном се не кодирају у навигационе базе података, што значи да пилот нема њихову индикацију на инструмент табли, већ се њихова локација мора пратити са другог извора, односно са ваздухопловне карте.

За потребе развоја модела, може се усвојити оптимална вредност SDFd у случају када ова УП има вредност већу од 0, у износу:

$$(IFd - MSD)/2,$$

што значи да је оптимална позиција SDF на половини праволинијског дела INTER сегмента, или на половини сегмента када заокрет није дефинисан.

INITIAL

Минимална вредност домена IAFd се добија према следећој једначини:

$$\min IAFd = \max(MSD, ATT),$$

и зависи од параметара заокрета или толеранције фикса, када нема заокрета на IAF. У случају када заокрет није дефинисан минимална вредност је једнака $ATT_{IAF} = 0.8 \text{ NM}$ (Табела 7).

На основу једначине, домен IAFd обухвата вредности [0.8, 10] са инкрементом од 0.1 NM.

MAS

MATFd представља дужину, у хоризонталној равни, између THR и MATF. Ова УП дефинише локацију тачке заокрета у MAS сегменту. Домен TFd има променљиве границе, које зависе од локације SOC, односно вредности OCH, и максималне дужине MAS сегмента.

Минимална вредност домена MATFd се добија према следећој једначини:

$$\min TFd = X_{SOC} - ATT_{MATF} = 3537 \text{ m (1.91 NM)} \text{ иза THR,}$$

за $\max OCH = 1000 \text{ ft}$, $HL = 49 \text{ m}$ и $GPA = 3^\circ$, и $ATT_{MATF} = 444 \text{ m (0.24 NM)}$ (Табела 7).

Максимална вредност домена MATFd износи:

$$\max TFd = -18520 \text{ m (10 NM)} \text{ од THR.}$$

Домен MATFd обухвата вредности [+1.9, -10], са инкрементом од 0.1 NM. Предзнак + означава да се локација MATF налази испред THR, а предзнак – означава да се локација MATF налази иза THR.

Оптималну вредност са аспекта комплексности обављања операција је веома тешко одредити. Међутим, ако се оптимална позиција MATF посматра у функцији времена које је на располагању летачким посадама да реагују у сврху отпочињања маневра заокрета, може се усвојити претпоставка да су вредности на већој удаљености, иза THR, повољније, а да је оптимална локација она која има максимално дозвољену удаљеност.

7.2.1.4. Корекција OCH

OCHadj представља висину, којом се додатно повећава прорачуната вредност OCH.

На овај начин се обезбеђује померање локације SOC даље од THR, и тако омогућава раније дефинисање MATF, у циљу евентуалног смањења вредности CG.

Домен OCHadj обухвата вредности [0, 800] ft, са инкрементом од 50 ft, и установљен је за максималну усвојену вредност OCH ($\max OCH$), како је описано у оквиру 7.2.1.2.

Оптимална вредност са аспекта комплексности износи 0 - када није потребно додатно увећање прорачунате вредности OCH. Свака друга изабрана вредност директно утиче на повећање OCH.

7.2.1.5. Угао нагиба у заокрету на МАТФ

ТFба представља угао, у вертикалној равни, између крила ваздухоплова и хоризонта, и изражава се у лучним (угловним) степенима ($^{\circ}$). ТFба директно утиче на полупречник путање заокрета, тако да се повећањем његове вредности постиже смањење полупречника заокрета, чиме се утиче и на смањење димензија заштитног простора у заокрету.

Домен МАТFба обухвата вредности [15, 30], са инкрементом од 5° . Оптимална вредност са аспекта комплексности износи 15° - стандардна вредност угла нагиба крила ваздухоплова у MAS сегменту.

Повећање МАТFба може довести до додатног радног оптерећења летачких посада, поготово у случају када се функционалност аутопилота не користи, односно када се примењује ручна метода летења, тј. извођења заокрета. Функционалност аутопилота требало би да омогући аутоматско извођење заокрета за ВА до вредности од 30° , код већине модерних ваздухоплова.

7.2.2. Вектор решења

Када су дефинисане све УП, могуће је представити и вектор решења у следећем облику (обухвата укупно 17 променљивих):

$$x = [\text{THRd}, \text{APPta}, \text{CPd}, \text{GPA}, \text{CG}, \text{FAPd}, \text{IFta}, \text{IFias}, \text{IFd}, \text{SDFd}, \text{IAFd}, \text{OCHadj}, \text{MATFd}, \text{MATFta}, \text{MATFias}, \text{MATFba}, \text{OCA}].$$

УП у оквиру представљеног вектора решења се могу поделити у две групе променљивих - обавезне и условне променљиве.

Обавезне променљиве (подељане у оквиру вектора решења) су УП чије вредности представљају теоријски минимум за проналажење допустивог решења у складу са критеријумима за пројектовање процедура. Обавезне променљиве представљају изабране или прорачунате (само ОСН) променљиве.

Условне (кондиционалне) променљиве су УП чије вредности су неопходне за дефинисање решења само у случају када је испуњен одговарајући предуслов, а то је постојање бочног прилаза или заокрета на IF или МАТF (Табела 11). Ове УП су неопходне за потпуно дефинисање елемената заокрета, и обухватају: CPd, IFias и МАТFias.

Табела 11. Условне УП

УП	Предуслов
CPd	APPta \neq 0
IFias	IFta $>$ 0
MATFias	MATFta $>$ 0

CPd је условна променљива, која има тежину када је обавезној променљивој APPta додељена вредност различита од 0. У том случају неопходно је одредити и место где се налази тачка пресека бочне путање и продужене осе ПСС.

IFias и MATFias су условне променљиве које имају тежину само када је на IF и/или МАТF дефинисана номинална путања са заокретом ($\Gamma_A > 0$). Када је путања праволинијска, тј. угао заокрета = 0, променљиве IFias и МАТFias немају утицај на пројектовање процедуре, јер је (полу)ширина заштитног простора симетрична и унапред одређена.

Регулација условних УП се спроводи путем функције тежинских коефицијената у оквиру математичког модела, која обухвата описане предуслове и биће објашњена у оквиру поглаваља 7.4. То значи да ће укупан допринос функцији циља бити једнак 0 када предуслов није испуњен, без обзира на вредност додељену условној УП. У циљу једноставнијег приказа вектора решења, условним УП за које није испуњен предуслов биће додељене оптималне вредности у табелама.

7.3. Функција циља

Општа функција циља би у случају проблема вишекритеријумске оптимизације била формулисана и описана на следећи начин [52]:

$$\min_{x \in R^d} f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)] \quad (39)$$

где је у сврху поједностављења $[f_i]$ записано у облику $f(x)$.

Након примене принципа за дефинисање CS из формуле (2), почетни облик функције циља за проблем пројектовања LPV процедура може се представити на следећи начин:

$$\min_{x \in R^d} f(x) = \min_{u_v, q_l} \left(\sum_{v=1}^V w_v \cdot \left| \frac{u_v - u_v^*}{u_v^{max} - u_v^*} \right| + w_{OCH} \cdot \left| \frac{OCH - OCH^*}{OCH^{max} - OCH^*} \right| \right) \quad (40)$$

односно у зависности од улазних и излазних променљивих дефинисаних у оквиру процеса пројектовања LPV процедуре.

Развој коначног облика функције циља вођен је идејом о декомпозицији вишекритеријумског проблема, на једноставне појединачне кораке, који би одговарали принципу постепене конструкције решења. На овај начин проблем би био сведен на избор одговарајућих вредности УП, које би свака за себе представљале посебан критеријум, односно критеријумску функцију.

У ову сврху искоришћени су елементи из рада [85], који се односе на функцију за поређење квалитета решења у процесу њихове претраге. Прилагођен облик те формулације за потребе овог рада гласи:

$$L_p = \left[\sum_{i=1}^M w_i^p \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_i^{max} - x_i^*} \right|^p \right]^{\frac{1}{p}}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad 1 \leq p < \infty \quad (41)$$

где је:

L_p – општи облик метрике, прилагођене за потребе дефинисања функције циља

x_i – вредност i -те УП, прорачунате на основу вектора решења x ;

x_i^* – оптимална вредност i -те УП;

x_i^{max} – највећа или најнеповољнија вредност коју може узети i -та УП;

M – укупан број УП;

w_i – тежински коефицијент i -те УП;

p – вредност која указује на тип растојања:

a. за $p = 1$ сва одступања од оптималних решења су директно пропорционална њиховој величини, док

b. за $2 \leq p < \infty$ веће одступање подразумева и већу тежину у L_p метрици.

Ова формулација је првобитно дефинисана у оквиру [86], као мера растојања од идеалног решења, и базирана је на принципима компромисног програмирања (compromis programming), односно методе растојања (distance method), што је термин који се чешће може наћи у употреби у домаћој литератури. Основни циљ је извршити минимизацију добијених вредности, тако да одступање допустивог решења буде што ближе идеалној вредности.

На овај начин омогућено је свођење проблема вишекритеријумске оптимизације на проблем једнокритеријумске оптимизације, који се на релативно једноставан начин може решити применом неких од расположивих стохастичких метода.

Функција циља дефинисана на овакав начин се може користити како за међусобно поређење решења, тако и у оквиру израза за процену квалитета (evaluation/performance function) у поступку конструкције решења.

7.3.1. Компромисно програмирање

Компромисно програмирање представља методу вишекритеријумске оптимизације, која помаже приликом спровођења анализа проблема и при доношењу одлука у случајевима када се примењују разнородни, сукобљени критеријуми.

Тада је потребно пронаћи друго допустиво решење, тзв. компромисно решење, које је најближе идеалној тачки у дефинисаном критеријумском простору. Метода компромисног програмирања омогућава мерење одступања добијеног решења од вредности идеалног, тј. оптималног решења. Наравно, под претпоставком да је идеално решење унапред познато.

У постављеном проблему пројектовања LPV процедура знамо да је функција циља оптималног решења једнака 0, као и све критеријумске функције. Уз додатну могућност мерења одступања решења у односу на идеалну тачку, елиминисана је већина недостатака које поседују алгоритми за претрагу решења стохастичким приступом. Из овог разлога ови методи се квалификују као главни кандидати за решавање проблема (видети поглавље 8.1.1).

Растојање између две тачке, односно два решења се може дефинисати на различите начине у зависности од типа проблема који се разматра. Метрика у суштини представља начин мерења растојања између две тачке у p -димензионом простору. Овај простор се још назива и Лебегов простор (Lebesgue spaces), по француском математичару Анрију Лебегу (Henri Lebesgue) [87], одакле и потиче ознака – L_p .

Метрика која је представљала полазну основу за добијање израза (41) се назива метрика или растојање Минковског (Minkowski metric/distance) и има следећи општи облик, из којег се могу развити друге врсте метрика као њени специјални случајеви:

$$L_p = d(x, y) = \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad 1 \leq p < \infty, \quad (42)$$

где d представља растојање (које се минимизира) између два вектора или тачака x и y ($x, y \in \mathbb{R}^n$), са стандардним координатама x_i и y_i , респективно.

За $p = 1$ добија се Менхетн (правоугаона) метрика или растојање (Manhattan distance):

$$L_1 = d(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (43)$$

За $p = 2$ добија се Еуклидова метрика или растојање (Euclidean distance):

$$L_2 = d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (44)$$

За $p = \infty$ добија се Чебишевљева метрика или растојање (Chebychev distance):

$$L_\infty = d(x, y) = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (45)$$

Наведене метрике представљају само део великог скупа мера растојања, које се најчешће користе, и њихова теоријска анализа превазилази оквире овог рада.

Применом одговарајуће метрике могу се, у општем случају, добити ранг-листе које садрже више сортираних решења, а постоји и могућност њихове истовремене примене (за различите вредности p), која доносиоцима одлуке даје веће могућности за рангирање решења по основу различитих мера растојања, при чему важи [88]:

- за мале вредности p (посебно за $p = 1$) формирају се ранг-листе где предност добијају решења којима се постиже већа укупна корист, уз могућност да неке од вредности критеријумских функција буду и изразито лоше;
- за веће вредности p (посебно за $p = \infty$) формирају се ранг-листе где предност добијају решења код којих вредности критеријумских функција имају мања максимална одступања од идеалних решења, док је укупна корист од мањег значаја.

Због наведеног начина употребе, L_p метрика може представљати параметар уравнотежења између укупне користи и појединачног одступања критеријумских функција [88].

7.3.2. Трансформација основне метрике

Због различитих својстава УП, за потребе трансформације функције циља у коначни облик (41) из основног облика метрике Минковског (42), искоришћене су познате технике релаксирања проблема вишекритеријумске оптимизације:

- 1) Нормализација израза (видети поглавље 5.3):

У формулу је додат израз $x_i^{max} - x_i^*$ у циљу трансформације излазних вредности функције циља у бездимензионе вредности, како би био решен проблем њихових различитих јединица мера и величина домена.

Применом поступка нормализације постиже се једнообразност критеријумских функција, које се могу користити за дефинисање растојања од идеалне тачке [89].

- 2) Додела тежинских коефицијената:

Сваком критеријуму додељен је одговарајући тежински коефицијент (w_i).

Метода тежинских коефицијената представља најстарију и најчешће коришћену методу за решавање проблема вишекритеријумске оптимизације. На овај начин се доносилац одлуке, односно експерт, пре решавања задатка вишекритеријумске оптимизације, одређује према приоритетима међу критеријумима. Из тог разлога овај поступак се зове и тзв. априорна метода [90].

Иако је овај приступ релативно једноставан за примену, критичан корак представља одређивање вредности тежинских коефицијената. У циљу правилног одређивања приоритета и односа међу критеријумима експерименталним путем је извршено подешавање вредности тежинских коефицијената (видети наредно поглавље).

7.4. Параметри

Тежински коефицијенти (Табела 12), као основни параметри математичког модела, представљају процењени утицај сваке УП, односно критеријума у оквиру функције циља, на квалитет решења. Збирни утицај даје оцену комплексности пројектоване LPV процедуре.

Вредност утицаја УП одређена је у односу на квалитативни опис, утврђен на основу експертског искуства, описа УП (видети 7.2.1) и резултата пронађених у литератури (видети 5.3). Свакој УП додељен је ниво утицаја на комплексност процедуре, који је потом конвертован у квантитативну вредност:

- оцени *веома мали* ниво утицаја одговара бројна вредност 1,
- оцени *мали* ниво утицаја одговара бројна вредност 3,
- оцени *умерен* ниво утицаја одговара бројна вредност 6,
- оцени *велики* ниво утицаја одговара бројна вредност 9, и
- оцени *веома велики* ниво утицаја одговара бројна вредност 15.

Квантитативне вредности, које представљају коначне бројне вредности тежинских коефицијената, добијене су експерименталним путем у току развоја и примене модела, и калибрисане су тако да резултујућа оцена функције циља буде у опсегу од 0 до 100 (видети поглавље 7.6).

Табела 12 Тежински коефицијенти

УП	Ознака	Максимални ниво утицаја	Предуслов	w_i
x_1	THRd	мали	/	3
x_2	APPta	велики	/	9
x_3	CPd	умерен	APPta \neq 0	6
			APPta = 0	0
x_4	GPA	умерен	/	6
x_5	CG	мали	/	3
x_6	FAPd	умерен	/	6
x_7	IFta	умерен	/	6
x_8	IFias	умерен	IFta \neq 0	6
			IFta = 0	0
x_9	IFd	велики	/	9
x_{10}	SDFd	мали	/	3
x_{11}	IAFd	умерен	DG _{INITIAL} > GPA	6
			DG _{INITIAL} = GPA	3
x_{12}	OCHadj	велики	/	9
x_{13}	MATFd	умерен	MATFta \neq 0 \wedge MATFd \geq -3	6
			MATFta \neq 0 \wedge MATFd < -3	1
			MATFta = 0	0
x_{14}	MATFta	мали	/	3
x_{15}	MATFias	умерен	MATFta \neq 0	6
			MATFta = 0	0
x_{16}	MATFba	велики	MATFta \neq 0 \wedge MATFias < 250	9
			MATFta \neq 0 \wedge MATFias = 250	6
			MATFta = 0	0
x_{17}	OCH	веома велики	/	15

Због специфичности проблема који се разматра, доступна истраживања на тему извора комплексности код IAP, са аспекта летачких посада, нису омогућила директну и једноставну примену објављених резултата.

Главни разлог је свеобухватан приступ истраживању, који је подразумевао разматрање више типова процедура летења, као и додатне утицаје који проистичу из објављених ваздухопловних карти или примене RNAV навигације, као и фактора који се тичу оперативног искуства из кабине летачке посаде, који нису у директној вези са комплексношћу индукованом структуром саме процедуре. Због тога, податке из горње табеле треба посматрати као основне или опште утврђене вредности, које могу бити даље прилагођене посебности случаја сваке примене модела.

На основу вредности тежинских коефицијената, утврђених за потребе овог рада, може се уочити да **највећи утицај** (15) на квалитет решења, односно комплексност процедуре, има вредност ОСН, као директан и најважнији резултат процеса пројектовања процедура. Овај критеријум у највећем обиму утиче на вредност оперативног минимума, који даље одређује коефицијент употребљивости аеродрома у току године, и има за циљ да обухвати и утицај динамичке комплексности процедуре, која није посебно разматрана у иницијалној фази развоја модела.

Велики ниво утицаја (9) на комплексност процедуре, препознат је код критеријума који се односе на примену бочног прилаза (APPta), смањене дужине INTER сегмента (IFd), као и у случају додатне пенализације вредности ОСН (OSNadj), или приликом постојања комбинованог утицаја ограничења брзине (MATFias) и повећаног угла нагиба (MATFba) у заокрету у MAS сегменту.

Оваква категоризација критеријума је у највећој мери последица чињенице да су већи број заокрета и мање дужине сегмената код IAP у досадашњим радовима идентификовани као једни од кључних разлога повећане комплексности. Додатна ограничења брзине такође доприносе увећању тог негативног утицаја, а комбиновани ефекат са повећаном вредношћу ВА у заокрету у MAS би требало избегавати због повећања броја параметара који се морају пратити и додатног усложњавања извођења маневра.

Група критеријума са **умереним нивоом утицаја** (6) обухвата највећи број УП (CPd, GPA, FAPd, IFta, IAFd, MATFd и MATFias). Осим УП које су већ разматране у претходним поглављима, неке чланове овог скупа је потребно додатно објаснити.

Што се тиче GPA, веће вредности подразумевају већу вертикалну брзину приликом слетања, што повећава оптерећење летачке посаде и скраћује време реакције пилота који управља ваздухопловом.

IAFd има посебне предуслове, који у зависности од прорачунате вредности DG на INITIAL сегменту, прописују примену веће или мање вредности тежинског коефицијента. Примена већег угла понирања у односу на FAS сегмент нарушава CD(F)A концепт и може довести до отежаног праћења и пресретања симулиране (псеудо) линије GP у оквиру примењеног мода вођења ваздухоплова.

Посебан случај представља MATFd, за коју је процењено да заокрети на растојању од 3 NM и више (након THR), имају значајно мањи утицај на комплексност него они у близини тачке достизања ОСН, односно пре као и непосредно након THR. Каснијим заокретом се летачкој посади оставља додатно време да реагује у стресној ситуацији након одустајања од слетања. Зато је вредностима MATFd које прописују заокрет на већој удаљености додељен најмањи тежински коефицијент (1) и **веома мали ниво утицаја** на комплексност.

Преостале УП (THRd, CG, SDFd, MATFta) су класификоване у групу са **малим нивоом утицаја** (3).

Измештен праг (THRd) може имати већи утицај на инфраструктурне промене на аеродрому, док са аспекта летачке посаде након упознавања са измењеним оперативним окружењем на ПСС, утицај на комплексност би требао да опада са временом употребе.

Иако у појединим случајевима веће вредности CG могу утицати на повећану комплексност у MAS сегменту, примена у домену вредности дефинисаном за потребе овог истраживања, није критична са аспекта перформанси модерних ваздухоплова. Примена CG вредности преко 5% може имати значајнији утицај на оптерећење посада и у том случају би требало размотрити усвајање рестриктивнијих вредности тежинских коефицијената.

Примена SDFd, такође има ограничен утицај на увећање комплексности када су остали предвиђени параметри лета испоштовани (пре свега висине на фиксевима и CDFa техника лета).

Угао заокрета у MAS сегменту (MATFta) је класификован у нижу групу утицаја неко исти критеријум у случају заокрета на IF, јер је у већини случајева заокрет у MAS неопходан и очекиван маневар у циљу омогућавања поновног слетања.

7.5. Ограничења

Општа ограничења функције циља, која произилазе из критеријума за пројектовања IAP процедура, дата су у облику следећих неједначина, за $s \in \{1, 2, \dots, N\}$, где је N укупан број сегмената процедуре:

$$L_s \geq MSD_s, \quad \forall s \in \{1, \dots, N\} \quad (46)$$

$$PROC_ALT_s \geq MOCA_s, \quad \forall s \in \{1, \dots, K\} \quad (47)$$

$$CG_s \geq CG_{max}, \quad \forall s \in \{K+1, \dots, N\} \quad (48)$$

где L_s представља дужину сегмента s , која мора бити већа или једнака MSD вредности утврђеној за дати сегмент (при чему је $N = 4$). $PROC_ALT$ ограничење се примењује прилазне сегмента, где је у општем случају дозвољен заокрет и на FAF ($K = 3$), док се ограничење CG односи на вишеструке сегменте у оквиру MA дела процедуре.

Када се општа ограничења примене на предметни проблем, добијају се следеће неједнакости које ограничавају функцију циља:

$$L_{INITIAL} \geq MSD_{INITIAL}, \quad (49)$$

$$L_{INTER} \geq MSD_{INTER}, \quad (50)$$

$$L_{MAS} \geq MSD_{MAS}, \quad (51)$$

$$PROC_ALT_{IF} \geq MOCA_{INITIAL}, \quad (52)$$

$$PROC_ALT_{FAP} \geq MOCA_{INTER}, \quad (53)$$

$$CG \geq CG_{max}. \quad (54)$$

Додатна ограничења, усвојена у оквиру дефинисања граница проблема, обухватају и:

$$PROC_ALT_{IAF} \geq \min PROC_ALT_{IAF}, \quad (55)$$

$$PROC_ALT_{SDF} \geq MOCA_{SDF}, \quad (56)$$

$$PROC_ALT_{MAEF} \geq \min PROC_ALT_{MAEF}, \quad (57)$$

како би се обезбедило да су генерисана решења у захтеваним висинским границама, затим:

$$OCH \leq 1000 \text{ ft}, \quad (58)$$

$$CP_d > X_{SOC} + ATT_{MATF}, \quad (59)$$

како би се осигурало да вредност OCH остане у примењивим границама и да заокрет у MAS сегменту не сме да буде дефинисан пре места заокрета ка ПСС у бочном прилазу.

Поред ограничења која су уграђена у домене УП, битно је и ограничење којим се обезбеђује примена истоветних критеријума у оквиру MAS сегмента и осигурава једноставнији облик геометрије процедуре:

$$d(THR, MAEF) \leq 15 \text{ NM}, \quad (60)$$

где је d максимално дозвољено растојање (distance) између THR и тачке MAEF.

Додатно ограничење је уведено и у сврху спречавања нарушавања основне геометрије заокрета у оквиру MAS сегмента. Ово нарушавање се може догодити када је тачка MAEF на довољном растојању према прорачунатој MSD вредности, али се налази у оквиру зоне заокрета (са унутрашње стране спољне ивице), тако да није могуће извршити његову конструкцију. Ограничење има следећу формулацију:

$$d(EM1, MAEF) \geq \sqrt{r^2 + E^2}, \quad (61)$$

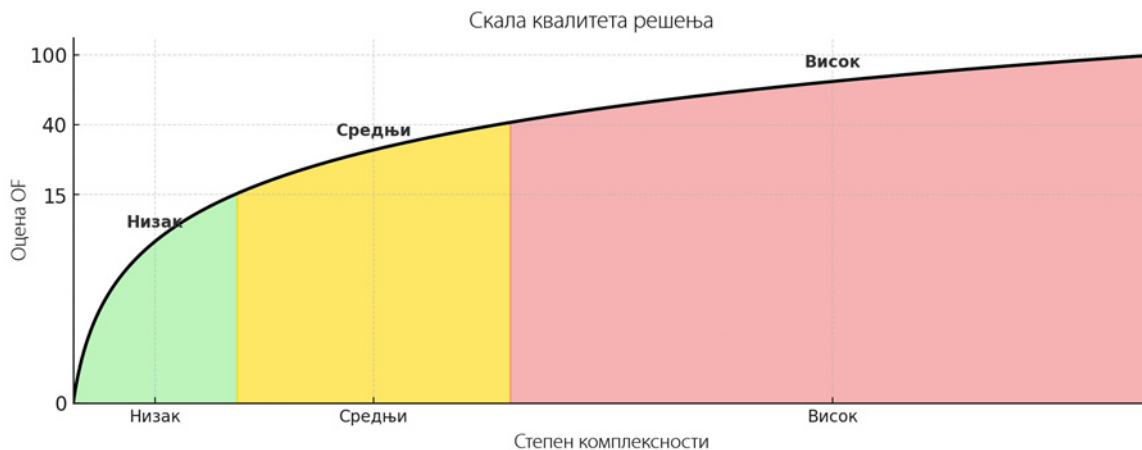
где је d минимално дозвољено растојање између тачке EM1, која представља центар кружнице за дефинисање спољне ивице заокрета (са полупречником $(r^2 + E^2)^{1/2}$) и тачке MAEF.

7.6. Скала квалитета решења

У односу на дефинисани опсег оцена функције циља (0 - 100) утврђене су три категорије квалитета процедура или степена комплексности:

- **низак** (0 - 15)
- **средњи** (16 - 40)
- **висок** (41 - 100)

где вредност 0 означава идеално или оптимално решење, а вредност 100 теоријски најкомплексније допустиво решење. Категорије су утврђене у складу са принципима логаритамске прогресије (Слика 43).



Слика 43. Скала квалитета решења

У основном кораку одређен је први праг квалитета решења, у вредности од 15, као горња граница функције циља код решења са ниским степеном комплексности. Ова вредност је дефинисана на експериментални начин путем анализе осетљивости. У оквиру овог поступка вршена је калибрација вредности тежинских коефицијената у односу на неколико примера IAP, за које су биле познате квалитативне оцене комплексности утврђене емпиријским путем.

Други и трећи праг квалитета решења одређени су тако што је на преостали опсег оцена функције циља (15 - 100) примењена логаритамска скала и добијене су још две категорије комплексности.

8. МЕТОД ЗА РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА

8.1. Избор основног метода

У складу са описаним проблемом и утврђеном наменом, модел треба да испуни два основна задатка, и то следећим редоследом:

1. да пронађе допустива решења и
2. да пронађе најбоље допустиво решење.

Под појмом допустиво решење подразумева се комплетна изводљива LPV процедура.

Услови за дефинисање допустивог решења у потпуности су прописани у оквиру PANS-OPS критеријума, који садрже низ примењивих ограничења и захтева за адекватним надвишавањем препрека. У општем случају, модел треба да обезбеди добијање скупа допустивих решења. Генерисањем довољног броја допустивих решења повећава се могућност добијања оптималног решења.

Услови за избор најбољег решења из скупа допустивих нису у потпуности регулаторно утврђени и документовани. Поступак утврђивања најбољег примењивог решења траје током целе фазе имплементације процедуре, и неретко може захтевати накнадне измене на већ пројектованим процедурама. Једна од сврха овог модела је да путем предложеног поступка оцене квалитета процедуре, сви општи оперативни захтеви буду инкорпорирани у његов механизам добијања решења.

Тежина проналажења допустивих решења, па и избор најбољег, највише зависе од локације аеродрома, односно од утицаја конфигурације околног терена и постојања вештачких препрека, који директно утичу на дефинисање путања и минималних висина за летење.

Код аеродрома лоцираних у равничарским пределима (или у близини великих водених површина), број допустивих решења најчешће ће бити знатно већи него код аеродрома лоцираних у планинским пределима, где су карактеристике терена значајно изражене. У првом случају доминантан задатак модела ће бити избор оптималног решења, за разлику од другог случаја, где ће највећи изазов бити проналажење било каквог допустивог решења.

У циљу постизања одговарајућег нивоа робусности примене модела, потребно је обезбедити балансиран приступ за решавање оба постављена задатка.

Услед великог броја управљачких променљивих и њихових специфичних веза, проблем пројектовања LPV процедура не може се свести или сврстати у познате типове проблема комбинаторне оптимизације. Приликом самог структурирања проблема евидентно је да се димензије проблема не могу у великој мери редуковати, чак ни у случају најједноставније процедуре, са минималним бројем елемената у оквиру решења. Због тога комплексност решавања овог проблема има константно висок ниво.

Из наведеног разлога, примена егзактних метода за решавање постављеног проблема, као што су нпр. алгоритми за потпуну еnumerацију решења или тзв. „*branch & bound*“ алгоритми, не би била оправдана. Са друге стране, за разлику од егзактних метода, методе **засноване на хеуристичким принципима**, које припадају поменутој групи недетерминистичких алгоритама, веома су успешне код проблема великих димензија. Хеуристички алгоритми имају значајну примену како код стандардних теоријских проблема, тако и приликом решавања тешких реалних проблема комбинаторне оптимизације.

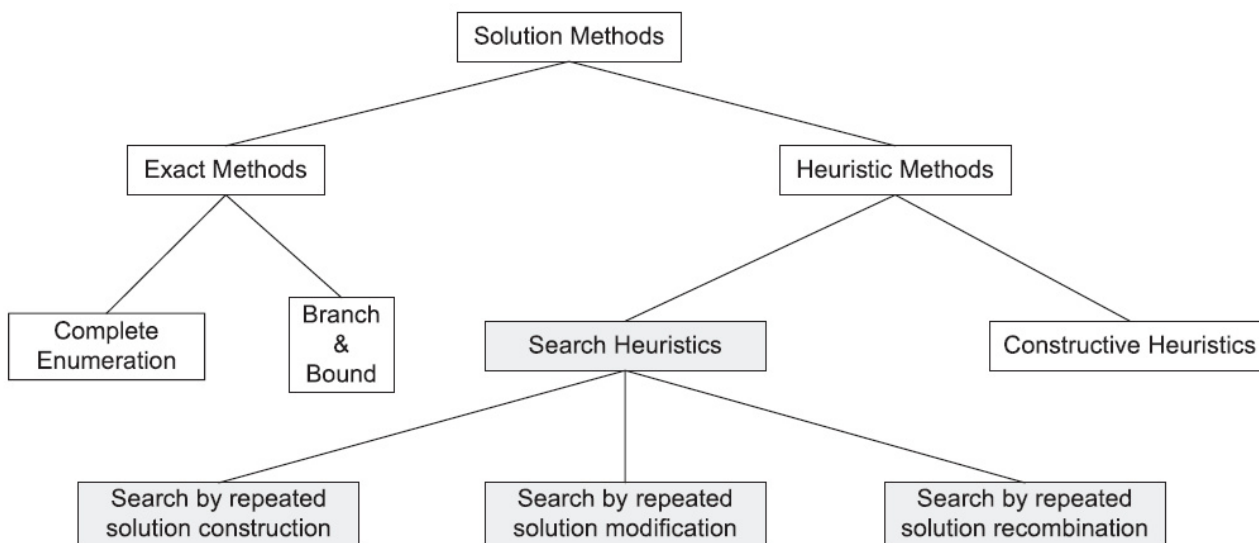
8.1.1. Хеуристички алгоритми

Хеуристичке методе представљају методе које се интензивно развијају од 50-их година 20. века: Називају се још и „меке“ методе (soft computing) за проналажење „задовољавајућих“ (субоптималних) решења проблема, а назив су добиле од грчке речи *heuriskein*, што значи наћи или открити [77].

Основна предност ових метода јесте да се задовољавајуће, близу оптимално, решење може пронаћи у разумном (полиномијалном) времену, на основу правила предефинисаних у односу на постојећа експертска знања и искуства из дате области. Хеуристичке методе омогућавају једноставну примену код слабо структурираних проблема, када је због постојећих неизвесности, нелинеарности и вишекритеријумског карактера проблема, немогуће формулисати прецизан математички модел. Иако ефикасност ових метода, у општем случају, није теоријски доказана, различите врсте хеуристичких метода су примењене на скоро све класичне оптимizacione проблеме.

Са друге стране, основни недостатак хеуристичких метода је што проналажење оптималног решења није загарантовано, а такође, одступање добијеног решења у односу на оптимално није познато. Поред тога, неки од метода могу бити осетљиви на подешавање елемената модела (најчешће параметара), што може значајно утицати на робусност и ефикасност његове примене, и захтевати дуготрајан поступак „профињавања“ експерименталним путем.

У литератури постоје различити примера класификација хеуристичких метода, али за потребе овог рада биће представљена класификације приказана у оквиру [77] (Слика 44). Према овој класификацији постоје две групе хеуристичких метода – **конструктивне хеуристике** (constructive heuristics) и **хеуристике претраге** (search heuristics).



Слика 44. Класификација метода комбинаторне оптимизације

Конструктивне хеуристике су у многоме зависне од специфичности проблема који се решава, и пре свега су усмерене на добијање једног, најквалитетнијег решења, принципом избора елемената решења која највише обећавају. Хеуристике претраге, са друге стране, спроводе претрагу скупа допустивих решења датог проблема, у оквиру чега се испитује велики број различитих решења у циљу добијања најбољег.

Како основна намена модела формираног у овом раду подразумева испитивање граница могућности имплементације процедура, а не само добијање једног коначног решења, закључено је да потребама решавања проблема у оквиру овог рада више одговарају **хеуристике претраге**.

По својим карактеристикама ова група хеуристика је мање зависна од конкретног проблема, односно садржи и део алгоритма који је општег карактера и може се применити на различите врсте проблема. То је један од разлога зашто се ове методе називају опште или метахеуристике.

У оквиру групе метахеуристика, разликују се три подгрупе базиране на итеративном поступку [77]:

- конструкције решења (search heuristics based on repeated solution construction) – ново решење се добија конструкцијом решења од почетка,
- модификације решења (search heuristics based on repeated solution modification) – ново решење се добија модификацијом постојећег решења, и
- рекомбинације решења (search heuristics based on repeated solution recombination) – ново решење се добија рекомбинацијом делова два или више постојећих решења.

За разлику од метахеуристика базираних на поступку конструкције решења, друге две подгрупе захтевају постојање иницијалног (допустивог или недопустивог) решења пре почетка претраге, односно захтевају решење које ће додатно бити побољшано применом одговарајућег алгорита.

На описани проблем пројектовања LPV процедура практично су примењиве све три врсте техника, јер поред постепене конструкције решења, могуће је у иницијалном кораку на случајан начин обезбедити и почетно решење. Међутим, не постоји гаранција да ће такво решење бити и допустиво, али се својство допустивости може градити у итеративном поступку.

У циљу лакше идентификације недопустивог решења у процесу претраге, вредност оцене функције циља оваквог решења се увећава, тј. пенализује за по 1000 бодова за свако прекорачено ограничење. На овај начин недопустива решења неће бити фаворизирана кроз итерације јер ће имати функцију циља са оценом већом бар 10 пута у односу на најгоре допустиво решење, и алгоритам ће их у процесу претраге веома брзо напуштати.

Структура и редослед УП у оквиру дефинисаног математичког модела одређени су на начин да се у процесу претраге, односно оптимизације решења могу применити све три технике. Због сличности процеса пројектовања процедура и технике итеративне конструкције решења, иницијално је разматрана примена овог приступа за решавање проблема. Међутим, код ове технике, за разлику од друге две, у току једне итерације гради се само једно решење. На основу емпиријских резултата и експертске процене за решавање описаног проблема искоришћене су **метахеуристике базиране на итеративном поступку модификације решења**. Њиховом применом осигурано је генерисање значајно већег броја решења, чиме се може обезбедити и бржа конвергенција ка најбољем решењу.

У сврху избора конкретног алгорита у оквиру ове подгрупе метахеуристика, посебан акценат је стављен на алгоритме базиране на тзв. систему вишеструких агената (multi-agent systems - MAS). Ови системи омогућавају истовремено спровођење вишеструких процеса конструкције, односно модификације решења, применом већег броја агената, што је изразито важно за проналажење већег скупа допустивих решења, који се захтева од модела. Иако су процеси претраге међусобно независни, они су вођени „глобалним знањем“, које представља размену информација агената на основу завршених претрага, и чува се у меморији алгорита за потребе усмеравања претрага у оквиру наредних итерација.

Најзаступљеније метахеуристике овог типа су засноване на природним процесима који се спроводе на нивоу групе инсеката (нпр. приликом потраге за храном), због чега су и названи **интелигенцијом роја** (swarm-intelligence – SI). Поред овог назива у литератури се могу пронаћи и термини колективна интелигенција, интелигенција стада или групна интелигенција. Неки од представника ових алгорита су: оптимизација колонијом мрава (ant colony optimization - ACO), оптимизација ројем честица (particle swarm optimization - PSO), оптимизација колонијом пчела (bee colony optimization - BCO), али постоје и други алгоритми засновани на понашању животиња, као што су јата птица, чопор вукова и сл. Током година су представљене разне верзије проширења основног концепта ових алгорита, које су прилагођене решавању најразличитијих типова проблема.

Метахеуристички алгоритми представљају веома захвално средство за решавање проблема комбинаторних оптимизација из домена ваздушног саобраћаја, па и других домена индустрије,

чији процеси подразумевају висок степен експертског знања. Због општости алгоритама и доказане успешности примене на типичним комбинаторним проблемима, лице које се бави решавањем проблема, односно доносилац одлуке, може да се фокусира на правилно моделирање самог проблема, а улазне параметре алгорита може дефинисати и експерименталним путем у току његовог развоја и тестирања.

8.1.1.1. Основне карактеристике метахеуристичких алгоритама

Две основне карактеристике (претраге) метахеуристичких алгоритама представљају [77]:

- интензификација (intensification) и
- диверзификација (diversification).

Интензификација представља својство алгорита да квалитетно спроводи процес оптимизације. Како метахеуристички алгоритам генерално не поседује информације о структури простора претраге, односно простора решења, једини индикатор вођења процеса оптимизације представља вредност, односно квалитет функције циља.

Међутим, искуствено је утврђено да изражено својство интензификације алгорита у већини случајева није довољно за проналажење високо квалитетних решења на глобалном нивоу. Јака интензификација усмерава фокус претраге алгорита у један део простора, тако да се као резултат веома често јавља тзв. „заглављивање“ алгорита на некој вредности локалног оптимума решења, које може бити значајно удаљено од вредности глобалног оптимума.

Решење овог проблема представља омогућавање проширења претраге на друге регионе простора претраге. Управо то је задатак друге основне карактеристике метахеуристика.

Диверзификација представља својство алгорита које омогућава ширу претрагу решења, у оним деловима простора претраге код којих функција циља не даје почетне вредности које обећавају долазак до оптималног решења. Овакво својство се остварује увођењем стохастичке неизвесности у процес избора решења.

У циљу обезбеђивања ефективности и ефикасности алгорита претраге, неопходно је успоставити балансиране вредности својства интензификације и диверзификације. Идентификацијом и прилагођавањем елемената алгорита који подржавају ова два својства, експерименталним путем се може одабрати њихов оптималан однос за потребе решавања специфичних проблема.

8.1.1.2. Могућности унапређења алгорита претраге

Уколико би се у оквиру експерименталне провере изабраног метахеуристичког метода, констатовала потреба за додатним проширењем претраге допустивих решења или појачањем процеса оптимизације решења, требало би размотрити и примену метахеуристика базираних на итеративном поступку модификације (дела) решења. Најпознатији представници су симулирано каљење (simulated annealing - SA), табу претраживање (tabu search - TS), метода променљивих околина (variable neighborhood search - VNS) и сл.

Комбинација ова два типа метахеуристика се често примењује у циљу проширења скупа допустивих решења [77]. Поступак комбиновања два или више типова метахеуристичких алгоритама у циљу побољшања њихових перформанси назива се хибридизација (hybridization). У литератури је доступан велики број радова на ову тему, а веома детаљан опис и преглед примене хибридизованих алгоритама може се наћи у [91], [92] и [93].

У наведеним примерима, поред комбиновања различитих метахеуристичких алгоритама, приказана је и примена принципа хибридизације са представницима других оптимизационих метода и техника, које не припадају категорији хеуристичких алгоритама.

Хибридни приступ, за потребе евентуалног наставка истраживања бољих метода за решавање постављеног проблема, могао би да обухвати употребу алгоритама за додатну модификацију решења, путем локалне претраге (околине постојећег решења), чиме би се извршило његово унапређивање и приближавање оптималној вредности.

Поред побољшања већ добијених допустивих решења, на овај начин би се могла остварити и додатна претрага околине „приближно“ допустивих решења. То су решења у оквиру којих би била дозвољена одступања у одговарајућој мери од неког ограничења (нпр. када су испуњени сви критеријуми за изводљивост путање, али је утврђено да висина надвишавања препрека, иако није на прописаном нивоу, из итерације у итерацију конвергира испуњењу тог критеријума). Овакав приступ би омогућио проширење скупа допустивих решења, а последично и повећање вероватноће за добијање оптималног решења.

Активација механизма за примену алгоритама за додатну локалну претрагу могла би бити извршена и у току поступка генерисања решења, у случајевима када основни алгоритам за постављени домен УП не може да пронађе решења завидног квалитета. У тим ситуацијама би била „омекшана“ груба дискретизација могућих вредности променљивих и дозвољена претрага у мањим инкрементима у оквирима домена.

Пример 3 - проширење простора претраге применом додатне претраге локалне околине решења

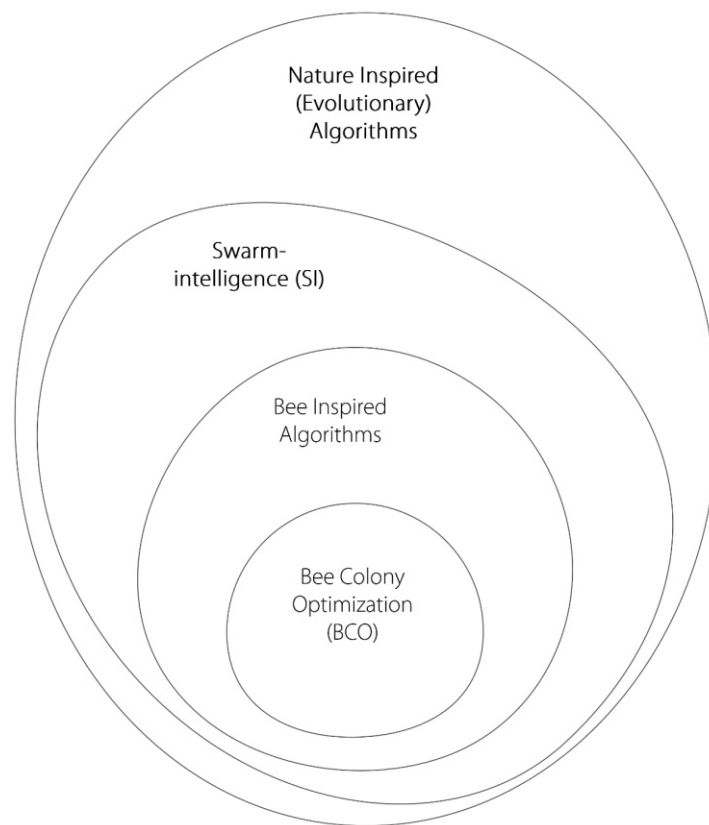
Уколико се решење за дужину сегмента путање тражи у границама од 3 до 10 NM, по инкрементима од 0,1 NM, укупан број могућих решења, тј. вредности УП, би могао бити 71, али ако би претрага била омогућена у мањим инкрементима, од нпр. 0,05 NM, број могућих решења би могао бити повећан на чак 141 решење (скуп могућих решења је дуплиран). Као резултат увећала би се и вероватноћа проналажења бољег или чак допустивог решења, у случају када се поправља недопустиво решење.

8.2. Избор метахеуристичког алгорита

У складу са одлуком о примени метахеуристичких алгоритама за решавање математичког модела, разматрано је неколико представника одговарајућих MAS система, али је због карактеристика емпиријске примене и специфичности алгоритама за оптимизацију путем колоније пчела (Bee Colony Optimization - BCO), одлучено да алгоритам претраге буде заснован на њиховим принципима.

Примена BCO алгорита је једноставна, директна и интуитивна, што оставља довољно простора за додатно разматрање проблема у вези са начином конципирања и структурирања модела, чије решавање се разматра у оквиру рада.

BCO алгоритми припадају групи тзв. пчелињих алгоритама (Слика 45), чији је рад базиран на природним процесима понашања пчела (bee inspired algorithms). Ови алгоритми представљају део ширег концепта интелигенције роја (SI), као део тзв. еволутивних метода, и означавају колективно понашање децентрализованих, самоорганизованих, природних или вештачких система [94]. Са аспекта вештачке интелигенције (artificial intelligence - AI) SI припадају системима чији механизам рада је заснован на заједничкој интеракцији и сарадњи више вештачких агената, тзв. MAS системима [95], па се називају још и алгоритми засновани на популацији (population-based algorithms).



Слика 45. Припадност BCO алгоритама

8.2.1. Алгоритми засновани на понашању пчела у природи

Алгоритми конципирани на биолошким процесима понашања код пчела развијају се од средине 90-их година, када су *Јонезава* и *Кикучи* [96] први пут описали и искористили концепт колективне интелигенције која се испољава у њиховом понашању. Након ових аутора принципе природних процеса код пчела искористили су и *Сато* и *Хагивара* [97] за побољшање резултата рада генетског алгорита, 1997. године. Од тог тренутка развијено је неколико подскупова сродних алгоритама, који су засновани на природном обрасцу понашања пчела, и који углавном припадају групи MAS алгоритама, који подразумевају независну истовремену претрагу скупа допустивих решења, на нивоу једног агента, уз размену информација о оствареним резултатима у циљу проналажења решења бољег квалитета [98].

Неки од најпознатијих представника овог типа алгоритама, осим поменутих BCO алгоритама, су⁵: Marriage in Honey-Bees Optimization (MBO) [99], BeeHive [100], Honey Bees [101], Artificial Bee Colony (ABC) [102], Bees Swarm Optimization (BSO) [103], Bees Algorithm [104] и [105], Honey Bee Marriage Optimization (HBMO) [106], Fast Marriage in Honey Bees Optimization (MHBO) [107] и Virtual Bee Algorithm (VBA) [108].

У складу са прегледом датим у [109] може се уочити разноврсна примена ових алгоритама код проблема комбинаторне оптимизације, укључујући проблем трговачког путника (traveling salesman problem - TSP), проблем рутирања возила (vehicle routing problem - VRP), проблем распоређивања послова на машине (job shop scheduling problem - JSSP), проблем оптималне расподеле ресурса (optimal resource allocation problem), за потребе обуке алгоритама заснованих на неуронским мрежама (neural networks training), као и за решавање сличних реалних проблема и спровођење анализа (нпр. кластер анализа).

⁵ Преводи назива ових алгоритама нису доступни у литератури на српском језику, тако да су наведени оригинални називи.

8.2.2. ВСО алгоритми

8.2.2.1. Развој и примена ВСО алгоритама

Метахеуристички алгоритам за решавање проблема комбинаторне оптимизације постављеном у оквиру овог рада, заснован је на тзв. Систему пчела (Bee system). Овај алгоритам су први дефинисали *Луцић* и *Теодоровић* у [110], за решавање проблема трговачког путника, 2001. године. Током периода развоја од две деценије, структура алгоритма је поједностављена уз истовремено повећање његове ефикасности. Почетни назив алгоритма је од стране аутора промењен у Оптимизацију путем колоније пчела (ВСО) у [111].

Примена ВСО алгоритама је спроведена на широком спектру комплексних реалних комбинаторних проблема великих димензија [112], укључујући:

- **рутирање** (routing): [110], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119];
- **избор локације** (location): [120], [121], [85], [122], [123], [124], [125];
- **распоређивање** (scheduling): [126], [127], [111], [128], [129], [130], [131], [132];
- **примену у медицини и хемији**: [133] и [134];
- **проблем мрежа** (networks): [135];
- **континуалне и мешовите оптимизационе проблеме** (continuous and mixed optimization problems): [136] и [137].

У оквиру ових примена на емпиријски начин је показано да је механизам ВСО алгоритама способан за проналажење висококвалитетних решења у оквиру разумног временског рока. У [109] приказани су резултати упоредне (benchmark) анализе примене ВСО алгоритма у односу на типичне TSP проблеме са познатим вредностима оптималних решења. Резултати су показали да алгоритам даје решења високог квалитета, што је у већини случајева значило добијање оптималне вредности функције циља или вредности која од ње одступа у минималном износу (највеће одступање је износило 3.19% код проблема већих димензија). У свим случајевима резултати су добијени у кратким временским роковима, који су у сразмери са димензијама решаваног проблема.

Поред тога, у оквиру [98] дат је и преглед теоријских доказа конвергенције резултата ВСО алгоритма ка оптималном решењу, у варијанти без и са применом принципа колективног (глобалног) знања агената, добијених из [138] и [139], респективно. Основни закључак за оба случаја је да са повећањем броја итерација извођења алгоритма расте и вероватноћа конвергенције ка оптималном решењу, до вредности 1.

Током развоја ВСО алгоритама издвојила су се два основна типа ових метахеуристика:

- конструктивни (constructive ВСО) и
- ВСО алгоритми за побољшање решења (improving ВСО - ВСО_i).

ВСО_i алгоритми припадају групи метахеуристика базираних на итеративном поступку модификације решења и од значају су са аспекта овог рада.

ВСО_i алгоритми су новијег типа [120], [135] и [137], и развијени су због ограничења уочених у неким применама конструктивних ВСО алгоритама за решавање тешких проблема комбинаторне оптимизације (нпр. *p-center problem* [112]). Основна разлика између ова два типа ВСО алгоритама, јесте што се у случају ВСО_i свакој вештачкој пчели на почетку сваке итерације додељује једно (обично допустиво) комплетно решење, које се у току итерације модификује у циљу побољшања. Иако су неки елементи овог алгоритма идентични конструктивном ВСО алгоритму (механизам поређења квалитета решења и поступак регрутације нових агената), принцип рада на коме је заснован га сврставају у групу метахеуристика базираних на итеративном поступку модификације решења (ново решење се добија модификацијом постојећег решења, на стохастички начин). Због описаних позитивних карактеристика прилагођени облик ВСО_i алгоритма је примењен у оквиру

овог рада као примарни метод за решавања постављеног проблема комбинаторне оптимизације. Основне карактеристике његове примене описане су у оквиру поглавља 8.3.

Поред два основна приступа у развоју ВСО алгоритама, у литератури је забележена и њихова комбинована примена, која је произвела посебну хибридизовану форму алгоритама [132], у којој је улога конструктивног ВСО алгоритама проналажење почетног решења, које се након тога унапређује применом ВСО_i алгоритама. Такође, поједини примери развоја ВСО алгоритама обухватају и примену фази логике (fuzzy logic) у склопу механизма претраге решења [118], [111] и [128], као и употребу код проблема вишекритеријумске оптимизације [85], што је посебно битно са аспекта овог рада.

Као припадници MAS система, ВСО алгоритама су погодни за примену поступка паралелизације, тј. паралелно извршавање алгоритама на свим нивоима, чиме се смањује време рада и повећава ефикасност алгоритама. Груба подела задатака, који могу бити спроведени на паралелној основи, може бити извршена на различите начине, а примери ВСО алгоритама заснованих на синхроној и асинхроној паралелној сарадњи агената дата је у [140] и [141].

У поређењу са другим сродним алгоритама (доказане успешности) на примеру решавања типичних проблема, ВСО је такође забележио резултате који су у рангу најефикаснијих алгоритама, као што су АСО и PSO [117].

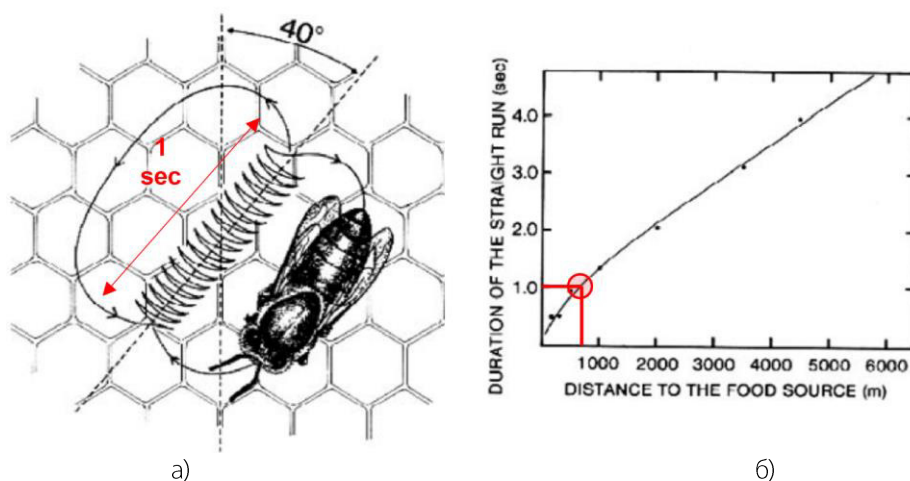
8.2.2.2. Концепт рада ВСО алгоритама

Основни принцип рада ВСО алгоритама базиран је на темељу природног процеса потраге за храном (цветни нектар и полен) у оквиру заједнице, тј. колоније, медоносних пчела (honeybee), по чему су и добили име. *Карл Ритер фон Фриш*, аустријски етолог, први је дешифровао значење плесног ритуала пчела у процесу потраге за храном [142]. Његов рад на овом пољу је у највећој мери утицао на добијање Нобелове награде у категорији за филозофију или медицину 1973. године, заједно са *Конрадом Лоренцом* и *Николасом Тинбергеном* [143].

Наиме, у реалном животу, пчела, након насумичне потраге за храном, враћа се у одређени део кошнице и преноси осталим пчелама резултате своје потраге, у виду посебног плесног ритуала. Путем овог специфичног природног феномена врши се размена информација о месту извора хране. Значење пчелињег понашања би, у упрошћеној и уопштеној форми (која не мора бити идентична код различитих врста пчела: [144], [145]), подразумевало да је начин извођења тзв. „њихајућег“ плеса (енгл. waggle dance) у директној вези са локацијом (смер и раздаљина) и количином пронађене хране [145].

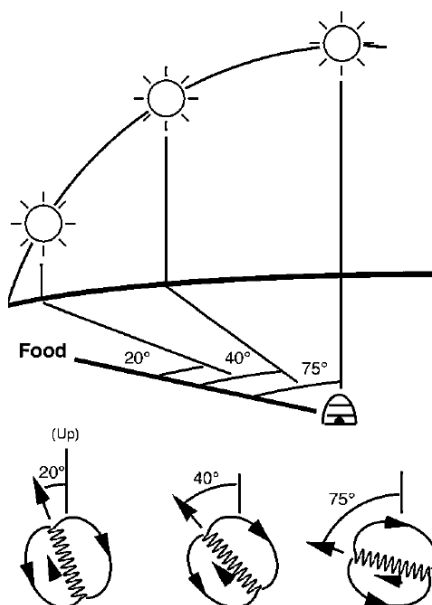
Ритуал плеса се састоји из низа понављања, при чему се вијугави део плеса обавља у тачно одређеном правцу на површини саћа у кошници. Када је један циклус плеса завршен, пчела се у кружним покретима враћа на почетак и понавља плес испочетка [145]. За друге пчеле које посматрају извођење овог плеса, поред смера кретања, битно је и време трајања плеса, укључујући и број понављања. У том смислу, смер кретања пчеле означава угао локације хране у односу на тренутни положај Сунца, док сама фаза плеса указује на удаљеност и количину извора хране.

На слици испод (Слика 46 а), извор: [145]), приказан је плес пчеле под углом од приближно 40°, што значи да је у том смеру лоцирана храна у односу на положај Сунца. Трајање фазе плеса у једном смеру од 1 секунде означава растојање нешто мање од 1000 m (око 750 m прецизније) до дате локације хране (Слика 46 б)). Укупно трајање плеса, односно број понављања, указује на количину нађених ресурса коју пчела „рекламира“. Пчела и следбеници, које је придобила у оквиру овог процеса, се враћају како би сакупили још хране на „рекламираном“ извору.



Слика 46. Основни концепт плеса пчела у природи

Принцип указивања на локацију извора хране у односу на релативан положај Сунца приказан је на неколико примера на следећој слици (Слика 47, извор: [145]).



Слика 47. Принцип указивања на локацију извора хране у односу на Сунце

8.3. Примена ВСОi алгорита

Иако припадници конструктивне фамилије ВСО алгоритама имају општи логички механизам сличнији когнитивном процесу пројектанта приликом пројектовања процедура за инструментално летење, ВСОi алгоритама омогућују истовремену претрагу вишеструких решења у оквиру једне итерације. То практично значи да, за разлику од традиционалног приступа, где један пројектант врши проверу могућих решења, код ВСОi алгоритама на том задатку учествује већи број агената, тачније читава колонија вештачких пчела. Овакав приступ омогућен је појачаним својством диверзификације, које је присутно код ове фамилије алгоритама.

Вештачке пчеле спроводе независну претрагу допустивих решења и у циљу проналажења најбољег решења међусобно сарађују и врше размену стечених информација у сваком кораку претраге. На тај начин се применом колективног знања њихова претрага усмерава ка деловима простора решења који више обећавају, истовремено напуштајући оне делове код којих је утврђен мањи потенцијал за проналажење квалитетног решења.

Од укупног броја вештачких пчела, које учествују у овом процесу, може зависити успешност простора претраге, тако да је рад алгорита изузетно осетљив на вредност овог параметра. Од

њега зависи почетни степен диверсификације претраге, док у каснијим корацима ова величина може утицати и на појачање процеса интензификације претраге, када се издвоје обећавајућа решења, која ће привући већи број агената.

Генерално код ВСО алгоритама сваки корак конструкције/модификације решења се састоји од две наизменичне фазе, тзв. **пролаз напред** и **пролаз назад** (forward / backward pass), који су еквивалентни описаном процесу тражења хране код медоносних пчела. У пролазу напред пчеле траже изворе хране, а затим, у пролазу назад, одговарајућим плесним покретима описују тај извор другим пчелама у кошници и прикупљају следбенике за следећу проширену потрагу. У зависности од примењене терминологије, за означавање датих фаза могу се применити и појмови „лет унапред“ и „лет уназад“ као у [146], који на индикативни начин означавају процес функционисања вештачких пчела у алгоритму. Одличан опис концепта рада ВСО алгоритама дат је у [98].

У оквиру **пролаза напред** свака вештачка пчела врши модификацију дела решења на случајан начин и задужена је за његову даљу конструкцију. Избор се врши на случајан начин у односу на добијене вредности функција циља, које представљају меру квалитета новог модификованог решења. Број пролаза напред, као и број вештачких пчела које учествују у претрази (В), представља параметарску вредност и мора бити дефинисан пре пуштања алгоритма у рад.

У оквиру **пролаза назад**, свака вештачка пчела одлучује да ли ће остати лојална модификованом решењу које је конструисала, или ће одустати од њега и наставити претрагу прихватајући тренутно модификовано решење друге пчеле, које потенцијално обећава решење већег квалитета. Пчела која остане лојална свом решењу и привуче нове пчеле назива се регрутер (recruiter), а пчела која одустане од свог решења и изабере да следи решење друге пчеле, назива се следбеник (follower).

Као и у случају пролаза напред, и у овој фази се одлука на нивоу пчеле о лојалности доноси на случајан начин и у највећој мери зависи од добијених вредности функција циља расположивих модификованих решења. У току ове фазе практично се врши размена информација пчела о тренутним решењима, која одговара фази „њихајућег“ плеса у природи, на основу које се доноси и одлука о лојалности решењу (боље „рекламирано“ решење ће привући већи број пчела).

Једна итерација алгоритма се завршава након што све вештачке пчеле изврше унапред дефинисан број летова (пролаза). Почетно решење које се генерише чува се као глобално најбоље, а након сваког корака свих пчела проверава се да ли је неко од новодобијених решења боље од тренутно најбољег. Уколико јесте, оно се поставља као ново глобално најбоље решење. Ова провера се врши током сваке итерације све до завршетка алгоритма.

Алгоритам се спроводи итерацију по итерацију, док се не испуни унапред задати критеријум за заустављање његовог рада, који је најчешће у функцији броја итерација или вредности функције циља. Овај критеријум може представљати нпр. максималан укупан број итерација или максималан број итерација без унапређења глобалног решења, или може бити утврђен експерименталним путем, у зависности од специфичности проблема који се решава. Поред тога, и време рада рачунара се може искористити као критеријум заустављања. На самом крају, најбоље глобално решење које је активно у тренутку прекида рада алгоритма представља финално решење.

Основна корист од примене оваквог алгоритма у процесу пројектовања LPV процедура се огледа у следећем: за разлику од пројектанта, који ће у зависности од уочене конфигурације терена на самом почетку процеса пројектовања елиминисати одређени скуп решења, која би највероватније била недопустива са аспекта надвишавања препрека, ВСО приступ, који подразумева одређени ниво стохастике, осигурава рану диверсификацију претраге простора допустивих решења. То практично значи да је у оквиру процеса претраге решења узет у обзир и онај део простора решења који је од стране пројектанта одбачен на самом почетку процеса пројектовања. Брзина рада алгоритма у односу на методе рада пројектанта, компензује додатно време потребно да се провери овај скуп решења, чиме се осигурава добијање квалитетнијег решења.

ДЕО III

РАЧУНАРСКИ МОДЕЛ

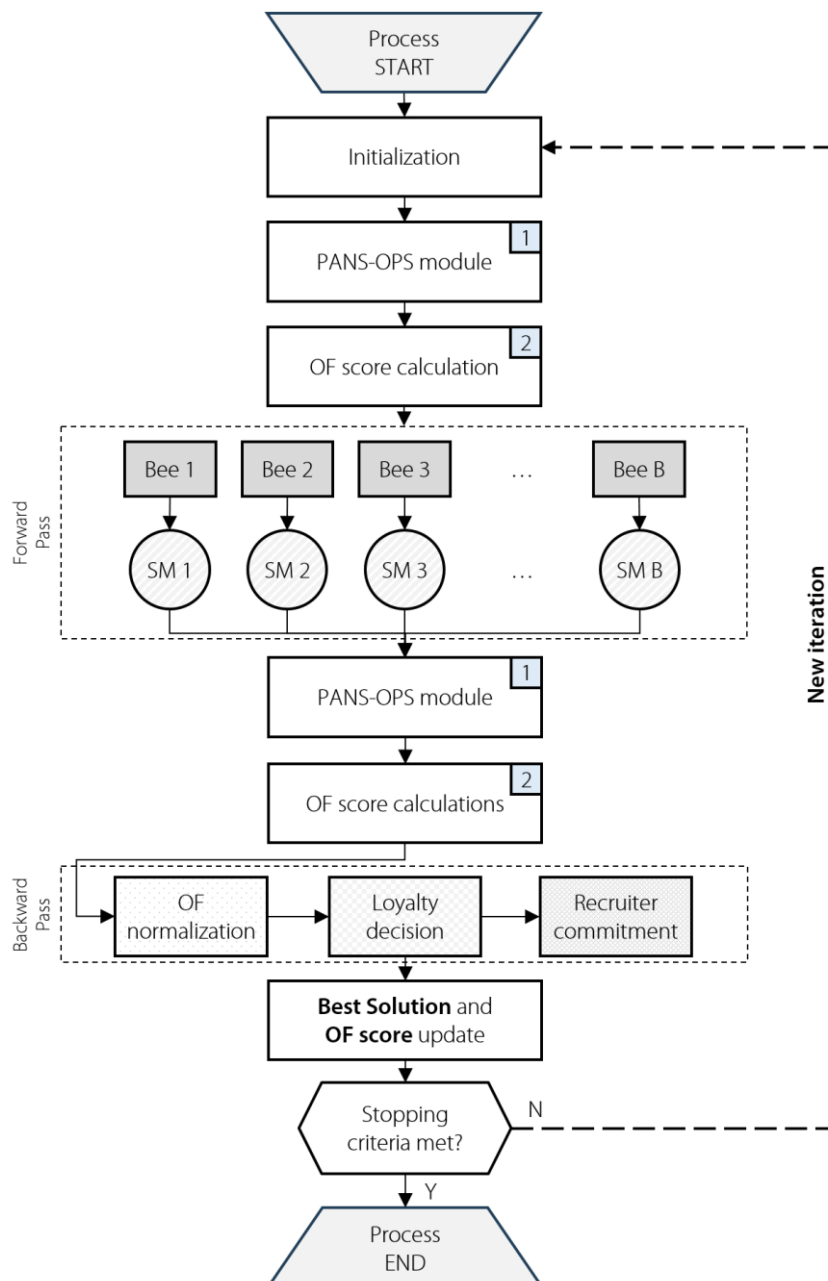


9. КОНЦЕПТУАЛНИ МОДЕЛ

Концептуални модел којим се описује и решава постављени проблем пројектовања LPV процедура приказан је на следећој слици (Слика 48). Овај модел представља репрезентацију целокупне структуре проблема и процеса дефинисаних у циљу његовог решавања, и представља основу за развој рачунарског модела. Концептуални модел укључује два основна модула:

- **оптимизациони модул** и
- **PANS-OPS модул.**

Ова два модула имају засебну функцију, која је описана у оквиру претходних поглавља. Оптимизациони модул представља главни модул, који се састоји од алгорита за извршавање модела и претрагу, тј. оптимизацију решења. Овај део модела има основну функцију да замени улогу човека у поступку доношења одлука, односно да аутоматизује поступак одлучивања у оквиру процеса проналажења најбољег решења, на недетерминистички начин. PANS-OPS модул се састоји од низа функција неопходних за извршавање описаног процеса пројектовања LPV процедура и позива се по потреби.



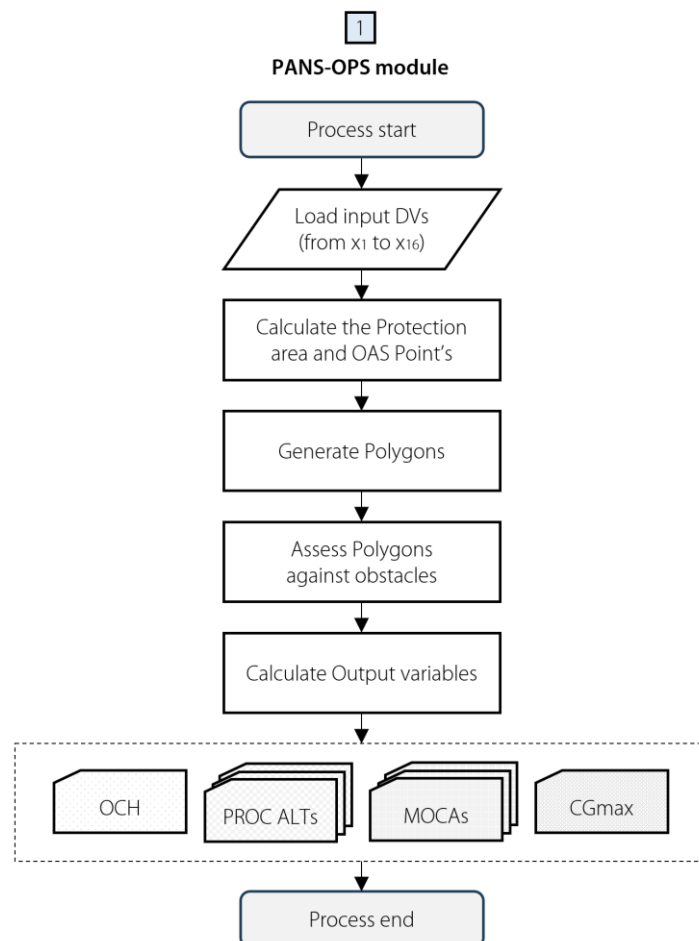
Слика 48. Концептуални модел

Пре почетка процеса, дефинишу се **параметри** неопходни за извршавање модела: број пчела (В), број пролаза напред у оквиру једне итерације, као и укупан број итерација након кога се извршавање модела прекида.

На почетку процеса, у оквиру корака **иницијализације**, генерише се иницијално решење на случајан начин. У следећем кораку позива се PANS-OPS модул, како би се извршио прорачун главних излазних променљивих, а затим и прорачун коначне оцене функције циља (**OF score calculation**), у оквиру кога се проверава испуњеност постављених ограничења у поступку оптимизације.

Приказ главног (пот)процеса у оквиру **PANS-OPS модула** (Слика 49), у највећем делу одговара општем процесу пројектовања процедура описаном у поглављу 5.2. Основна разлика је што је процена комплексности, односно прорачуна оцене OF, делегирана посебном потпроцесу у оквиру оптимизационог модула (следећи корак).

У оквиру PANS-OPS модула, на основу случајно генерисаних вредности УП (које чине иницијално решење) врши се прорачун тачака (points), које дефинишу геометрију свих заштитних простора и OAS равни. Од генерисаних тачака креирају се одговарајући скупови, који одређују посебне полигоне унутар заштитних простора и OAS равни. У оквиру сваког одређеног полигона врши се идентификација препрека и примењује одговарајуће надвишавање. На основу провере препрека, добијају се излазне променљиве, за сваки сегмент. Као директан излаз добијају се вредности OCH, MOCA и CGmax, док се PROC ALT прорачунавају на основу вредности УП, на претходно описан начин (поглавље 5.4.2). Добијене вредности се преносе у следећи корак.



Слика 49. PANS-OPS модул

Прорачун оцене функције циља (Слика 50) врши се на основу вредности свих УП, укључујући и излазну променљиву OCH, као 17. УП. Применом основне формуле функције циља (43) прорачунава се њена иницијална вредност. На ову вредност се додаје 1000 бодова за свако нарушавање ограничења, из скупа ограничења С (поглавље 7.5), према следећој формули:

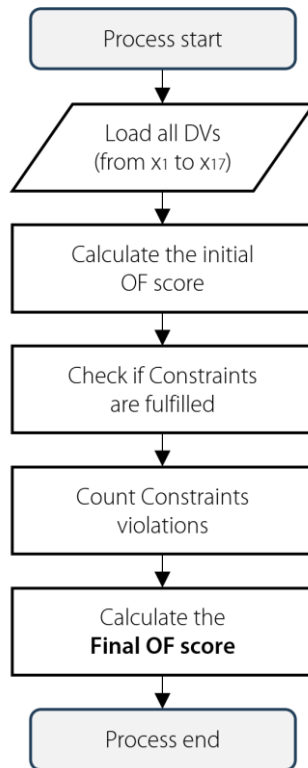
$$OF\ score = Initial\ OF\ score + v \cdot 1000$$

(62)

где v представља укупан број нарушавања ограничења.

2

OF score calculation process



Слика 50. Процес за прорачун OF

Након прорачуна оцене функције циља иницијалног решења, спроводи се корак алгоритма који обухвата **пролаз напред**. У оквиру овог корака свака пчела из скупа B врши посебну модификацију иницијалног решења на случајан начин, и усклађује вектор решења према тренутним доменима УП. Сва решења из добијеног скупа нових решења ($SM\ 1, SM\ 2, \dots, SM\ B$) пролазе засебно кроз PANS-OPS модул и корак прорачуна оцене функције циља. Ове вредности представљају неопходан улаз за следећи корак модела.

Након оцене модификованих решења, спроводи се корак - **пролаз назад**, у оквиру кога се одређује нови редуковани скуп решења, која ће бити пренесена у наредну итерацију. У првој фази овог корака врши се прилагођавање оцена функције циља (нормализација) за потребе доношења одлука о лојалности и прихватању нових решења. У односу на нормализоване оцене OF свака пчела на случајан начин одлучује да ли ће остати лојална свом решењу или ће га напустити. Све пчеле које напусте своје решење морају да на случајан начин изаберу решење друге пчеле која је остала лојална свом решењу. У овом поступку један број решења, који мање обећава, се напушта, а већи број пчела, тј. агената, се фокусира на појединачна решења. Задржана решења ће на исти начин бити даље модификована, у зависности од изабраног броја пролаза напред.

Пре завршетка сваке итерације, **ажурира се досадашње најбоље решење**, тако што се бележе његов вектор решења и коначна оцена OF. Ово решење постаје ново иницијално решење у наредној итерацији.

Рад модела се прекида када се достигне укупан број задатих итерација.

10. АРХИТЕКТУРА РАЧУНАРСКОГ МОДЕЛА

Рачунарски модел у оквиру овог рада развијен је тако да његова архитектура одговара структури описаног концептуалног модела, и састоји се од два основна модула, са додатним поделементама, који укључују: подмодуле, рутине и функције (Слика 51):

1. Оптимизациони модул, који се састоји од:

1.1. програма за извршење ВСО алгоритма, који садржи:

1.1.1. рутину за иницијализацију променљивих и константи, спровођење итеративног процеса и испис функције циља, која садржи:

1.1.1.1. функције за покретање подмодула за проверу заштитних простора и OAS равни,

1.1.1.2. функцију за прорачун функције циља.

2. PANS-OPS модул, који се састоји од:

2.1. подмодула за прорачун номиналне путање и заштитних простора, који садржи:

2.1.1. функције за прорачун тачака (укупно 87 појединачних тачака),

2.1.2. функције за прорачун ограничења (MSD за INITIAL, INTER и MA, и дужине MA),

2.1.3. функције за прорачун PROC ALT (на IAF, IF, FAP, SDF, MATF),

2.1.4. функцију за прорачун SOC,

2.1.5. рутине за прорачун заокрета (на IF и MATF), које садрже:

2.1.5.1. функције за прорачун Wind Effect,

2.1.5.2. функције за прорачун тангенти;

2.2. подмодула за прорачун OAS равни;

2.3. подмодула за прорачун домена улазних променљивих;

2.4. подмодула за манипулацију препрекама, који садржи:

2.4.1. базу препрека (тачке, дефинисане X и Y координатама, и надморском висином у метрима),

2.4.2. функцију за трансформацију координата препрека;

2.5. подмодула за проверу заштитних простора и OAS равни, који садржи:

2.5.1. рутине за прорачун МОСА (за INITIAL и INTER), које садрже:

2.5.1.1. функције за проверу заштитних простора, које садрже:

2.5.1.1.1. процедуру за одређивање полигона (број и редослед тачака),

2.5.1.1.2. функцију за идентификацију тачака (препрека) у оквиру полигона (заштитних простора),

2.5.1.1.3. функције за прорачун МОС (за све заштитне просторе, укључујући примарне и секундарне просторе),

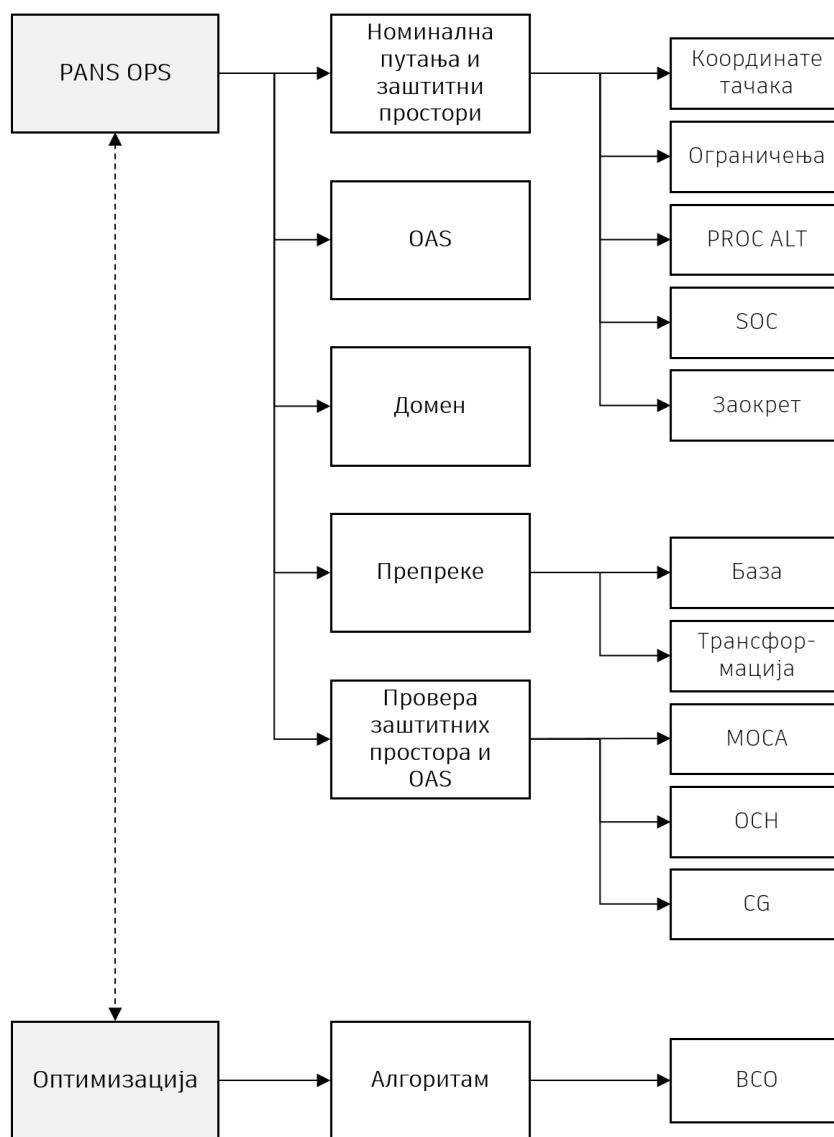
2.5.1.1.4. функције за примену SDF (на IF и SDF);

2.5.2. рутине за прорачун ОСН (за прецизни и скраћени прецизни сегмент са TF), које садрже:

2.5.2.1. функције за проверу OAS равни, које садрже:

2.5.2.1.1. процедуру за одређивање полигона (број и редослед тачака),

- 2.5.2.1.2. функцију за идентификацију тачака (препрека) у оквиру полигона (OAS равни),
- 2.5.2.1.3. функције за прорачун HL (за OAS равни);
- 2.5.3. рутину за прорачун CG (за MA), која садржи:
 - 2.5.3.1. функцију за проверу заштитних простора, које садрже:
 - 2.5.3.1.1. процедуру за одређивање полигона (број и редослед тачака),
 - 2.5.3.1.2. функцију за идентификацију тачака (препрека) у оквиру полигона (заштитних простора),
 - 2.5.3.1.3. функције за прорачун МОС (за све заштитне просторе, укључујући примарне и секундарне просторе).



Слика 51. Основна архитектура рачунарског модела

Слика 51 даје приказ основне архитектуре рачунарског модела, која обухвата елементе из највише хијерархије. Главни фокус овог поглавља јесте приказ основне структуре кода, односно принципа примене описаних захтева у оквиру рачунарског програма.

У описаном рачунарском програму, појмови рутину, функција и процедура односе се на различите нивое организације кода у складу са њиховом наменом, степеном комплексности и позицијом у хијерархији система.

Рутина је шири блок кода који обухвата више функција и/или процедура, са циљем обављања комплексније логичке целине унутар програма.

Функција је појединачан, мање комплексан блок кода који обавља једну конкретну операцију или израчунавање и враћа резултат.

Процедура је блок кода који обавља задату радњу или серију корака, али не враћа резултат као функција. Њена улога је често повезана са променом стања програма, припремом података или контролом тока.

Функције и процедуре се могу позивати више пута у различитим деловима програма, за одговарајуће потребе подмодула.

10.1. Оптимизациони модул

Основни елементи алгорита у оквиру оптимизационог модула већ су индикативно представљени и описани приликом обликовања концептуалног модела (поглавље 9) и дела рада који се бави применом ВСО_і алгорита (поглавље 8.3).

Главни принципи су дефинисани на основу унапређене верзија ВСО(і) алгорита, коју су предложили Јовановић и Теодоровић [147]. Псеудо-код алгорита може се приказати на следећи начин [148], [149], [55]:

1. Одредити почетно решење
2. **do**
3. Доделити решење свакој пчели
4. **for** $i = 1$ **to** број летова
5. Лет унапред
6. Лет уназад
7. **next**
8. **while** (критеријум заустављања није задовољен)

Иницијализација

На почетку алгорита неопходно је генерисати иницијално решење. За проблем разматран у овом раду, алгоритам насумично генерише иницијално решење које се састоји од комплетног вектора УП. Модел дозвољава одабир и недопустивих решења. Међутим, у таквим случајевима вредност функције циља се значајно кажњава. За свако кршење ограничења, вредност функције циља се увећава за додатних 1000 бодова.

Унутар *while* петље, пчелама се додељују решења која оне покушавају да унапреде током пролаза напред и да размене информације у пролазу назад. Укупан број пчела (В) које учествују у процесу претраге утврђује се експерименталним путем. Типична примена подразумева број од 10 пчела, што је потврђено и у оквиру овог истраживања (видети поглавља 11 и 12).

Пролаз напред

Псеудо-код за пролаз напред може се приказати на следећи начин [148], [149]:

1. **for** $i = 1$ **to** број промена
2. Дозволи свакој пчели да направи једну модификацију свог решења
3. Проверити да ли је пронађено ново решење најбоље познато решење
4. **next**

Током пролаза напред, свака пчела врши модификацију свог решења са циљем да га побољша. У оквиру овог рада, пчела врши модификацију тако што насумично одабере једну УП из вектора решења, након чега се за ту променљиву насумично бира једна од дозвољених вредности из њеног домена.

За све УП од те тачке па до краја вектора, алгоритам проверава да ли су постојеће вредности и даље допустиве у односу на новоизабрану вредност УП (пошто су домени УП међусобно зависни). Уколико јесу, задржавају се, док се у супротном, бира нова допустива вредност на случајан начин.

Након овог избора проверава се и испуњеност услова функције циља који су прописани у оквиру ограничења. За свако појединачно кршење услова укупна оцена функције циља се увећава за 1000 бодова. Када све пчеле креирају ново решење, проверава се да ли је добијено ново најбоље решење. Уколико јесте, оно се бележи, а у супротном се процес наставља.

Пролаз назад

Главни кораци повратног пролаза могу се приказати кроз следећи псеудо-код [148], [149]:

1. Нормализовати критеријумске функције решења свих пчела
2. Одредити лојалност пчела својим решењима
3. Одредити лојалне пчеле које ће нелојалне почети да прате

Нормализација квалитета решења за сваку пчелу b извршава се по следећој формули [150]:

$$O_b = \frac{T_{\max} - T_b}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad O_b \in [0, 1], \quad b = 1, 2, \dots, B \quad (63)$$

где је:

B – укупан број пчела,

O_b – нормализована вредност решења b -те пчеле,

T_b – вредност функције циља за b -ту пчелу,

T_{\min} – минимална вредност функције циља међу свим пчелама,

T_{\max} – максимална вредност функције циља међу свим пчелама.

Након нормализације, пчеле доносе одлуку о лојалности. Вероватноћа да ће се b -та пчела задржати на свом претходном решењу прорачунава се према формули:

$$p_b = e^{-(O_{\max} - O_b)} \quad (64)$$

Одлука о лојалности доноси се на основу насумично изабраног броја из интервала од 0 до 1. Ознака овог случајног броја је γ . Уколико се вредност изабраног броја налази између 0 и p_b ($0 < \gamma \leq p_b$), дата пчела остаје лојална свом решењу. У супротном, пчела постаје нелојална (тј. пратилац).

Све нелојалне пчеле затим бирају коју лојалну пчелу (регрутера) ће пратити. Вероватноћа да ће нелојална пчела изабрати одређеног регрутера i дата је следећом формулом:

$$q_b = \frac{O_b}{\sum_{l \in L} O_l} \quad (65)$$

где је L скуп свих лојалних пчела.

За сваку нелојалну пчелу генерише се један случајан број из интервала од 0 до 1, и на основу вероватноћа q_b , утврђује се коју ће лојалну пчелу пратити. То значи да ће одбацити сопствено решење и усвојити решење изабраног регрутера.

Критеријум заустављања

Процес смењивања пролаза напред и назад, односно итерација, наставља се све док се не испуни критеријум заустављања. У овом раду, као критеријум заустављања коришћен је број итерација. Коначан број итерација зависи од конкретног случаја примене, и обично се утврђује експерименталним путем. На основу резултата добијених у оквиру поступка тестирања модела (поглавље 11) и нумеричких примера (поглавље 12), препорука је да број итерација не буде мањи од 100.

10.2. PANS-OPS модул

Основни принципи за развој функционалности PANS-OPS модула, у оквиру рачунарског модела, дефинисани су у поглављима 5.4 Поступак конструкције процедуре и 5.5 Поступак анализе надвишавања препрека. Формуле и зависности описани у оквиру наведених поглавља директно су примењени приликом дефинисања рачунарског програма у оквиру одговарајућих рутина, функција и процедура.

Већина операција у оквиру кода рачунарског модела дефинисана је једноставном применом основних принципа Еуклидове геометрије и тригонометријских функција.

Подмодул за прорачун номиналне путање и заштитних простора

Сви елементи функција у оквиру овог подмодула су описани у претходним поглављима, и њихова трансформација у програмски код је представљала директан и једноставан корак. Додатно, начин одређивања тангенти описан је у оквиру подмодула за проверу заштитних простора и OAS равни.

Подмодул за прорачун OAS равни

Улазни захтеви примењени у оквиру подмодула за прорачун OAS равни дефинисани су у оквиру поглавља 5.4.3. Додатно, детаљан опис свих процеса у вези са прорачуном OAS равни дат је и у оригиналном документу [69], чији принципи су примењени у потпуности.

Подмодул за прорачун домена улазних променљивих

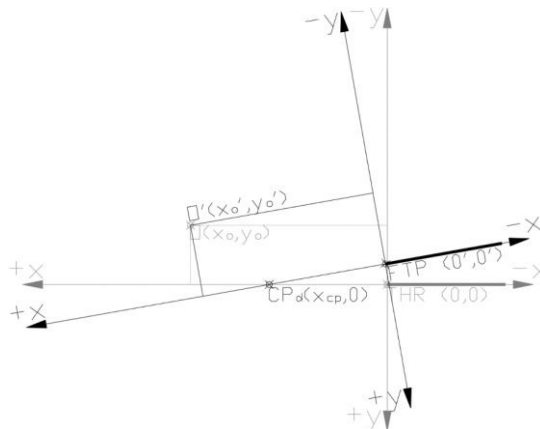
Сви захтеви примењени у овом подмодулу су приказани у оквиру поглавља 7.2. Основни задатак овог подмодула је да контролише границе домена УП у складу са описаним зависностима на дефинисан начин.

Подмодул за манипулацију препрекама

Основни задатак овог подмодула јесте трансформација координата препрека из дефинисане базе података, која се врши у случају примене бочног прилаза (APPtа и CPd) и/или измештања прага слетања (THRd).

У овом поступку практично се врши прорачун нових координата препрека у односу на ротирани референтни координатни систем, са новим координатним почетком у фиктивном прагу слетања (FTR). Ротирање се врши у односу на тачку CPd, чије координате остају непромењене и у новим координатном систему. Прорачун елемената за конструкцију процедуре се врши у односу на новопостављени референтни координатни систем.

Нове координате препреке $O(x_o, y_o) \rightarrow O'(x_o', y_o')$ одређују се по принципима утврђивања растојања тачке од праве. У ову сврху употребљава се оригинални координатни систем, где праве представљају ротирани осе новог координатног система - x' и y' (Слика 52).



Слика 52. Поступак ротације координатног система

Формула за утврђивање растојања тачке (O) од праве (p) има следећи општи облик [151]:

$$d(O(x_o, y_o), p: A \cdot x + B \cdot y + C) = \frac{|A \cdot x_o + B \cdot y_o + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (66)$$

Поред утврђивања најкраћег (управног) растојања препреке до ротиране осе, неопходно је утврдити и страну са које се налази препрека у односу на ротирану осу. Овај поступак је важан за утврђивање предзнака + или – испред координате препреке.

За ову потребу користи се формула за одређивање знака детерминанте (D) два вектора у 2D простору - класична метода за одређивање да ли је тачка O(x_o, y_o) са **леве или десне стране вектора** дефинисаног тачкама FTP(x₁, y₁) и CPd(x₂, y₂) [151]:

$$D = (x_o - x_1) \cdot (y_2 - y_1) - (y_o - y_1) \cdot (x_2 - x_1), \quad (67)$$

где важи следеће правило:

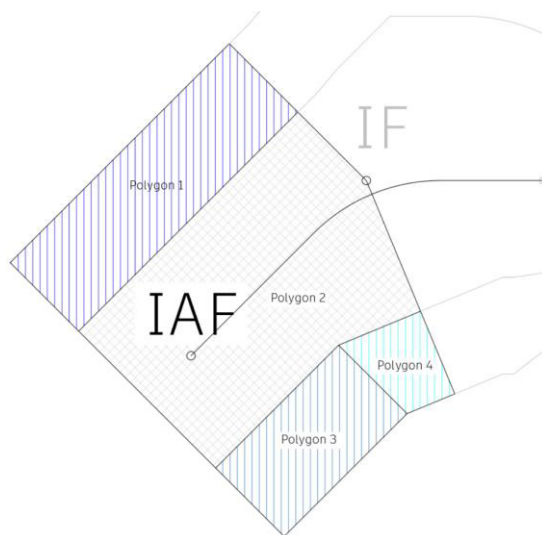
- ако је $D > 0 \rightarrow$ тачка O' је лево од вектора FTP-CPd \rightarrow враћа предзнак +,
- ако је $D < 0 \rightarrow$ тачка O' је десно од вектора FTP-CPd \rightarrow враћа предзнак -.

Када имамо и измештен праг, примењује се исти поступак ротације, али са претходним кораком транслирања координатног почетка дуж x осе, на изабрано растојање иза THR.

Принципи утврђивања растојања тачке од праве искоришћени су и за потребе одређивања адекватног надвишавања препрека у секундарном заштитном простору (MOCs), чија вредност зависи од припадности полигону и удаљености од ивице примарног заштитног простора.

Подмодул за проверу заштитних простора и OAS равни

Формирање полигона, који представљају део заштитног простора или појединих OAS равни, базирано је на логички структурираним табеларним подацима који повезују именоване тачке (темена полигона) и њихове координате. Циљ овог процеса је изградња затворених геометријских контура које описују границе наведених интересних зона (Слика 53).



Слика 53. Пример полигона формираних у оквиру INITIAL сегмента

У типичном приступу, структура података подразумева две логички повезане табеле. Прва садржи редослед тачака које дефинишу контуре полигона, као и критеријуме активирања сваке појединачне тачке (нпр. логичке или условне вредности). Друга табела садржи прорачунате координате X и Y за сваку од наведених тачака. Повезивање између ових табела реализује се путем индексирања на основу имена тачака, што омогућава флексибилно и динамичко формирање полигона, уз могућност аутоматског ажурирања уколико дође до промене у изворним подацима.

Сам процес формирања полигона подразумева аутоматско издвајање активних тачака из унапред дефинисаног скупа и затим прикупљање њихових координата ради дефинисања низова

који представљају темена полигона, који се користе за идентификацију препрека у каснијем кораку. Завршна тачка полигона понавља прву тачку како би се полигон затворио, што је предуслов за примену метода броја обрта.

На описани начин утврђују се посебни полигони за сваки примарни и секундарни простор и OAS раван, који су даље, према специфичном случају, подељени на више мањих полигона за потребе прорачуна и примене адекватног надвишавања препрека.

Проблем **идентификације препрека у оквиру заштитних простора и OAS равни** сведен је на проблем одређивања припадности тачке полигону. Примењено решење проблема описано је следећим псеудо-кодом:

1. Load polygon data
2. Load all points to be tested
3. **do**
4. Set current point from the list of points
5. **for each polygon in the list of polygons**
6. Initialize winding number to 0
7. Append the first vertex to the end to close the polygon
8. **for each edge of the polygon**
9. Check **if point lies exactly on the edge**
10. if true, classify point as "on edge" and break
11. else
12. **if upward crossing and point is left of edge**
13. increment winding number
14. **if downward crossing and point is right of edge**
15. decrement winding number
16. next edge
17. **if winding number \neq 0 and point is not on edge**
18. classify point as "inside polygon"
19. **else if point not on edge**
20. classify point as "outside polygon"
21. next polygon
22. Save classification result for current point
23. **while** (there are more points to process)

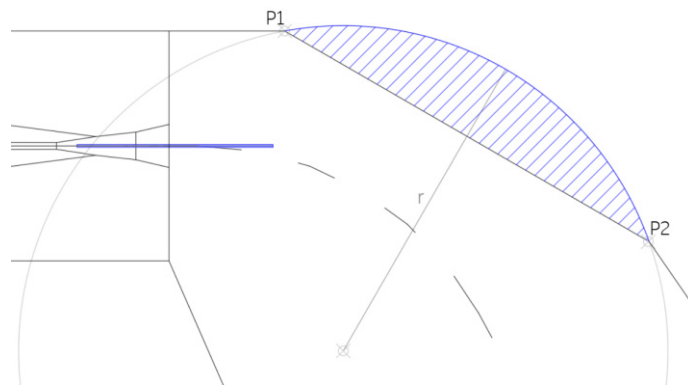
Алгоритам који је представљен у претходном псеудо-коду има за циљ да омогући поуздану и ефикасну проверу да ли произвољна тачка у равни припада унутрашњости неког од више задатих полигона. Применом оваквог алгоритма могуће је извршити просторну класификацију великог броја тачака на основу њихове геометријске релације према сложеним и потенцијално неконвексним полигоналним областима.

Основ алгоритма чини **метод броја обрта** (winding number algorithm), који се сматра једним од најпоузданијих критеријума за одређивање припадности тачке унутрашњости полигона. За разлику од једноставнијег алгоритма пресека зрака (Ray Casting), који се базира на бројању пресека зрака са страницама полигона, метод броја обрта не зависи од избора смера зрака и уједно подржава рад са конкавним полигонима [152]. Он рачуна колико пута полигон „обмотава“ дату тачку у смеру кретања (позитивном или негативном), што се изражава као целобројна вредност – ако је вредност различита од нуле, тачка се налази унутар полигона.

За сваку страницу полигона рачуна се да ли постоји пресек са хоризонталном линијом из тачке, као и релативна оријентација тачке у односу на дату ивицу - чиме се повећава или смањује укупан број обрта. Поред тога, интегрисана је и функција за проверу да ли тачка лежи директно на ивици полигона, како би се на поуздан начин класификовале и граничне тачке.

Овакав приступ је изабран због своје генералности (подржава произвољан број полигона и тачака), тачности (обрађује конкавне и конвексне полигоне, укључујући граничне случајеве) и ефикасности, јер се све провере врше у линеарном времену у односу на број темена полигона и број тачака. На тај начин се омогућава скалабилна примена у реалним системима за обраду великог броја просторних података.

Како приликом дефинисања полигона нису узете у обзир ивице са кружним луковима (нпр. код заштитних простора заокрета), ови делови простора су додатно проверени на тачке, односно препреке. То је учињено применом додатне подфункције, која проверава да ли се тачка налази у оквиру прорачунатог радијуса кружнице (r) и са спољне стране дужи, дефинисане између две тачке ($P1$ и $P2$), која чини тетиву кружнице (Слика 54).

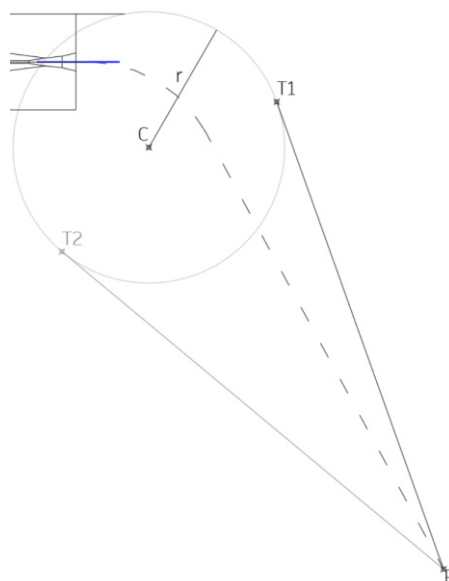


Слика 54. Принцип идентификације препрека у простору заокрета

Један од последњих елемената, које је било неопходно развити у оквиру рачунарског модела, а који је неопходан за примену захтева из критеријума за пројектовање процедура, јесте начин дефинисања тачака које представљају **тангенте кружница**. Ове тачке је потребно прорачунати у случају одређивања заштитног простора заокрета.

За ову потребу, формулисан је следећи геометријски проблем:

за кружницу, описану центром $C(x_c, y_c)$ и полупречником r , и дату спољашњу тачку $P(x_p, y_p)$, одредити координате тачака додира $T_1(x_1, y_1)$ и $T_2(x_2, y_2)$ у којима права повучена из тачке P тангира кружницу.



Слика 55. Принцип одређивања тангенти кружнице

Координате тангенти се добијају применом следећих формула:

$$\begin{aligned} x_{1,2} &= x_c + r \cdot \cos(\varphi_{1,2}), \\ y_{1,2} &= y_c + r \cdot \sin(\varphi_{1,2}), \end{aligned} \quad (68)$$

при чему је:

- растојање између тачке Р и центра кружнице С:

$$d = [(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2]^{1/2};$$

- померај угаоног отклона између правца РС и тангенте:

$$\theta = \arccos(r/d);$$

- основни угао правца РС:

$$\alpha = \arctan 2(y_p - y_c, x_p - x_c);$$

- углови тангентних права:

$$\varphi_1 = \alpha + \theta, \varphi_2 = \alpha - \theta.$$

Овај поступак израчунава тачке додира тако што:

1. дефинише правац од тачке до центра,
2. израчунава угао између тог правца и тангенти,
3. користи угао и полупречник да одреди координате тачака на кружници у којима те тангенте дотичу кружницу.

Како се као резултат овог поступка добијају две математички исправне тангентне тачке, неопходно је спровести додатни корак идентификације „праве“ тачке додира, која ће бити искоришћена за конструкцију заокрета, односно дефиницију одговарајућег полигона.

У оквиру овог корака бира се она тачка која има геометријску повезаност са претходним тачкама у оквиру низа за формирање полигона, односно тачка са спољне стране или са „леве“ стране заокрета (у случају десног заокрета).

10.3. Софтверска платформа

За потребе развоја математичког модела, који укључује унос управљачких променљивих, дефинисање параметара, прорачун тачака заштитног простора процедуре, као и прорачун излазних променљивих искоришћено је радно окружење програмског алата Microsoft Excel.

Овај алат пружа знатне могућности по питању управљања великим скуповима података, омогућујући њихову једноставну организацију, манипулацију и анализу. Уграђене функције које подржавају спровођење статистичке обраде и визуализације података и њихово математичко прорачунавање, препоручују примену овог алата за инжењерске и оптимизационе проблеме, који обухватају анализу комплексних скупова података и моделирање.

Ове карактеристике омогућавају једноставну употребу и размену података и резултата, што за последицу има олакшану сарадњу на пословима развоја модела, уочавања грешака и провере резултата. Додатна особина овог алата, која је искоришћена за потребе овог рада, јесте интеграција са програмским језиком Microsoft Visual Basic for Applications (VBA). VBA је искоришћен за развој алгорита претраге решења, укључујући процесе идентификације препрека и анализе њиховог надвишавања по сегментима.

Једина мана примене VBA јесте нешто мања ефикасност решавања проблема већих димензија у односу на програмске језике из групе тзв. компајлираних (compiled) језика (као што су C, C++, Јава и сл.), чији начин рада обезбеђује извршење програма већом брзином. Ово је и генерално ограничење свих припадника групе тзв. интерпретираних (interpreted) језика, којима припада и VBA, који приликом извршавања инструкција не врше компајлирање програма на машински језик.

Међутим, предности примене VBA, које укључују једноставну употребу и директну повезаности и компатибилност са Excel окружењем су одлучили његову примену у овом истраживању.

Евентуална промена програмског језика биће разматрана у другој итерацији развоја и унапређења модела, која ће бити усмерена и на побољшање ефикасности рада модела.

11. ТЕСТИРАЊЕ И ПРИПРЕМА МОДЕЛА

У оквиру ове фазе моделирања, која подразумева проверу модела експерименталним путем, искоришћени су кораци процеса за верификацију и вредновање, односно валидацију, симулацијског програма и модела из [80]. Иако се наведени кораци односе на симулацијско моделирање, њихова дефиниција допушта ширу примену, која обухвата и модел дефинисан за потребе овог рада.

У том смислу, провера модела обухвата два основна корака:

1. **верификација рачунарског модела** и
2. **валидација концептуалног модела.**

11.1. Верификација модела

Верификацијом се врши провера слагања рачунарског модела (програма) и концептуалног модела, дефинисаног према карактеристикама стварног система [80]. Верификација је спроведена у две фазе:

- 1) при развоју рачунарског модела и
- 2) кроз тестирање исправности рачунарског модела.

11.1.1. Прва фаза - развој

Прва фаза верификације подразумева стварање поверења у модел током читавог процеса његове изградње, путем примене тзв. прилаза са-врха-наниже („top-down“) уз елементе структуралног и модуларног приступа програмирању [80]. Овај приступ у првом кораку подразумева дефинисање главних програмских целина, тј. модула, који су прилагођени структури проблема, а потом и мањих процедура (рутина) које се додају главном костуру модела. На тај начин обезбеђен је систематски приступ моделирању, и могућност постепеног тестирања појединих функција у процесу развоја рачунарског модела.

Рачунарски модел у оквиру овог рада развијен је у складу са два наведена принципа, тако да његова архитектура одговара структури описаног концептуалног модела (видети поглавље 9).

11.1.2. Друга фаза - тестирање

Друга фаза верификације извршена је према основним принципима дефинисаним у методологији описаној у документу [153]. Ови принципи подразумевају проверу основних података, параметара, елемената и критеријума примењених приликом пројектовања процедуре.

Исправност рачунарског модела је тестирана поређењем улазних и излазних вредности, као и графичком провером резултата модела. Поређење је извршено у односу на резултате добијене ручном симулацијом модела, на једноставном примеру генеричке ПСС (Табела 13).

Табела 13. Елементи генеричке ПСС

Елемент ПСС	Вредност	Образложење
Дужина	3000 m	Просечна дужина стандардне ПСС
Оријентација	09/27	Лакша визуелна презентација резултата
Локација GARP	305 m, од краја ПСС	Стандардна вредност [4]
Ширина курса на прагу ПСС	210 m	Стандардна вредност [4]
RDH (reference datum height)	15 m	Стандардна вредност [4]
THR ELEV	0 m	Лакши приказ резултата

Тестирање је урађено са предефинисаним вредностима УП (Табела 15), без активације алгоритма за претрагу решења. Коришћене су вредности параметара и ограничења према општем математичком моделу (видети поглавље 7.2).

Минималне вредности PROC ALT на IAF и MAEF постављене су на 4000 ft и 2000 ft, респективно. Ове вредности представљају улазна ограничења које се дефинишу на почетку извођења модела, и треба да одговарају конкретном оперативном окружењу. У овом случају вредности су изабране као типичне вредности за дефинисану генеричку ПСС и стандардне вредности дужине сегмената процедуре.

Тип дистанце за потребе прорачуна OF је дефинисан као $p = 1$, што указује да су прорачунате оцене девијација од оптималних вредности у OF директно пропорционалне вредностима одступања. Такође, за потребе верификације модела коришћени су подаци о препрекама приказани у наредној табели, која садржи податке о координатама (X и Y) и надморској висини (Z) препрека (Табела 14).

Табела 14. База препрека за верификацију модела

Ознака	X (m)	Y (m)	Z (OBST _{ELEV}) (m)
OBST-01	23500	1315	550
OBST-02	20245	2075	450
OBST-03	16340	4145	450
OBST-04	16650	-5200	600
OBST-05	11580	-845	330
OBST-06	5925	575	280
OBST-07	2000	0	55
OBST-08	-865	-975	200
OBST-09	-5200	-815	250
OBST-10	-7155	1380	290
OBST-11	-10775	-1110	400
OBST-12	-10140	7865	550
OBST-13	-2670	5845	500
OBST-14	3420	10240	700
OBST-15	-970	14795	850

У наставку су приказани резултати тестирања математичког модела, као и исправности елемената пројектовања процедура, који обухватају конструкцију и анализу заштитних простора и номиналне путање.

11.1.2.1. Провера математичког модела

Провера исправности рада математичког модела извршена је поређењем добијених вредности са резултатима ручног прорачуна, према дефинисаним формулама. Резултати прорачуна из модела приказани су у наредној табели (Табела 15).

Приказани подаци потврђују да су за дате УП прорачунате одговарајуће вредности тежинских коефицијената (w_i), као и да је прорачун појединачних критеријумских функција (f_i) и укупне функције циља (OF), од стране рачунарског модела, извршен у складу са постављеним математичким моделом.

На основу изабраних УП модел је генерисао једно решење чије карактеристике су даље тестиране у оквиру ове фазе верификације рачунарског модела. Добијена оцена OF од 29.46

сврстава ово решење у процедуре са средњим нивоом квалитета. Од укупно 17 УП њих 5 има оптималне вредности (подебљане вредности у првом реду доње табеле, испод заглавља).

Табела 15. Провера прорачуна w_i и f_i за дате УП

УП	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
x_i	0	0	2.3	3.3	0.04	4.5	50	215	5.0	2.0	3.3	0	-4.0	125	205	20	346
w_i	3	9	0	6	3	6	6	6	9	3	6	9	1	3	6	9	15
f_i	0	0	0	3.60	1.80	1.50	3.33	3.23	0	1.07	2.43	0	0.55	2.08	4.15	3.00	2.72
OF	29.46																

11.1.2.2. Провера елемената процедуре

Провера елемената процедуре извршена је поређењем вредности добијених у моделу са ручним прорачуном истих елемената, за идентичне улазне податке. За потребе додане провере, применом било које методе пројектовања, довољно је искористити податке из горње табеле уз локацију фикса MAEF ($X = 1940$ m, $Y = 13350$ m) прорачунату од стране модела.

Осим провере прорачуна елемената исти приступ је примењен и за проверу поступка надвишавања препрека. У ту сврху резултати модела, тј. прорачунате тачке заштитних простора приказани су графичким путем. Иако је функционисање свих процеса модела засновано на математичком прорачуну, а не на стварној конструкцији и графичком решавању проблема, овај корак је спроведен да би се омогућила једноставније провера добијених резултата и графичким путем.

У ту сврху, у софтверском пакету AutoCAD⁶ креиран је визуелни приказ процедуре генерисане од стране модела заједно са локацијом препрека.

Проверени су следећи елементи процедуре, заједно са поступком надвишавања препрека (где је примењиво):

- основне димензије заштитних простора,
- прорачун MSD и тачака номиналне путање,
- прорачун конструкције заокрета,
- прорачун МОСА,
- примена SDF,
- прорачун PROC ALT,
- прорачуна висина у MAS,
- прорачун OAS,
- провера прорачуна CG,

а на додатним примерима проверени су и елементи:

- примена бочног прилаза,
- примена измењеног прага,
- примена OCHadj.

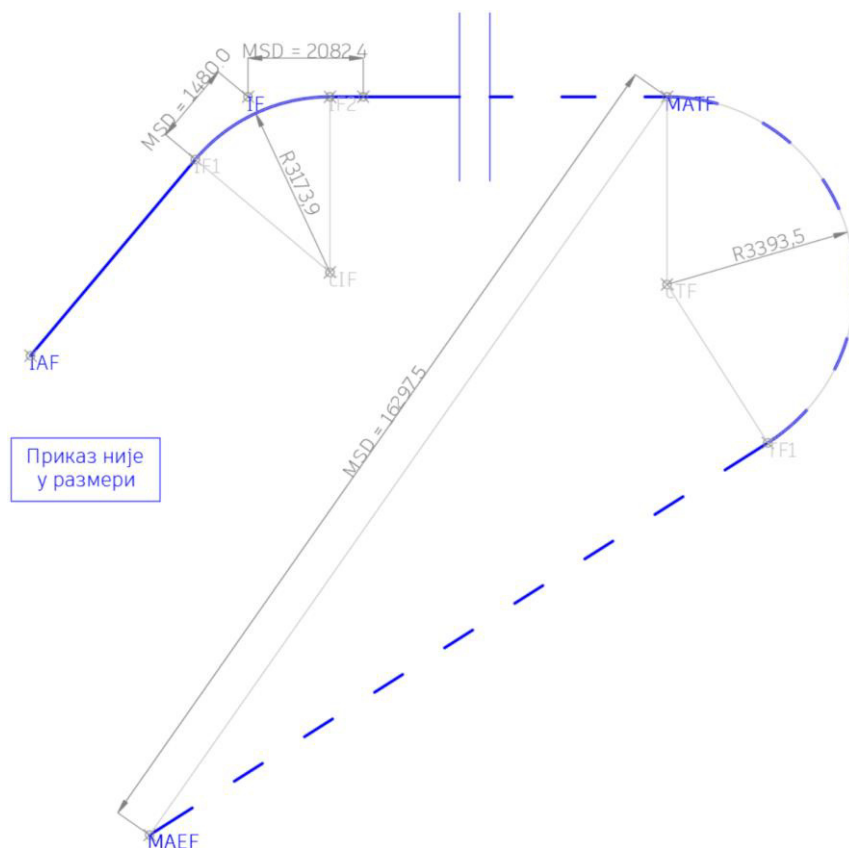
⁶ Коришћена је студентска верзија AutoCAD 2021 софтвера у оквиру бесплатног приступа Autodesk производима за образовне потребе.

Провера прорачуна MSD и номиналне путање

Резултати провере прорачунатих вредности MSD за све парове фиксева, добијених од стране модела и ручним путем, приказани су у наредној табели (Табела 16). Подаци потврђују да је одређено растојање између фиксева адекватно у односу на прописане критеријуме. Слика 57 даје приказ прорачунатих елемената. Објашњење коришћених величина и начин њиховог прорачуна објашњени су у оквиру одељка 5.4 Поступак конструкције процедуре.

Табела 16. Провера прорачуна MSD

Фиксеви	MSD (m) прорачун модела	Ручни прорачун				
		R (°/s)	ALT (ft)	IAS/TAS (kt)	r (m)	MSD (m)
IAF-IF	1480.0	2.18	4000	215/234	3173.9	1480.0
IF-FAP	2082.4	2.18	4000	215/234	3173.9	2082.4
MATF-MAEF	16297.5	1.86	1160	205/214	3393.5	16297.5



Слика 57. Елементи номиналне путање

У случају заокрета на IF, номинална путања је одређена следећим прорачунатим тачкама: IF1 ($x = 18545, y = 1134$), IF2 ($x = 16114, y = 0$), и центром кружнице cIF ($x = 16114, y = 3174$). Вредност MSD је одређена у односу на време успостављања нагиба крила ваздухоплова од $c = 5$ s, и у односу на висину од 4000 ft., која одговара задатој минималној вредности висине на IAF. Пошто заокрет започиње већ у сегменту почетног прилажења, на овај начин изабран је приступ на страни безбедности, који подразумева веће димензије заштитног простора и елемената конструкције процедуре.

Код заокрета на MATF, номинална путања је одређена следећим прорачунатим тачкама: MATF ($x = -7804, y = 0$), TF1 ($x = -9227, y = 6258$), и центром кружнице cTF ($x = -7804, y = 3394$). Вредност MSD је одређена у односу на висину прорачунату на овом фиксу (Табела 21), као и време успостављања нагиба крила ваздухоплова од $c = 10$ s. Поред тога, вредност другог радијуса заокрета ($r2$), дефинисана је као нула, јер је у питању заокрет са директним летом ка фиксу, без прописаног путног угла.

Провера конструкције заокрета

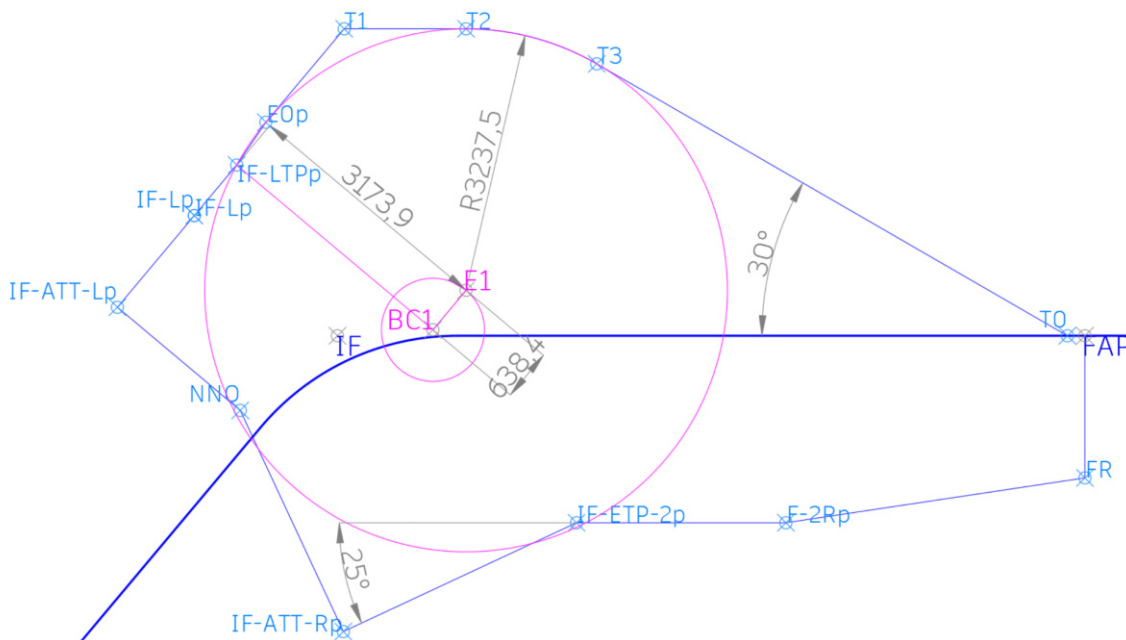
Вредности радијуса заокрета, добијене у претходном кораку, искоришћене су и за проверу елемената конструкције заштитног простора заокрета на фиксевима IF и MATF. Табела 17 даје упоредни приказ резултата добијених од стране модела и применом ручног прорачуна. Слика 58 и Слика 59 представљају графички приказ елемената конструкције ових заокрета у оквиру граница примарног заштитног простора.

Сви елементи су успешно проверени у складу са вредностима добијеним ручним путем, а додатна провера је извршена мерењем на самом графичком приказу прорачунатих елемената. Утврђена усаглашеност резултата је на највишем нивоу. Поред тога, модел је у складу са вредношћу угла заокрета на оба фикса применио одговарајући метод за одређивање граница заштитног простора.

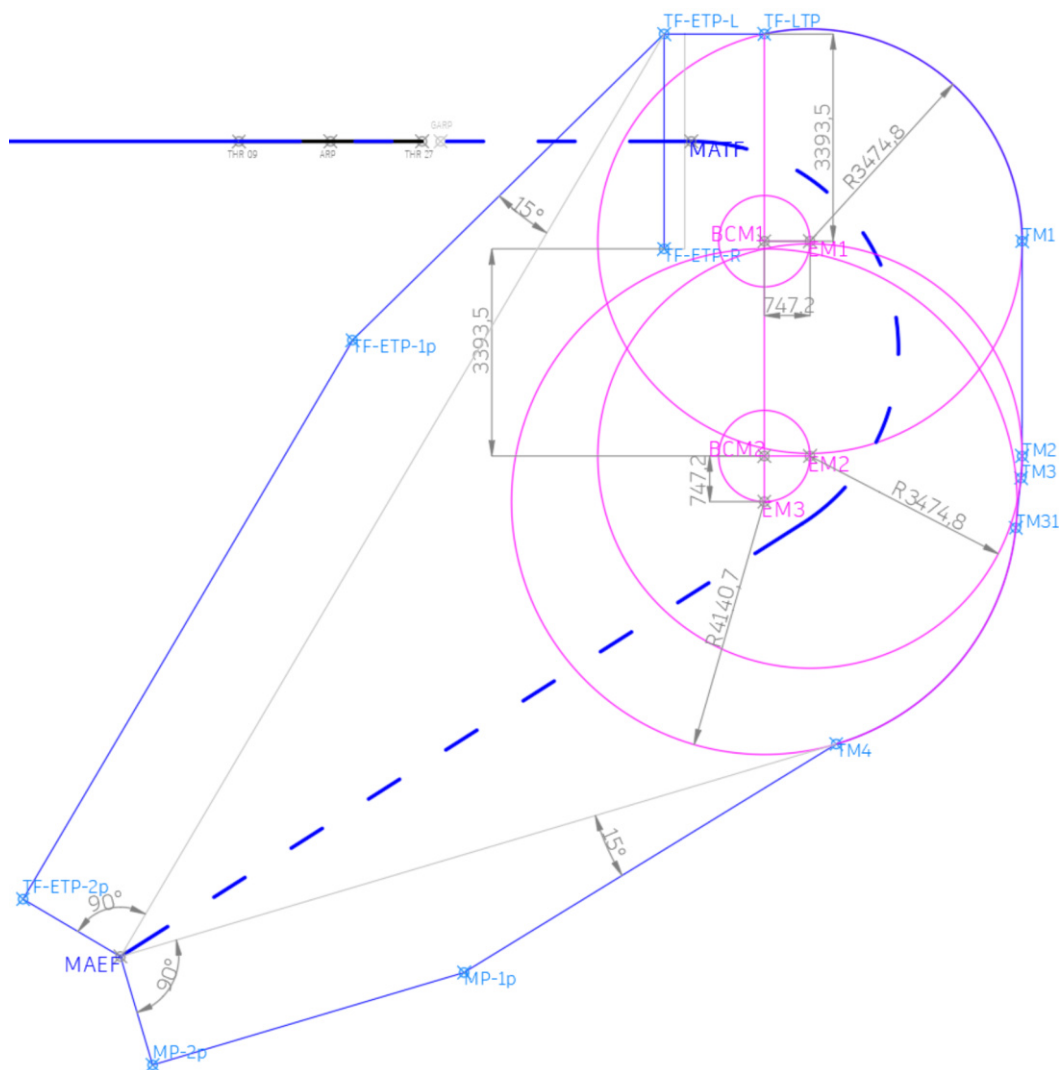
Табела 17. Провера конструкције заокрета

Елемент	Прорачун модела		Ручни прорачун	
	Заокрет на IF	Заокрет на MATF	Заокрет на IF	Заокрет на MATF
E (m)	638.4	747.2	638.4	747.2
$\sqrt{(r^2+E^2)}$ (m)	3237.5	3474.8	3237.5	3474.8
r+E (m)	/	4140.7	/	4140.7
r+2E (m)	/	/	/	/

Код заокрета на IF, помоћне тачке прорачунате за потребу дефинисања геометрије заштитног простора су: BC1 ($x = 16411, y = -74$) и E1 ($x = 16001, y = -563$), док су код заокрета на MATF коришћене следеће помоћне тачке: BCM1 ($x = -8605, y = 1634$), BCM2 ($x = -8605, y = 5153$), EM1 ($x = -9353, y = 1634$), EM2 ($x = -9353, y = 5153$) и EM3 ($x = -8605, y = 5900$).



Слика 58. Конструкција заокрета на IF



Слика 59. Конструкција заокрета на MATF

Провера прорачуна МОСА

Табела 18 даје упоредни приказ прорачуна МОСА вредности, за сегменте почетног и међуприлажења, добијене од стране модела и ручним путем. У сврху бољег поређења, дате су незаокружене вредности резултата, које показују потпуно поклапање добијених вредности за све препреке. Подебљане вредности у табели представљају критичне вредности. Такође, може се констатовати исправна идентификација препрека од стране модела, како у оквиру граница сегмената, тако и у оквиру примарног и секундарног дела заштитног простора (Слика 60 и Слика 61).

Даље, на основу података може се закључити да је модел на правилан начин извршио прорачун МОС вредности за препреке лоциране у секундарном заштитном простору. При томе, вредност Y представља најкраће растојање до ивице примарног заштитног простора, управно на путању летења, док Ws представља ширину секундарног заштитног простора на локацији препреке.

Провера примене SDF

Такође, примена принципа SDF (Табела 19). је извршена према утврђеним правилима, у односу на прорачунате PROC ALT (Табела 20). У наведеним примерима вредност d_o представља растојање до препреке, мерено управно на референтну линију, док $\max OBST_{ELEV}$ представља максимално дозвољену надморску висину на месту посматране препреке, одређену у односу на теоретску раван са нагибом од 15%.

Као последица ове примене на фиксевима IAF и IF, при прорачуну MOCA нису разматране препреке OBST-01, у оквиру сегмента почетног прилажења, и OBST-03, у оквиру сегмента међуприлажења са заокретом, између фиксева IF и SDF (Табела 19). С тога, применом SDF фикса на 2 NM испред FAP, омогућена је усаглашеност вредности MOCA на овом делу сегмента међуприлажења и PROC ALT прорачунате на FAP.

Табела 19. Провера примене принципа SDF

Сегмент	Фикс	Препрека	$OBST_{ELEV}$ (m)	PROC ALT (ft) за претходни сегмент	MOC (m) за претходни сегмент	d_o (m)	$\max OBST_{ELEV}$ (m)
INITIAL	IAF	OBST-01	550	4600	300	2789.6	654
		OBST-02	450			4299.6	427
		OBST-03	450			5224.0	288
INTER	IF	OBST-03	450	3400	300	866.4	607
		OBST-03 ¹	450			2735.6	326
		OBST-04	600			6071.8	-175 ²
	SDF	OBST-05	330	2300	150	1939.6	261

1 Препрека идентификована у сегменту међуприлажења дефинисаног у правцу продужене осе ПСС (без заокрета);
2 Негативна вредност означава да је теоретска раван са нагибом од 15% испод препреке.

Провера прорачуна PROC ALT

Табела 20 приказује резултате провере прорачуна модела по питању добијене вредности PROC ALT на карактеристичним фиксевима. На основу поређења резултата модела и ручно добијених вредности може се закључити да су резултати исправни и задовољавају прописане критеријуме. Поново су приказане и незаокружене вредности, како би се показала прецизност прорачуна рачунарског модела. У табели, вредност TRD одговара стварној дужини путање летења између два фикса. У колони TRD, у заградама су приказани сабирци који дају вредност изнад. Први сабирак представља дужину између два фикса, која се додаје на вредност означену бројем реда у истој колони.

Табела 20. Провера прорачуна PROC ALT

Р. бр.	Фикс	GPA (°)	MOCA (ft) усвојена	PROC ALT (ft) прорачун модела	Ручни прорачун		
					TRD (m)	PROC ALT (ft) незаокружена	PROC ALT (ft)
1.	FAP	3.3°	1600	1600 (1644) ¹	8334.0	1644	1600
2.	SDF	3.3°	2200	2300 (2349) ¹	12038.0 (3704.0 + 1.)	2349	2300
3.	IF	3.3°	2500	3400 (3400) ¹	17498.2 (9164.2 + 1.)	3400	3400
4.	IAF	3.3°	4000 ²	4500 (4547) ¹	23514.0 (6015.8 + 3.)	4547	4500

¹ Незаокружена вредност;
² Висина дефинисана као улазно ограничење модела.

Провера прорачуна висина у MAS

У наредној табели (Табела 21) дати су резултати провере прорачуна позиције SOC, као и висина на фиксима MATF и MAEF у оквиру MAS сегмента. Може се закључити да је модел на правилан начин спровео прорачун свих наведених елемената, у складу са улазним подацима.

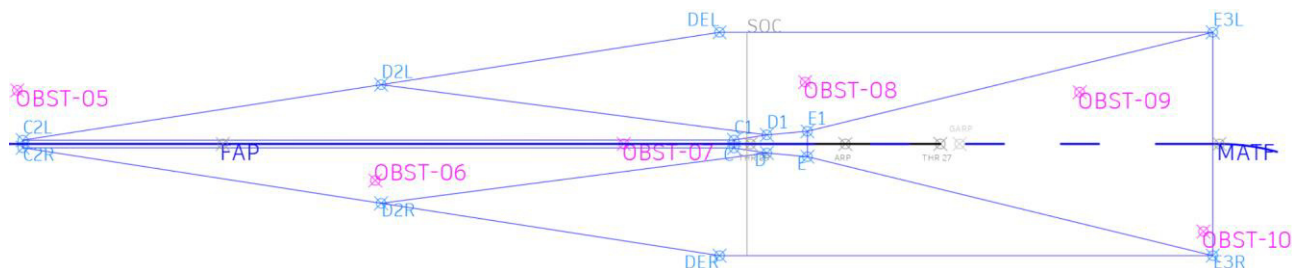
Иако проверене вредности не фигуришу у основним ограничењима модела, представљају међукорак чија тачност је неопходна у циљу правилног одређивања других елемената модела. Из тог разлога, добијене вредности нису заокружене, већ су представљене у виду апсолутне висине (ALT) на датим локацијама. На основу ових резултата могуће је закључити да је модел приликом прорачуна позиције MAEF фикса испоштовао задато улазно ограничење минималне висине у вредности од 2000 ft. Добијена висина на MAEF износи 2929 ft и последица је прорачунате MSD између MATF и MAEF (Табела 16).

Табела 21. Провера прорачуна висина у MAS

Р. бр.	Фикс	CG	ALT (ft) прорачун модела	Ручни прорачун	
				TRD (m)	ALT (ft)
1.	SOC	0.040	181	53.9	181
2.	MATF	0.040	1160	7461.9	1160
3.	MAEF	0.040	2929	13478.5	2929

Провера прорачуна OAS

Слика 62 даје графички приказ пројектованих елемената OAS равни, од стране рачунарског модела. Резултати провере ових елемената приказани су у табели испод (Табела 22).



Слика 62. Сегмент завршног прилажења

Из приложеног се може констатовати највиши степен усаглашености резултата добијених из модела Слика 62 и оних који потичу из PANS-OPS OAS софтвера, развијеног за потребе ICAO, од компаније ENRI [72].

Табела 22. Провера елемената OAS

Елемент		Прорачун модела	Ручни прорачун ¹
OAS Template ²	C (X)	258.15	258.15
	C (Y)	62.53	62.53
	D (X)	-259.36	-259.36
	D (Y)	142.43	142.43
	E (X)	-900.00	-900.00
	E (Y)	200.43	200.43
OAS Constants	W (A)	0.031260	0.031260
	W (B)	0.000000	0.000000
	W (C)	-8.07	-8.07
	X (A)	0.031305	0.031305

	X (B)	0.202765	0.202765
	X (C)	-20.76	-20.76
	Y (A)	0.023673	0.023673
	Y (B)	0.261483	0.261483
	Y (C)	-31.10	-31.10
	Z (A)	-0.040000	-0.040000
	Z (B)	0.000000	0.000000
	Z (C)	-36.00	-36.00
¹ Извор: [72]; ² Тачке C1, D1 и E1 (Слика 62) су пресликане тачке C, D и E у односу на x осу.			

За добијене OAS равни извршена је провера надвишавања препрека (Табела 23). Модел је успешно идентификовао све препреке у латералним границама OAS равни, и на одговарајући начин утврдио препреке које пробијају OAS равни (вредности означене црвеном бојом у табели). У складу са тим резултатима дефинисана је крајња вредност OCH, која је у складу са резултатима из [72] и са прописаним критеријумима.

Табела 23. Провера прорачуна OCH

Сегмент	Препрека	OBST _{ELEV} (m)	OCH (ft) прорачун модела	Ручни прорачун				
				Висина OAS ¹ (m)	ha (m)	HL (m)	OCH (ft)	
PRECISION	OAS XR	OBST-06	280	0 ²	281.3	/	50.3	0 ²
	OAS W	OBST-07	55	346	54.5	/	50.3	346
	OAS YL	OBST-08	200	0 ²	203.4	/	50.3	0 ²
	OAS Z	OBST-09	250	316	172.0	46.0	50.3	316
	OAS Z	OBST-10	290	0 (242) ³	250.2	23.4	50.3	242
¹ Извор: ; ² Препрека не пробија OAS; ³ Препрека се налази у скраћеном OAS, иза линије најранијег заокрета, и не узима се у обзир за одређивање OCH.								

Провера прорачуна CG

Табела 24 и Слика 63 дају приказ проверених и пројектованих елемената у оквиру MAS сегмента. На основу упоредних резултата може се видети да прорачун рачунарског модела у потпуности одговара ручној провери, како по питању идентификованих препрека, тако и по питању прорачунате вредности MOC, у свим деловима заштитног простора.

Такође, утврђивање максималне вредности за CG је извршено на исправан начин и у складу са критеријумима.

Табела 24. Провера прорачуна CG

Сегмент	Препрека	Заштитни простор	CG прорачун модела	Ручни прорачун					
				dz (m)	d (m)	Y (m)	Ws (m)	MOC (m)	CG
MAS	OBST-10	Примарни	0.040	7017.4	191.5	/	/	50	0.040
	OBST-11	Примарни	0.037	7017.4	3811.5	/	/	50	0.037
	OBST-12	Примарни	0.040	7017.4	6882.5	/	/	50	0.040
	OBST-13	Примарни	0.039	7017.4	5926.8	/	/	50	0.039
	OBST-14	Секундарни	0.033	7017.4	13406.6	1005.3	1852.0	22.9	0.033
	OBST-15	Секундарни	0.039	7017.4	14347.4	360.5	788.3	27.1	0.039

Табела 25. Провера трансформације координата за бочни прилаз

Ознака	Оригиначне координате		Трансформисане координате	
	X (m)	Y (m)	X' (m)	Y' (m)
OBST-06	5925	575	5890	758
OBST-07	2000	0	2001	-21
OBST-08	-865	-975	-809	-1145
OBST-09	-5200	-815	-5147	-1212
OBST-10	-7155	1380	-7214	878

Поређењем вредности са графичког приказа и вредности трансформисаних координата (X' и Y') из модела, потврђена је исправност принципа примене и прорачуна елемената бочног прилаза. Резултати провере препрека из модела су такође у складу са очекиваним вредностима.

Табела 26. Провера прорачуна OCH за бочни прилаз

Сегмент		Препрека	OBST _{ELEV} (m)	OCH (ft) прорачун модела	Ручни прорачун			
					Висина OAS ¹ (m)	ha (m)	HL (m)	OCH (ft)
PRECISION	OAS XR	OBST-06	280	0 ²	317.3	/	50.3	0 ²
	OAS W	OBST-07	55	346	54.5	/	50.3	346
	OAS YL	OBST-08	200	0 ²	249.2	/	50.3	0 ²
	OAS Z	OBST-09	250	321	169.9	47.2	50.3	321
	OAS Z	OBST-10	290	238	252.6	22.0	50.3	238

¹ Извор: [72];
² Препрека не пробија OAS.

Критична вредност OCH износи 346 ft (подебљана у горњој табели), и одређена је у односу на све препреке које пробијају OAS равни (означене црвеном бојом у табели).

Међутим, усвојена вредност OCH у моделу износи **572 ft**. Ова вредност је исправна и не зависи од идентификованих препрека, већ је дефинисана висином пресека бочног прилаза и продужене осе стварне ПСС (CPd (z)), по следећем прорачуну:

$$\begin{aligned} \text{OCH} &= \text{CPd} (z) \text{ ft} + 66 \text{ ft} = \text{CPd} \text{ ft} \cdot \text{tg} (\text{GPA}) + \text{RDH} \text{ ft} + 66 \text{ ft}, \\ \text{OCH} &= 7898.95 \cdot 0.05766 + 50 + 66 = 455.45 + 116 = 571.45 \approx 572 \text{ ft}. \end{aligned}$$

Провера примене измештеног прага

Исти принципи трансформације координата примењују се приликом употребе измештеног THR. У тим ситуацијама координате препрека трансформишу се само у односу на x осу, па се измештен THR може сматра специјалним (једноставнијим) случајем бочног прилаза. Провера трансформација координата препрека у односу на праг измештен за 600m дата је у следећој табели (Табела 27).

Табела 27. Провера трансформације координата за измештен THR

Ознака	Оригинале координате		Трансформисане координате	
	X (m)	Y (m)	X' (m)	Y' (m)
OBST-06	5925	575	6525	575
OBST-07	2000	0	2600	0
OBST-08	-865	-975	-265	-975
OBST-09	-5200	-815	-4600	-815
OBST-10	-7155	1380	-6555	1380

Из табеле се види да је померање препрека извршено транслаторно за 600 m у односу на x осу, тако да су препреке које су биле испред THR, након измештања на већем, а оне које су биле иза THR, након измештања на мањем растојању од нове локације THR.

Провера примене OCHadj

У циљу провере примене OCHadj, у следећој табели (Табела 28) приказане су промене вредности SOC и граница домена Tfd, са применом веће вредности OCH. Претпоставка је да би модел са растом OCH требало да омогући раније увођење фикса заокрета, који је дефинисан у односу на локацију SOC. За потребе провере коришћене су оптималне вредности УП, без ангажовања препрека.

Табела 28. Провера прорачуна за различите вредности OCHadj

OCHadj (ft)	OCH (ft)	Earliest Tfd (NM) прорачун модела	Ручни прорачун			
			SOC (X) (NM)	ATT (NM)	Earliest Tfd (NM) незаокружен	Earliest Tfd (NM)
0	200	-0.7	-0.363	0.240	-0.603	-0.7
100	300	-0.3	-0.049	0.240	-0.289	-0.3
200	400	0.0	0.265	0.240	0.025	0
300	500	0.3	0.579	0.240	0.339	0.3
500	600	0.9	1.207	0.240	0.967	0.9

У складу са приказаним резултатима, може се закључити да функција измене OCH испуњава предвиђену намену, узрокујући коректну модификацију домена, односно минималне вредности неопходне за дефинисање заокрета у MAS сегменту.

Према добијеним подацима, свако повећање OCH за 100 ft доводи до померања најраније тачке заокрета за приближно 0.3 NM у односу на THR. Ове вредности се заокружују у складу са усвојеном резолуцијом, односно дефинисаним инкрементима домена, чиме се осигурава конзистентност и прецизност у моделовању процедуре.

11.2. Валидација модела

Валидацијом се врши провера слагања дефинисаног концептуалног модела и стварног система, тј. процеса [80]. У овом случају, посредно користимо и елементе верификованог рачунарског модела. Валидација је спроведена применом структуралног и репликативног вредновања модела, које се темеље на експертској оцени.

Оцена је изведена са два аспекта рада модела. Први аспект се односи на (1) **квалитет рада алгорита** претраге решења, односно оптимизације, и посматран је кроз опште карактеристике његовог понашања. Други аспект се односи на (2) **квалитет и примењивост добијених решења**, и разматран је кроз анализу добијених резултата у односу на постављене оперативне услове и ограничења модела.

Структурално вредновање односи се на испитивање тачности претпоставки на којима се модел темељи [80]. Испитивање тачности обухвата проверу статичких претпоставки модела, као што су логика рада и међузависност деловања елемената модела, али и динамике понашања модела путем нумеричких показатеља, и анализе осетљивости вредности излазних променљивих на мање промене параметара модела [80]. Репликативно вредновање модела обухвата испитивање слагања понашања модела у односу на понашање стварног система, у истим условима, тј. оперативном окружењу.

Валидација је спроведена тестирањем модела кроз четири једноставна сценарија (Sc), са постепеним повећањем сложености проблема, како би се приказало понашање модела у односу на различита оперативна окружења, присутна код реалних примера примене. У оквиру сценарија извршено је испитивање могућности и квалитета генерисања оптималног решења у следећим оперативним условима:

Sc1 - без додатних ограничења (нема препрека),

Sc2 - у средње ограниченим условима (критичне препреке иза THR),

Sc3 - у изразито ограниченим условима (критичне препреке испред и иза THR),

Sc4 - у изразито ограниченим, приближно реалним условима (критичне препреке испред и иза THR, и препреке у заштитном простору процедуре).

Испитивање понашања модела на проблему стварних размера и вредновање репликативних способности модела приказани су у оквиру трећег дела овог рада. Тестирање је извршено на конкретном нумеричком примеру, уз адекватно разматрање и дискусију о добијеним резултатима.

Тестирање је извршено у односу на генеричку ПСС, са идентичним елементима и улазним вредностима као у фази верификације рачунарског модела. У оквиру валидације, коришћен је и додатни скуп података о критичним препрекама, који је приказан у наредној табели (Табела 29). Критичне препреке имају предимензионисану надморску висину (10000 m), и у практичном примеру морају бити избегнуте како би генерисана решења била допустива.

Табела 29. Додатни скуп препрека за валидацију модела

Ознака	X (m)	Y (m)	Z (OBST _{ELEV}) (m)
OBST-16	-9260	0	10000
OBST-17	-9260	2000	10000
OBST-18	-9260	-2000	10000
OBST-19	-7408	-3000	10000
OBST-20	-5556	-4000	10000
OBST-21	23076	2500	10000
OBST-22	23076	-500	10000
OBST-23	21076	-2000	10000

11.2.1. Вредновање рада алгоритма

Вредновање рада алгоритма је спроведено кроз два корака:

- 1) анализу конвергенције алгоритма и
- 2) анализу времена извршавања модела.

Анализа конвергенције алгоритма има за циљ да утврди стабилност и ефикасност претраге оптималног решења кроз итерације, док анализа времена извршавања модела процењује рачунарску сложеност и оперативну изводљивост алгоритма у зависности од његових параметара.

Анализа резултата спроведена је на основу тестирања модела у односу на дефинисане сценарије (Sc1-Sc4). За сценарије Sc1-Sc3 тестирање је реализовано кроз три независна понављања експеримента за одабране конфигурације у оквиру сваког сценарија, како би се потврдила статистичка поузданост добијених резултата. Конфигурација модела означава број вештачких пчела и пролаза напред ангажованих у оквиру поступка претраге решења, односно оптимизације. Ниво сложености примењених конфигурација постепено је повећаван, омогућавајући поређење утицаја повећане сложености на перформансе модела у оквиру различитих сценарија.

Последњи сценарио (Sc4) конципиран је искључиво ради провере добијених карактеристика оптималног решења и процене његове сврсисходности у односу на дефинисана ограничења. За ту потребу, искоришћена је максимална примењена конфигурација модела (10-10), уз једно понављање експеримента, што одговара стандардним условима предвиђеним за практичну примену модела. У свим тестовима, критеријум за заустављање рада алгоритма био је укупан број итерација, који је износио 200.

11.2.1.1. Анализа конвергенције алгоритма

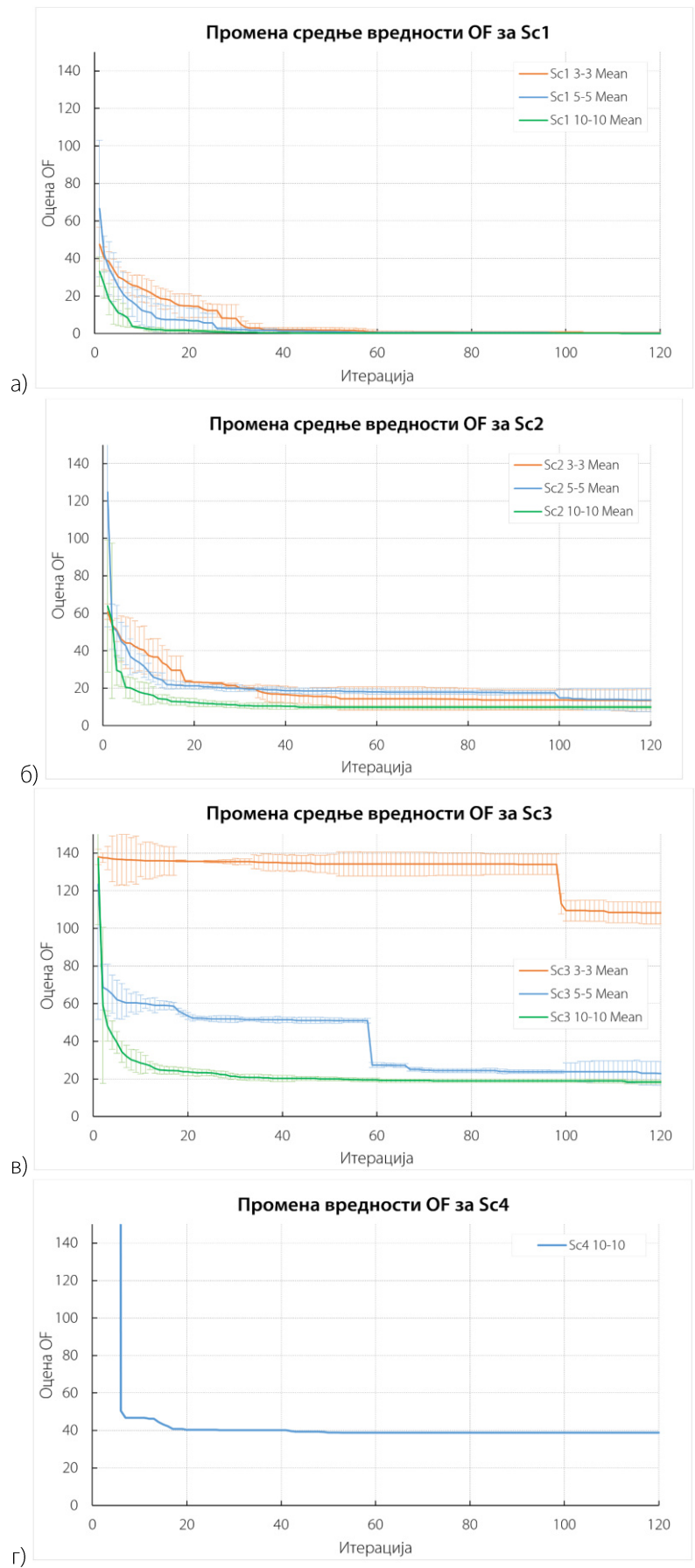
Анализа резултата извршена је са неколико аспеката. Главни аспект анализа представља постигнута најбоља вредности OF по конфигурацијама модела за сваки сценарио. У сврху додатног описа резултата, испитана је и дисперзија добијених вредности OF, укључујући просечну вредност (μ) и стандардно одступање (σ) најбоље оцене OF за сва понављања. Додатно, разматран је и број итерација потребан за достизање оптималне вредности решења, као и додатне статистичке мере, које описују поузданост излазних података.

Добијени резултати приказани су у наредној табели (Табела 30). За сваки сценарио наведена је конфигурација модела примењена током тестирања, укључујући број вештачких пчела и број пролаза напред. Поред тога, у табели је приказан и укупан број коришћених препрека у процесу тестирања.

Табела 30. Резултати валидације модела - оцена OF

Sc	Бр. пчела - пролаза	Број препрека	Мин. најбоља оцена OF	Најбоља оцена OF ($\mu \pm \sigma$)	SE	95% CI	Итер. са најбољом оценом OF ($\mu \pm \sigma$)	
Sc1	Sc-1-1	3 - 3	0	0.00	0.00 ± 0.00	0	(0.0, 0.0)	160 ± 39
	Sc-1-2	5 - 5		0.00	0.00 ± 0.00	0	(0.0, 0.0)	132 ± 7
	Sc-1-3	10 - 10		0.00	0.00 ± 0.00	0	(0.0, 0.0)	70 ± 38
Sc2	Sc-2-1	3 - 3	5 (од OBST-16 до OBST-20)	9.21	13.35 ± 5.85	3.4	/	154 ± 28
	Sc-2-2	5 - 5		8.76	9.67 ± 1.28	0.7	(12.8, 6.5)	171 ± 14
	Sc-2-3	10 - 10		8.67	9.79 ± 0.99	0.6	(12.2, 7.3)	68 ± 49
Sc3	Sc-3-1	3 - 3	8 (од OBST-16 до OBST-23)	21.04	107.37 ± 89.70	51.8	(330.2, -115.5)	192 ± 2
	Sc-3-2	5 - 5		16.65	21.43 ± 6.21	3.6	(36.9, 6.0)	164 ± 27
	Sc-3-3	10 - 10		16.16	17.75 ± 1.77	1.0	(22.2, 13.3)	152 ± 24
Sc4	10 - 10	23 (од OBST-01 до OBST-23)	38.80	/	/	/	53	

Поред табеларног прегледа резултата, приказана је и графичка анализа промене просечне вредности оцене OF (са стандардном девијацијом) по конфигурацији и сценарију (Слика 65).



Слика 65. Резултати тестирања конвергенције алгоритма по сценаријима

У циљу лакшег поређења резултата извршена су одређена прилагођавања добијених података.

У том контексту, како би се смањиле вредности вештачки креиране дисперзије података, у итерацијама када модел није успео да пронађе допустиво решење, све вредности OF веће од 1000 нормализоване су дељењем са 10. Такође, из истог разлога, нису узети у обзир случајеви када модел у једном од три понављања није успео да пронађе ни једно допустиво решење. То је био случај са Sc2-1 у трећем понављању, које је на крају одстрањено из скупа решења. Посебна ситуација је забележена у оквиру Sc3-1, где су вредности крајње OF износиле преко 1000, односно 2000, у првом и трећем понављању, респективно. Ови резултати нису изузети јер осликавају доминантно понашање модела (2/3 решења).

Додатно, услед ограниченог броја понављања експеримената, прорачун стандардног одступања извршен је на основу узорка, а не целокупне популације. У складу са тим, уместо укупног броја понављања ($n = 3$), примењен је кориговани број ($n - 1 = 2$), како би се обезбедила непристрасна процена [154]. Извод дела необрађених података који садрже резултате рада модела дати су у Прилогу 7.

За разлику од прва три сценарија, анализа сценарија Sc4 извршена је на основу једног понављања експеримента, тако да за њега нису приложени додатни статистички показатељи.

Посматрано кроз различите сценарије и конфигурације модела, може се закључити да модел показује стабилно понашање и да тежи оптималној вредности OF, односно нули. Са повећањем комплексности оперативног окружења, односно оптерећења модела кроз увећање броја препрека, вредност достигнутог оптималног решења расте (квалитет опада) кроз сценарије. Међутим, истовремено, резултати указују на позитивне ефекте повећања броја агената и броја пролаза напред алгоритма у оквиру одређених конфигурација модела.

Процес достизања оптималних решења у моделу одвија се постепеним побољшањем резултата кроз итерације, у складу са принципима конвергенције карактеристичним за метахеуристичке алгоритме. Ново решење се прихвата само у случајевима када доводи до побољшања, односно када у поступку минимизације резултира нижом вредношћу OF.

Анализа свих спроведених тестова указује на то да модел у вишим конфигурацијама брже конвергира ка оптималном, односно најбољем решењу. У већини случајева, ова конвергенција је стабилног карактера и постиже се знатно пре 100. итерације. Изузетак представља Sc3, где је просечан број итерација неопходан за достизање најбољег решења нешто изнад 150. итерације. Ипак, због стохастичке природе оптимизационог алгоритма, већ у оквиру Sc4 може се уочити да резултати тестирања на основу три понављања експеримента не морају увек бити у потпуности тачни. У општем случају, приметне су мање варијације у низу итерација које претходе завршетку рада модела, што указује на његову стабилност.

Иако стохастички процеси садрже изражене пробабилистичке елементе, графичка анализа резултата показује присуство позитивне законитости у квалитету рада модела. Варијабилност резултата, иако заснована на малом броју понављања експеримената, у случају виших конфигурација модела омогућава добијање статистички значајних података у погледу дисперзије излазних решења.

Ниске (блиске нули) и позитивне вредности оптималних решења, као и мали број понављања експеримента, понекад представљају ограничење за примену одређених статистичких мера, као што су коефицијент варијације (coefficient of variation - CV) или стандардна грешка (standard error - SE). Међутим, у случајевима виших конфигурација модела и већих вредности OF за допустива решења, ове статистичке мере могу бити успешно примењене и интерпретиране.

Из тог разлога у табели са резултатима су приказане и добијене вредности SE и са њом повезаног интервала поузданости (confidence interval - CI). И док, SE мери прецизност процене средње вредности узорка у односу на популацију, CI даје опсег вредности у којем се очекује да се налази права популациона вредност са изабраним степеном поузданости, у овом случају 95% [154].

SE је прорачуната према формули [155]:

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad n = 3 \quad (69)$$

где n представља број понављања експеримента.

За прорачун CI за мали број понављања експеримента искоришћена је студентова t -расподела, са степеном слободе 2 ($\nu = n-1$). За 95% поверења, ова вредност износи $t = 4.303$, тако да се прорачун CI врши по следећој формули [155]:

$$CI = \mu \pm t \cdot SE \quad (70)$$

У сценаријима са најнижом конфигурацијом модела забележене су веће вредности SE, што указује на значајну несигурност у процени просечне вредности. Најкритичнији случај је Sc3-1, који као последицу има најшири CI. Овај интервал чак укључује и негативне вредности, које нису могуће у оквиру модела, што додатно потврђује висок ниво непоузданости резултата.

Ови налази указују на потребу за већим бројем понављања експеримента у овој конфигурацији како би се смањила несигурност процене и обезбедила поузданија статистичка анализа резултата.

На основу свих уочених карактеристика модела, може се закључити да је његово понашање у потпуности у складу са очекиваним својствима стохастичких алгоритама. Због насумичног избора иницијалног решења и накнадних модификација, свако извршење модела полази од различитих почетних услова, што резултира варијабилношћу у процесу конвергенције. Она не мора увек имати идентичне атрибуте – у појединим случајевима могу се уочити нагли скокови у вредностима OF, док у другим модел може дуже време задржавати исто решење пре него што постигне бољу вредност.

Ова својствена нестабилност представља једно од ограничења примене ове методе за решавање оптимizacionих проблема, јер у неким случајевима захтева вишеструко понављање експеримента како би се пронашло најбоље допустиво решење или потврдила валидност претходно добијеног решења. Алтернативни приступ је коришћење већег броја агената, пролаза и итерација, што може повећати вероватноћу достизања глобалног оптимума. Међутим, ова стратегија може утицати на укупно време извршавања модела, нарочито у случајевима када су димензије проблема велике или када се јављају значајна рачунарска ограничења у процесу генерисања решења.

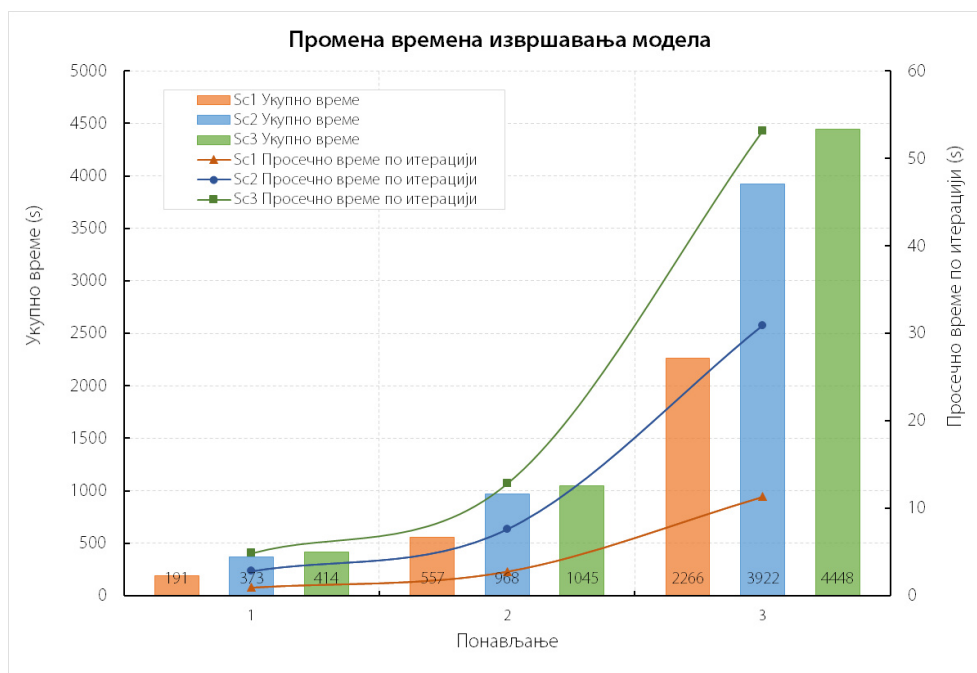
11.2.1.2. Анализа времена извршавања модела

Анализа резултата спроведена је са аспекта укупног времена рада модела, као и времена рада по појединачним итерацијама, посматрано по сценаријима и различитим конфигурацијама модела (Табела 30).

Табела 31. Резултати валидације модела - време рада модела

Sc	Бр. пчела-пролаза	Број препрека	Укупно време (s) ($\mu \pm \sigma$)	SE	95% CI	Време по итер. (s) ($\mu \pm \sigma$)	SE	95% CI	
Sc1	Sc-1-1	3 - 3	0	191 ± 3	1.7	(197.5, 182.7)	0.96 ± 0.03	0	(1.0, 1.0)
	Sc-1-2	5 - 5		557 ± 8	4.2	(574.7, 538.7.0)	2.79 ± 0.09	0	(2.8, 2.7)
	Sc-1-3	10 - 10		2266 ± 25	14.2	(2326.2.0, 2203.8)	11.33 ± 0.24	0.2	(12.6, 10.7)
Sc2	Sc-2-1	3 - 3	5 (од OBST-16 до OBST-20)	373 ± 12	6.6	(400.7, 343.8)	1.87 ± 0.06	0	(1.9, 1.8)
	Sc-2-2	5 - 5		968 ± 18	9.9	(1009.8, 924.2)	4.84 ± 0.11	0.1	(5.2, 4.6)
	Sc-2-3	10 - 10		3922 ± 67	38.6	(4088.3, 3755.7)	19.61 ± 0.37	0.6	(22.1, 17.3)
Sc3	Sc-3-1	3 - 3	8 (од OBST-16 до OBST-23)	414 ± 54	30.7	(546.2, -281.8)	2.07 ± 0.18	0.2	(3.0, 1.3)
	Sc-3-2	5 - 5		1045 ± 15	8.2	(1079.7, 1009.1)	5.23 ± 0.11	0.1	(5.5, 5.0)
	Sc-3-3	10 - 10		4448 ± 349	201.3	(5314.0, 3581.8)	22.24 ± 0.94	1.0	(25.9, 17.6)
Sc4	10 - 10	23 (од OBST-01 до OBST-23)	8190	/	/	40.95 ± 1.25	/	/	

Графички приказ промене времена извршавања модела дат је на слици испод (Слика 66).



Слика 66. Резултати тестирања времена извршења модела по сценаријима

На основу утврђене статистичке поузданости може се закључити да модел показује висок степен стабилности по питању времена извршавања, те да је његово понашање у потпуности у складу са очекиваним, посебно у погледу продужења времена рада услед повећања сложености услова експеримента.

Повећање укупног времена рада модела прати експоненцијалан тренд између различитих конфигурација, као и са порастом броја препрека у оквиру сценарија. Ово повећање износи између 2.5 и 2.9 пута при преласку из конфигурације 3-3 у конфигурацију 5-5, док наредни прелазак између конфигурација обично доводи до повећања времена извршавања модела за приближно 4 пута.

Анализом истих конфигурација у различитим сценаријима, значајније разлике уочавају се приликом преласка са Sc1 на Sc2, као и са Sc3 на Sc4. У оба случаја, време извршавања модела повећава се до 2 пута.

Нешто већи степен варијабилности је приметан у вишим конфигурацијама тестираних сценарија, што је видљиво на основу приказаних вредности SE из табеле. Варијабилност расте упоредо са тежином оперативног окружења у сценаријима, и може бити последица повећане рачунарске сложености, као и стохастичког карактера оптимизационог алгорита.

Модел такође показује стабилне карактеристике у погледу промене просечног времена трајања једне итерације. Ови резултати указују на експоненцијално повећање времена рада модела при малом повећању броја препрека, што је значајан аспект који треба узети у обзир у наредним фазама развоја. Будући да се у практичној примени модел може суочити са знатно већим скупом препрека, неопходно је размотрити начине за унапређење његовог извршавања.

Сви добијени резултати указују на то да је тзв. „временски трошак“ модела изузетно стабилан, уз низак ниво варијабилности. Ова стабилност додатно је потврђена нижим вредностима стандардног одступања мерених временских параметара.

11.2.2. Вредновање квалитета решења

За потребе валидације модела разматрана су решења са најнижом оценом добијеном у сваком тестираном сценарију. За сва решења је карактеристично да су генерисана у оквиру највише конфигурације рада модела, која подразумева ангажовање 10 пчела и 10 пролаза напред алгоритма, у оквиру једне итерације (10-10).

Вектори посматраних решења приказани су у табели испод (Табела 32), док су графичке репрезентације истих дате на следећим сликама: Слика 67, Слика 68, Слика 69 и Слика 70, за сценарије Sc1, Sc2, Sc3 и Sc4, респективно.

Вредновање квалитета добијених решења је пре свега извршено са аспекта резултатује геометрије и усвојених атрибута решења, у односу на задате улазне параметре и ограничења модела. Провера усаглашености решења са критеријумима пројектовања процедура и надвишавањем препрека извршени су у фази верификације модела, и не представљају део процене разматране у овом поглављу.

Табела 32. Вектори најбољих решења валидације модела

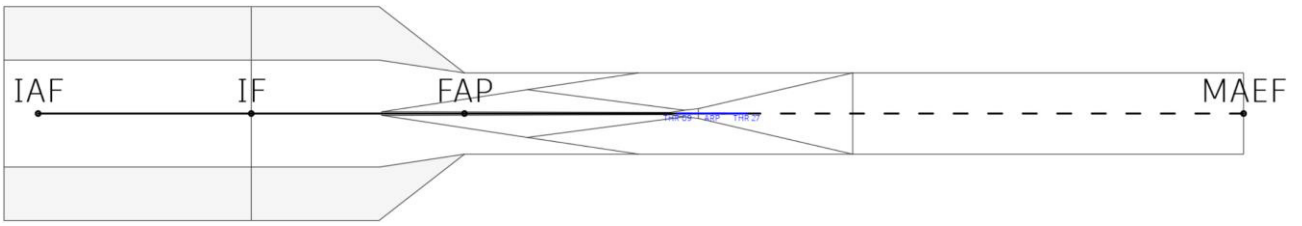
Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
Sc1	0	0	2.3	3.0	0.025	5.0	0	250	5.0	0	5.0	0	-8.0	0	250	15	200
Sc2	0	0	2.3	3.0	0.025	5.0	0	250	5.0	0	5.0	0	-1.0	55	250	20	200
Sc3	0	0	2.3	3.0	0.027	4.0	65	250	5.0	0	5.0	0	-1.1	55	250	20	200
Sc4	0	2.0	0.9	3.1	0.040	4.6	45	250	3.9	2.0	3.2	0	-1.4	40	205	15	413

Из табеле се види постепена деградација решења кроз сценарије, која почиње од теоретски оптималног решења у Sc1 (OF = 0), где су све вредности УП оптималне, до решења у Sc4 (OF = 38.8), где су само четири вредности УП оптималне. Деградација квалитета решења директно кореспондира са вештачки постављеним оперативним условима (у погледу тежине ограничења), који су дефинисани просторним распоредом и бројем препрека.

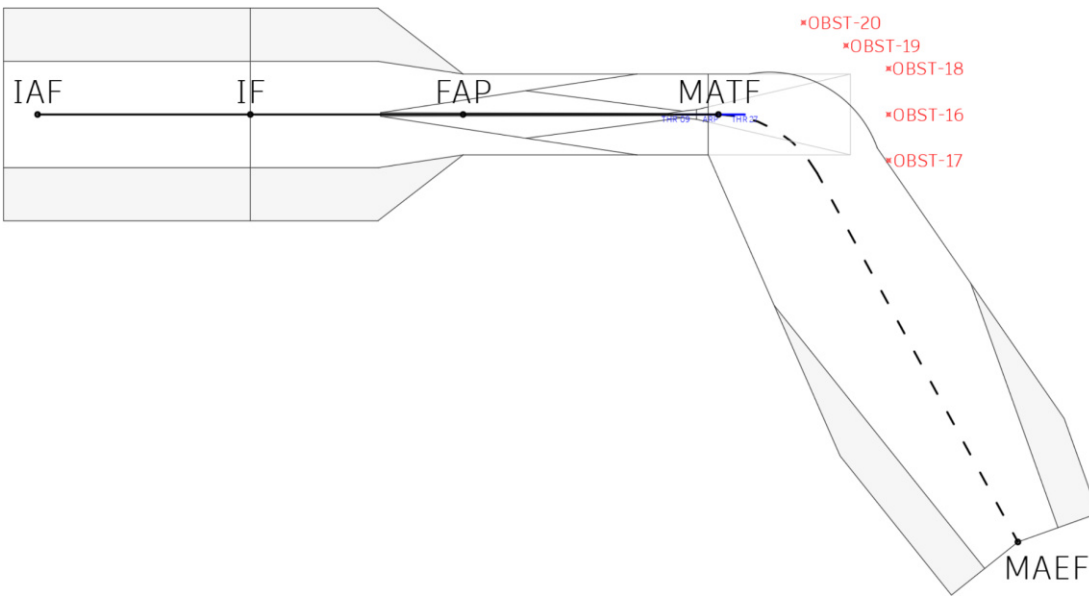
У сценарију **Sc1**, оперативно окружење је без препрека, што је омогућило моделу да генерише решење са најнижим могућим степеном комплексности и најмањом вредношћу ОЧН, у складу са иницијалним претпоставкама приликом конфигурирања модела. Као што је приказано, резултирајућа процедура садржи оптималне елементе: нема заокрета, а MAS сегмент има праволинијску геометрију (Слика 67). Ово је стање коме модел природно тежи у ситуацијама када у окружењу не постоје додатна ограничења.

У сценарију **Sc2**, услови рада модела се постепено усложњавају додавањем пет препрека (OBST-16 до OBST-20, означене црвеном бојом, Слика 68) у оперативно окружење процедуре. Критичне препреке, са надморским висинама од 10000 m, лоциране су на растојању од приближно 4 NM иза THR. Основни циљ овог сценарија је испитивање понашања модела у ситуацијама када је потребно генерисати решења уз избегавање одређене баријере, која може симулирати нагли пораст терена. Као што је и очекивано, модел је успешно генерисао оптимално решење у складу са дефинисаним ограничењима. При томе, све карактеристике прилазних сегмената задржане су у складу са најбољим решењем добијеним у сценарију Sc1, док је једино MAS сегмент модификован у циљу избегавања додатних препрека. Овакво понашање модела одговара реалној логици за решавање постављеног изазова.

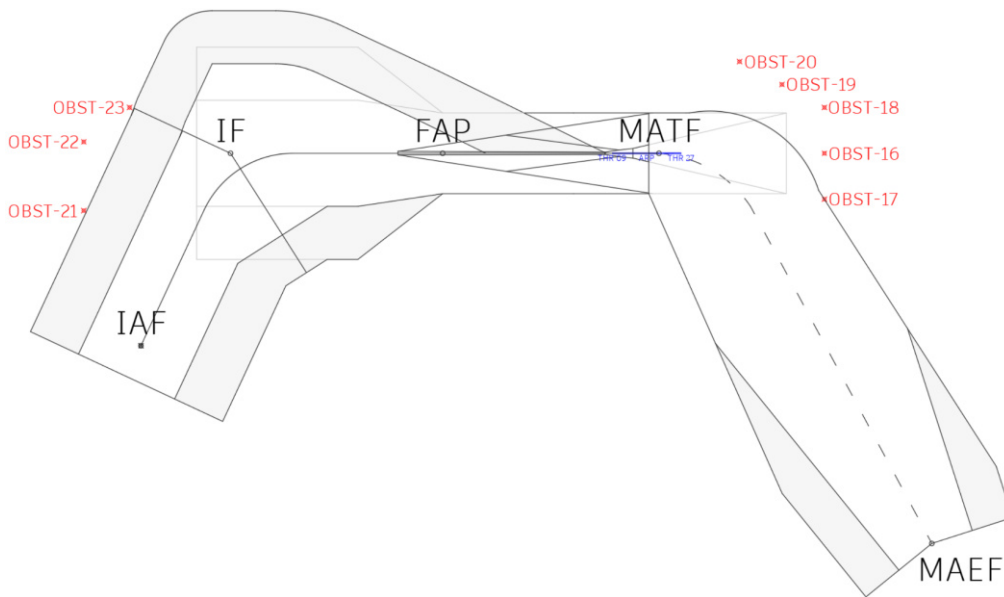
У сценарију **Sc3**, оперативни услови су додатно отежани проширеним скупом препрека (OBST-16 до OBST-23, означене црвеном бојом, Слика 69), са циљем испитивања понашања модела у ситуацијама када је простор за проналажење решења ограничен, укључујући и прилазну страну аеродрома. Као и у претходним случајевима, модел је успешно избегао постављене препреке и, у највећој могућој мери, генерисао решење са оптималним елементима. У овом примеру, услед увођења заокрета на тачки IF, дужина FINAL сегмента је смањена за 1 NM, док су остали параметри углавном задржали оптималне вредности.



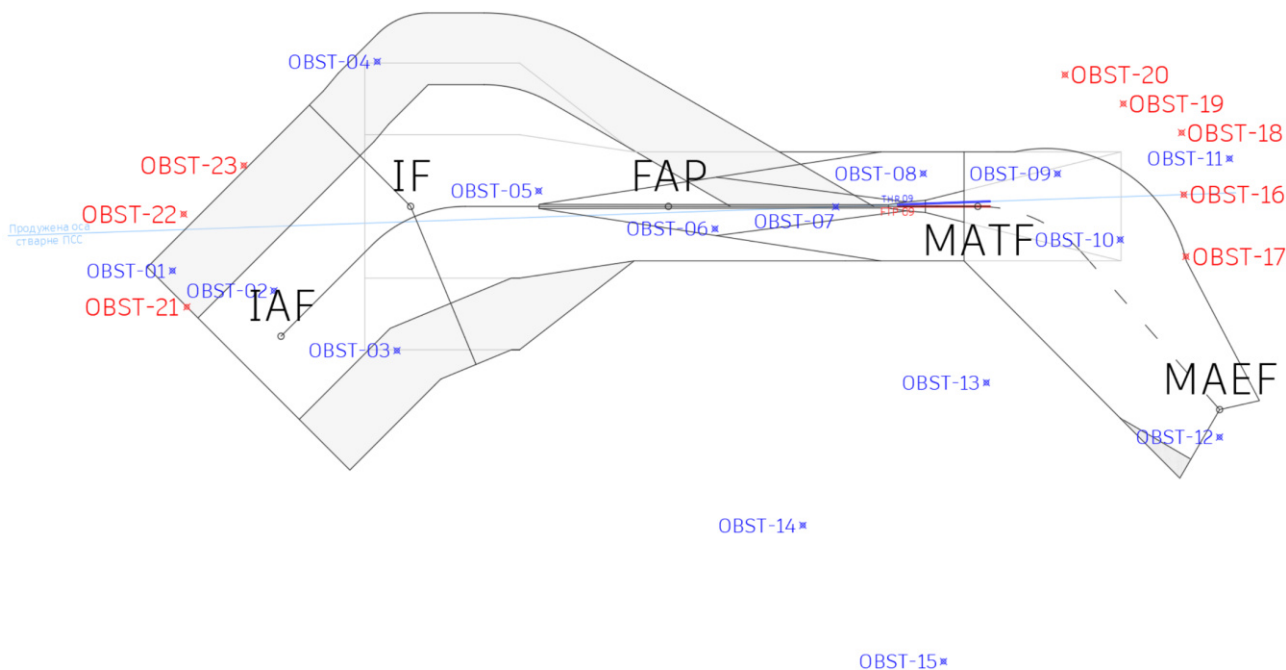
Слика 67. Оптимално решење Sc1 - хоризонтална пројекција



Слика 68. Оптимално решење Sc2 - хоризонтална пројекција



Слика 69. Оптимално решење Sc3 - хоризонтална пројекција



Слика 70. Оптимално решење Sc4 - хоризонтална пројекција

Карактеристично за овај случај јесте да је локација MATF нешто удаљенија од THR у поређењу са сценаријем Sc2 (за приближно 0.1 NM), што резултира нешто већом вредношћу CG (од 2.7%). Овај налаз представља добру индикацију логике модела, који приликом избора бољег решења разматра промену укупне вредности OF, а не изоловано деловање појединачних фактора. Иако сваки фактор има директан утицај кроз додељене тежинске коефицијенте, модел тежи оптималном решењу на основу интегралне анализе свих релевантних параметара.

Овакав приступ је уобичајен у оквиру оптимизационих алгоритама. Међутим, с обзиром на специфичности проблема пројектовања процедура, било би корисно размотрити додатне механизме за евалуацију баланса који модел примењује током конвергенције ка оптималном решењу. Ово би могло допринети бољем усмеравању процеса управљања компромисима између различитих критеријума у процесу оптимизације.

У сценарију **Sc4**, поред препрека које је неопходно избећи, додате су и препреке из примера верификације рачунарског модела (означене плавом бојом, Слика 70), на основу којих ће добијени резултати бити додатно процењени. Циљ ове анализе је испитивање понашања модела у условима изразито отежаног оперативног окружења, где је, поред избегавања баријера, потребно пронаћи компромис у односу на препреке које се не могу избећи.

У ту сврху приказани су и подаци о вертикалним ограничењима решења добијеног у Sc4 (Табела 33) који ће бити упоређени са резултатима из примера верификације (Табела 15). Док пример из верификације модела није садржао препреке OBST-16 до OBST-23, из приложеног графичког приказа (Слика 70) види се да се OBST-12 до OBST-15 налазе ван граница генерисаних заштитних простора. На основу добијених резултата може се закључити да је модел, чак и у сложеним оперативним условима, успешно испунио своју функцију.

У складу са додатним одступањима условљеним присуством препрека унутар граница процедуре, резултујуће решење одражава добар баланс између изабраних вредности УП. У поређењу са резултатима верификационе провере, латерална геометрија добијене процедуре је слична, али са одређеним разликама проузрокованим присуством критичних препрека које је било потребно избећи. Решење у оквиру Sc4 има нижу вредност GPA, док је угао заокрета на MATF знатно мањи и дефинисан на мањем растојању од THR, што је директна последица постављене баријере. Модел је такође на истој локацији поставио SDF, како би осигурао да добијена процедура испуњава услове безбедног надвишавања препрека у INTER сегменту.

Табела 33. Оптимално решење Sc4 - вертикални профил

Сегмент	Препрека	Ограничења	Резултат	
INITIAL	@IAF	/	$PROC_ALT_{IAF} \geq 4000 \text{ ft}$	$PROC_ALT_{IAF} = 4000 \text{ ft}$
	IAF - IF	OBST-01	$MOCA_{OBST-01} = 0 \text{ ft}$	$PROC_ALT_{IF} = 2900 \text{ ft}$
		OBST-02	$MOCA_{OBST-02} = 0 \text{ ft}$	
		OBST-03	$MOCA_{OBST-03} = 2200 \text{ ft}$	
INTER	IF - SDF	OBST-04	$MOCA_{OBST-04} = 2100 \text{ ft}$	$PROC_ALT_{SDF} = 2200 \text{ ft}$
	SDF - FAP	OBST-05	$MOCA_{OBST-05} = 1600 \text{ ft}$	$PROC_ALT_{FAP} = 1600 \text{ ft}$
FAS	OAS XR	OBST-06	$OCH_{OBST-06} = 0 \text{ ft}$	$OCH = 413^1 \text{ ft}$
	OAS W	OBST-07	$OCH_{OBST-07} = 341 \text{ ft}$	
	OAS YL	OBST-08	$OCH_{OBST-08} = 0 \text{ ft}$	
MAS	Initial	/	/	$CG = 4.0 \%$
	Final	OBST-09	$CG_{OBST-09} = 4.0 \%$	
		OBST-10	$CG_{FIN} = 3.5 \%$	
¹ Зависи од тачке пресека CPd.				

Ипак, највећи значај сценарија Sc4 огледа се у доказу апсолутне усаглашености рада модела са задатим оперативним ограничењима. Ова карактеристика најбоље се може уочити анализом удаљености појединих препрека од ивица пројектованог заштитног простора, посебно у случају OBST-17, OBST-21 и OBST-23. Удаљеност ових препрека од граница заштитног простора у најгорем случају износи само неколико десетина метара, што је значајно мање од примењеног дужинског инкремента унутар домена УП (185.2 m). Такође, у поступку „избегавања препрека“, приметно је да је модел ангажовао све расположиве капацитете, чиме је максимално искористио свој оптимизациони потенцијал. Као резултат тога, у коначном решењу је примењен и бочни прилаз, што додатно потврђује флексибилност и адаптивност модела у сложеним оперативним условима.

Овај налаз представља снажан доказ да модел спроводи интензивну претрагу простора решења, те да добијени резултати представљају теоријске крајње границе примене процедура у датим условима

Са друге стране, ова карактеристика модела има и додатну димензију разматрања. При анализи INITIAL сегмента генерисане процедуре, приметно је да се он завршава на веома малом растојању од препреке OBST-21. Иако ова препрека не прелази границе заштитног простора и није узета у обзир приликом провере препрека, што је у складу са предвиђеним радом модела, њено присуство доводи у питање оперативну прихватљивост решења.

Наиме, висина препреке OBST-21 износи 10000 m, што омогућава лаку процену да генерисана процедура, иако формално испуњава све критеријуме допустивости, оперативно није изводљива. Главни проблем лежи у немогућности латералног и вертикалног повезивања тачке IAF са било којим током долазног саобраћаја, услед екстремне висине препреке.

Иако се ова ситуација не може догодити у реалној примени модела, јер овако нагле промене висине терена нису природне, а највише висинске коте су обично окружене изохипсама које би на довољном растојању усмериле претрагу модела у другу област, овај пример наглашава кључну улогу експертског вођења модела. Он показује да, без разумевања оперативног окружења, ниједан алат, ма колико напредан, не може бити у потпуности ефикасан.

11.2.3. Постоптимална анализа

Постоптимална анализа представља значајан аспект сваке студије у области операционих истраживања [51], и често се назива и „шта-ако“ (what-if) анализа, јер се бави испитивањем понашања оптималног решења у случају измене појединих претпоставки или услова функционисања модела. У оквиру овог рада, послоптимална анализа није спроведена као засебан корак, већ су релевантни увиди добијени кроз поступак валидације модела, на основу ког су формулисани кључни закључци.

Послоптимална анализа чини кључни корак у процени стварне ефикасности и примењивости дефинисаног модела, заснованог на метахеуристичкој претрази. У овом поглављу, додатна пажња је посвећена анализи робусности, стабилности, осетљивости и практичне употребљивости добијених решења, уз идентификацију параметара који критично утичу на понашање модела.

Робусност и стабилност модела

Резултати показују да модел исказује стабилно понашање у већини сценарија, нарочито у вишим конфигурацијама (10 пчела и 10 пролаза напред), где се конвергенција остварује раније, са нижом дисперзијом излазних вредности. Овакав налаз указује на:

- способност модела да доследно проналази квалитетна решења,
- бољу отпорност на стохастичке варијације у иницијалним условима и
- адекватну примењивост у условима повећане комплексности.

Упркос томе, у појединим случајевима нижих конфигурација (нпр. Sc3-1), уочена је значајна варијабилност резултата, што указује на повећану осетљивост модела и потенцијалну нестабилност у погледу резултата. Стога се као препорука наметнуло ангажовање већег броја агената или повећање броја понављања експеримената ради побољшања статистичке поузданости.

Важност параметара модела

На основу резултата тестирања модела, уочено је да следећи параметри имају највећи утицај на квалитет и стабилност генерисаних решења:

1. Број вештачких пчела (агената) - виши број пчела значајно умањује дисперзију резултата (стабилнија и поузданија конвергенција) и омогућава квалитетнију претрагу простора решења.
2. Број пролаза напред (forward passes) - повећање пролаза утиче на дубину локалне претраге и омогућава фина подешавања и побољшања решења; у сложенијим условима примене расте осетљивост проналажења квалитетног решења на овај параметар.
3. Број итерација потребних за постизање најбоље вредности - у сценаријима већег оптерећења (нпр. Sc3), број итерација до конвергенције је значајно већи; ово указује на повећану сложеност претраге у таквим условима и критичност овог параметра у управљању временом извршавања модела.
4. Инкремент вредности УП - ниво дискретизације домена зависи од изабраног инкремента између вредности УП; подешавањем инкремента директно се утиче на димензије проблема комбинаторне оптимизације, као и на укупно време рада алгорита - пожељно је да коначан ниво дискретизације УП буде потврђен експерименталним путем за одређену примену модела.
5. Распоред и број препрека у оперативном окружењу - како расте број препрека, модел показује велику осетљивост у погледу деградације оцене OF; ово је очекивано и позитивно понашање модела јер се у оваквим условима скуп допустивих решења смањује.

Као посебна група параметара, који имају критичан карактер са аспекта осетљивости понашања модела и генерисања квалитетних решења, издвојени су **тежински коефицијенти**. У оквиру овог истраживања вредности тежинских коефицијената су емпиријски подешени у фази развоја модела. Коришћена је експертска евалуација решења, у оквиру које је за више комбинација вредности коефицијената „ручним избором“ извршена њихова калибрација и фино подешавање.

Практична примењивост и ограничења

Иако модел успешно испуњава све формалне критеријуме допустивости, у екстремним сценаријима (нпр. Sc4) могу се јавити решења која формално задовољавају услове, али оперативно нису изводљива. У таквим случајевима, доводи се у питање могућност интеграције генерисане процедуре са реалним саобраћајем, чиме се наглашава улога експертске интервенције и знања у финалној процени адекватности решења.

Време рада модела

Анализа времена извршења указује на експоненцијални пораст трајања рада модела са повећањем броја пчела, пролаза и препрека. Ипак, просечно време по итерацији остаје стабилно, што омогућава ефикасно планирање ресурса у реалним применама. Приликом избора конфигурације за практичну примену, неопходно је пронаћи баланс између квалитета решења и рачунарске ефикасности.

Закључак

Посооптимална анализа потврђује да модел:

- доследно проналази квалитетна решења у различитим сценаријима,
- показује добру стабилност при већим конфигурацијама,
- поседује способност адаптације у сложеним оперативним условима.

Истовремено, уочена је осетљивост на параметре конфигурације и структуру сценарија, као и потреба за увођењем додатних механизма за процену оперативне примењивости. Ови налази служе као основа за даљу калибрацију модела и оптимизацију његове примене у реалном систему.

ДЕО IV

ПРИМЕНА МОДЕЛА

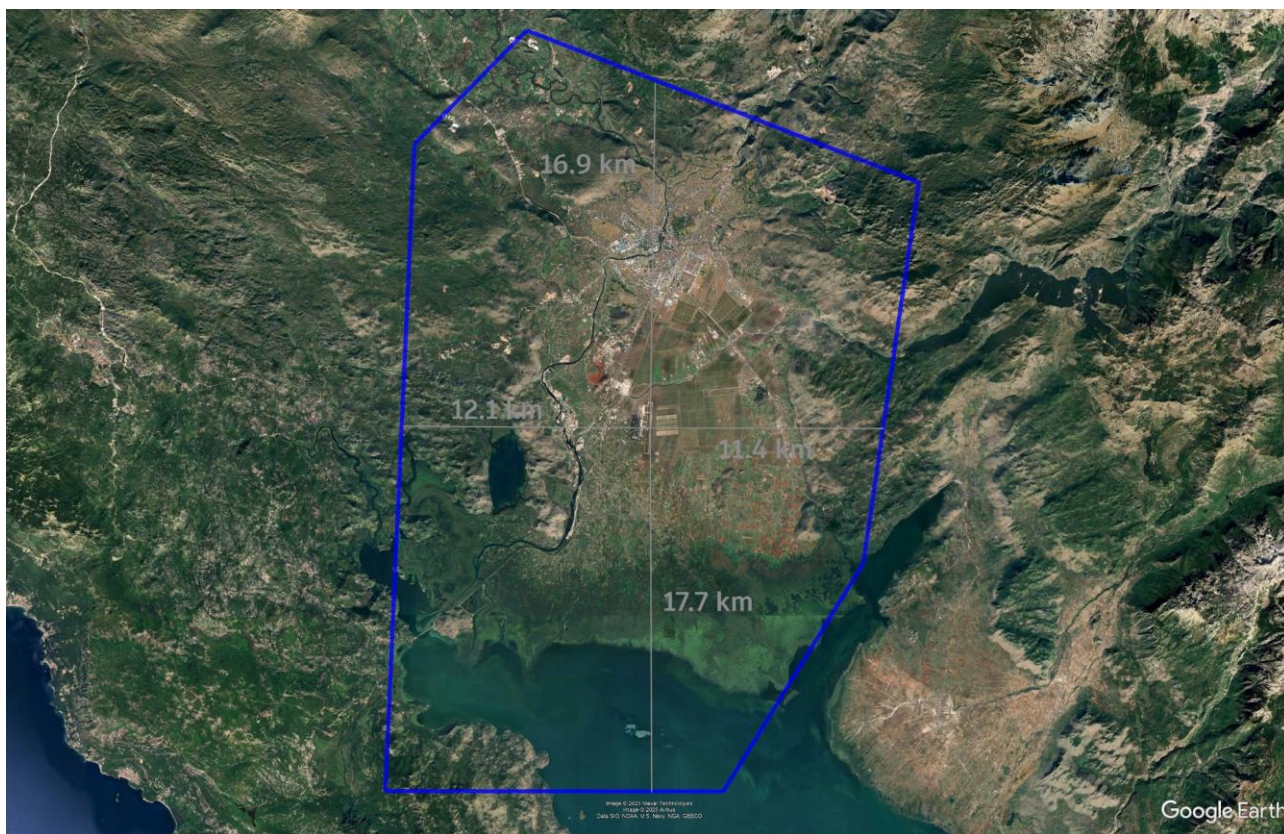


12. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

За потребе тестирања модела у реалном оперативном окружењу, на примеру већих димензија, изабран је Аеродром Подгорица (ИКАО ознака: LYPG). Ова локација је погодна за примену модела због изазовне конфигурације терена и изражених оперативних ограничења, са могућношћу провере различитих оперативних захтева. Оцењено је да би на примеру овог аеродрома, позитивне карактеристике модела и његов допринос могли бити приказани у највећем обиму.

12.1. Аеродром Подгорица - оперативно окружење

LYPG се састоји од једне ПСС, усмерене у правцу север-југ, са ознакама прагова 36/18, респективно. Аеродром је лоциран на централном платоу, који је од југо-запада ка истоку окружен планинским венцима (Слика 71), са висинама врхова од преко 1500 m и 2000 m (Слика 72, извор: [156]). Планински масиви су пресечени долинама река Зете (северо-запад) и Мораче (северо-исток), и омогућавају једине правце приступа за слетање на аеродром. Са јужне и југо-источне стране прилаз аеродрому отворен је према Скадарском језеру, али близина следећег планинског венца (Румија) и близина државне границе Црна Гора – Албанија додатно ограничавају одвијање ваздушног саобраћаја.



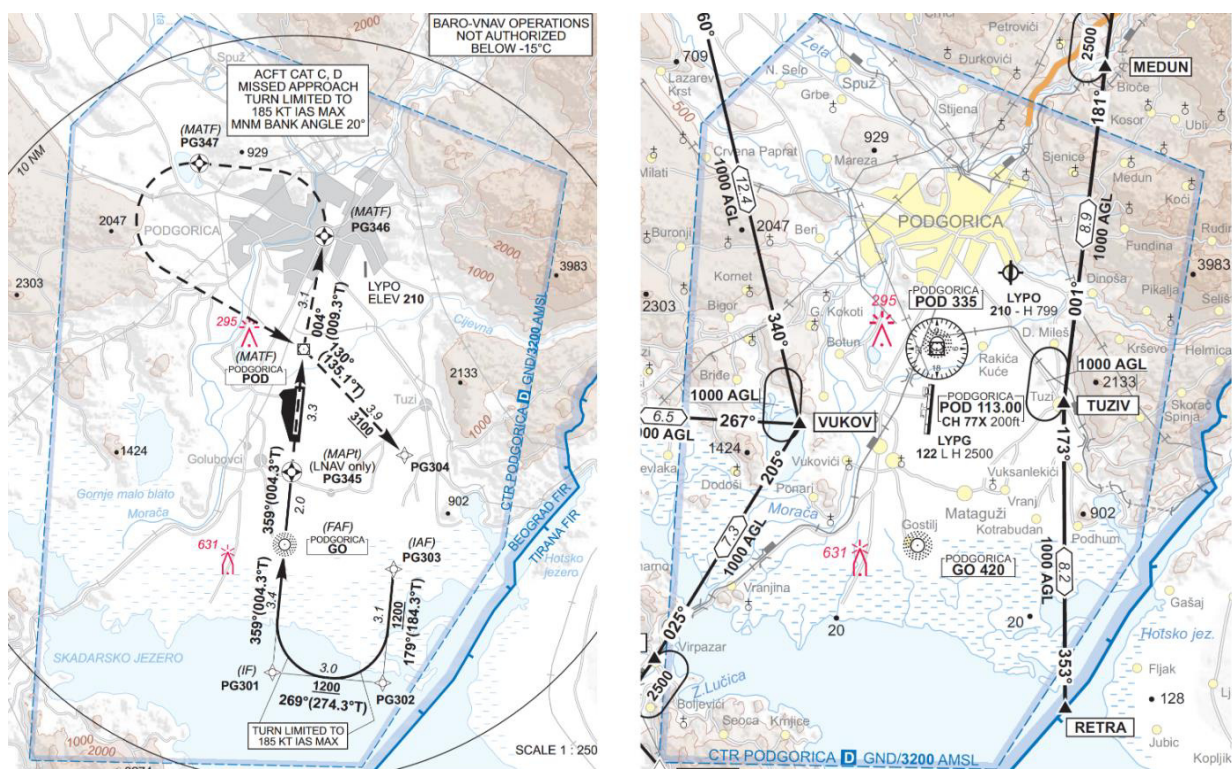
Слика 71. Локација LYPG

Око аеродрома дефинисана је контролисана зона (control zone - CTR), која има скраћени правоугаони облик, приближних димензија 35 x 23 km, мерено у односу на локацију LYPG (Слика 71, плава линија). CTR се простире од земље до горње апсолутне висине од 3200 ft (око 975 m). У оквиру граница CTR дефинисана је класа D ваздушног простора. Обе врсте саобраћаја (IFR и VFR) су дозвољене, с тим што се услуга контроле летења пружа искључиво IFR саобраћају, као и раздвајање IFR од IFR летова, док се о VFR летовима даје саобраћајна информација. У CTR се улази искључиво уз одобрење надлежне јединице контроле летења (ATC clearance), а непрекидна двосмерна радио веза је обавезна приликом обављања свих операција.

Доминантна стаза у употреби - ПСС 36, подразумева доста сложену геометрију процедура за прилаз и слетање, услед изражених висинских ограничења. Заступљени су различити типови IAP, укључујући RNP APCH (до LNAV, LNAV/VNAV и LPV минимума), ILS CAT I прецизни прилаз, као и непрецизни прилаз по VOR и NDB уређајима [156]. Наведене процедуре подразумевају извођење низа захтевних маневара, који су последица краћих сегмената путања, са значајним ограничењима брзина и градијентима понирања, условљеним конфигурацијом терена и лимитираним димензијама ваздушног простора.

Друга стаза - ПСС 18, класификована је као неинструментална. Због ограничења условљених тереном, претходне анализе, углавном извођене ручним методом пројектовања процедура, показале су да имплементација IAP није могућа у стандардним оквирима. Из тог разлога ПСС 18 се користи у веома малом броју случајева слетања, искључиво на захтев летачких посада ваздухоплова, и када владају задовољавајући услови видљивости.

Употреба само једне инструменталне стазе и ограничен маневарски простор доводе до умањење капацитета аеродрома, како у ваздуху, тако и на земљи, што даље утиче на мању искоришћеност аеродрома и генерисања значајног кашњења у току летње сезоне.



а) RNP APCH за ПСС 36

б) Карта за VFR летове

Слика 72. Оперативно окружење LYPG

Описано оперативно окружење условљава организацију и усмеравање целокупног долазног саобраћаја, преко северне стране аеродрома. Операције се обављају уз даље снижавање висине источно од аеродрома, са заокретом под великим углом за јужни прилаз преко Скадарског језера. Оваква ситуација доводи до повећане концентрације ваздухоплова у веома ограниченем ваздушном простору, што у вршним часовима може узроковати веће повећање радног оптерећења, како летачких посада, тако и контролора летења. То све заједно утиче на смањење маргине за било какве оперативне грешке, што ствара додатан притисак на учеснике у саобраћају.

Један од проблема представља и улазак дела заштитног простора IAP у ваздушни простор Албаније, што може захтевати додатну координацију са суседним оперативним јединицама контроле летења, као и додатне административне обавезе приликом стратешког планирања. Такође, у оквиру CTR Подгорица, испод прилазне путање IAP, налази се и летиште Темовско поље (ICAO ознака: LYPO). Услед нижих висина IFR саобраћаја, који прати пројектоване IAP приликом слетања на ПСС 36, и обављања VFR саобраћаја у оквиру CTR-а и по околним VFR

рутама, постоји теоретски ризик од интеракције две врсте саобраћаја у непланираним околностима. Поред тога, издавање одобрења за VFR саобраћај може значајно повећати радно оптерећење контролора летења, поготово у летњим месецима, када је потражња за обе врсте саобраћаја на врхунцу, услед повољних временских услова.

Организација експеримената за тестирање модела спроведена је на начин да се описана оперативна ограничења превазиђу у максималној мери и генеришу адекватне опције за обе ПСС. У ту сврху дефинисан је низ оперативних захтева, који су у виду ограничења математичког модела инкорпорирани у процес претраге и оптимизације најбољих допустивих решења.

12.2. Експеримент

Извршена су два експеримента (Е), за сваку стазу аеродрома по један.

У оквиру првог експеримента (Е1), проверена је способност модела да генерише решење бољег квалитета (нижа вредност OF) у односу на постојећу LPV процедуру за ПСС 36. У оквиру другог експеримента (Е2), проверена је способност модела да генерише бар једно допустиво решење за ПСС 18, које у досадашњим покушајима није идентификовано.

Оба експеримента су извршена у односу на неколико сценарија, који су детаљније размотрени у оквиру поглављу 13. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.

У наставку текста дати су улазни подаци и услови дефинисани за спровођење експеримената.

12.2.1. Улазни подаци

За потребе спровођења експеримената коришћене су две групе улазних података:

- (1) подаци о терену и
- (2) подаци из AIP Srbija/Crna Gora.

(1) Подаци о терену добијени су дигитализацијом топографских карата у AutoCAD алату. У процесу дигитализације идентификовано је више од 10000 висинских кота у ширем подручју аеродрома, које су представљене као препреке. Ове препреке су дефинисане као тачке са координатама израженим у односу на праг ПСС.

Првобитно, координате препрека су дефинисане у односу на THR 36, а накнадном трансформацијом прилагођене су за извођење експеримента у односу на THR 18. У експериментима нису коришћене изохипсе као препреке, с обзиром на то да број, густина и просторна расподела висинских кота обезбеђују довољну репрезентативност ограничења за потребе генерисања решења. Приликом доношења ове одлуке, узети су у обзир и инкременти примењени приликом дефинисања вредности УП. Ту се пре свега мисли на дужинске променљиве, које су дискретизоване са кораком од 0.1 NM, што износи 185.2 m.

- (2) Подаци из AIP подразумевају податке о вештачким препрекама и податке о аеродрому.

Подаци о вештачким препрекама обухватају групу података о аеродромским препрекама (AD 2.10 секција AIP, укупно 58 препрека) и рутним навигационим препрекама (ENR 5.4 секција AIP, укупно 51 препрека). Извршен је исти поступак одређивања и трансформације координата препрека, као у случају висинских кота.

За потребе спровођења експеримента, извршена је додатна селекција препрека, услед чега је укупан број смањен на 3339. Изабране препреке се налазе у теоретској зони генерисања решења, дефинисаном у складу са оперативним захтевима и утврђеним критеријумима пројектовања процедура. У овој зони обухваћене су све препреке на растојању мањем од 34 km у односу на ARP, али и поред редукције, дефинисана зона и даље обухвата знатан део ТМА Подгорица око аеродрома. У овом поступку су из скупа препрека одстрањене све рутне навигационе препреке, јер се налазе ван теоретске зоне.

За даљу употребу, препреке су обједињене у јединствену базу, која садржи основне податке, који укључују координате, надморску висину, ознаку и тип препреке. Због обима ових података у Прилогу 8 дат је приказ извода из табеле препрека, док је целокупна база доступна на упит аутору.

За потребе модела коришћени су следећи подаци о аеродрому (Табела 34), који обухватају основне карактеристике и димензије ПСС:

Табела 34. Подаци о ПСС

ПСС	THR ELEV	Дужина	RDH	GARP-THR растојање	Ширина снопа на THR
36	26 m (85 ft)	2500 m	15 m (50 ft)	2805 m	210 m
18	37 m (122 ft)	2500 m	15 m (50 ft)	2805 m	210 m

12.2.2. Оперативни захтеви

Специфичан скуп оперативних захтева дефинисан је у циљу превазилажења идентификованих ограничења која утичу на организацију и одвијање саобраћаја. Овај скуп обухвата следеће захтеве по питању конструкције решења:

1. ограничења дужина сегмената,
2. ограничења заокрета и
3. висинска ограничења.

Табела 35 даје преглед конкретних оперативних захтева уз образложење њихове примене. Идентификација ових ограничења директно зависи од експертског познавања оперативних потреба у посматраном ваздушном простору и служи да евентуална допушта решења приближи реалној оперативној примени. У том смислу, конципиран је и појам оперативно прихватљиво решење или процедура, који се односи на решење које је изводљиво и у највећој мери одговара стварним оперативним потребама.

Осим ограничења која се односе на минималне висине на одговарајућим фиксевима, а која представљају обавезне улазне параметре модела, остала ограничења су дефинисана, прилагођена и интегрисана у модел у складу са специфичним захтевима овог експеримента. Примена ових ограничења практично подразумева смањење домена УП приликом претраге решења.

Табела 35. Оперативни захтеви

Тип ограничења	Ограничење	Образложење
Дужина сегмента	FAPd \leq 5 NM	Дужине су ограничене због лимитираних димензија ваздушног простора, што је условљено наглим порастом терена у правцу продужене осе ПСС, као и границама CTR-a.
	IFd \leq 5 NM	
	IAFd \leq 3 NM	
	TFd \leq 8 NM (иза THR)	Дужина је ограничена због лимитираних димензија ваздушног простора, што је условљено границама CTR-a и близином државне границе.
Заокрет	TFta \leq 0° (за ПСС 36)	Заокрети су ограничени у циљу избегавања интеракције са VFR саобраћајем на летишту LYPO, као и због димензија CTR-a и близине државне границе.
	TFta \geq 0° (за ПСС 18)	
Висина	minPROC_ALT _{IAF} \geq 3100 ft	Висина је одређена у циљу усаглашавања са ограничењима дужина прилазних сегмената и надморском висином терена у окружењу.
	minPROC_ALT _{MAEF} \geq 3500 ft	Висина је одређена у складу са димензијама CTR-a и близином државне границе, и одговара минималној висини дефинисаној за примену поступка радарског векторисања у околини аеродрома.

Осим минималних висина на IAF и MAEF фиксевима, које су дефинисане као улазни параметар модела, остали захтеви представљају додатна ограничења, специфична за посматрану локацију аеродрома. На основу додатних ограничења спроводи се стручно вођење модела у процесу оптимизације решења, и обезбеђује присуство човека у ланцу одлучивања, што је и основна идеја овог истраживања.

12.2.3. Услови извођења

У складу са резултатима валидације модела, експерименти су извршени у конфигурацији са 10 пчела и 10 пролаза унапред. Услед значајно већих димензија проблема у односу на примере из валидације (преко 3000 препрека у односу на иницијалних 23), у циљу ограничења времена рада модела изабран је укупан број итерација од 100, са једним извршењем.

Овај број је оцењен као довољан да се у датој конфигурацији и при задатим ограничењима пронађе оптимално решење. У том циљу разматране су и различите стратегије оптимизације, које, између осталог, подразумевају фазни приступ проналажењу најбољег решења, по одговарајућим деловима, тј. сегментима процедуре. Примењене стратегије су разрађене у оквиру следећег поглавља.

13. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

13.1. Експеримент 1 - E1: Побољшање процедуре за ПСС 36

За потребе извођења E1 дефинисана су три сценарија:

ScREF - референтни сценарио, разматра постојећу LPV процедуру, апроксимирану и оцењену према развијеном математичком моделу,

Sc1A - сценарио 1A, разматра генерисање решења уз примену датих оперативних захтева и

Sc1B - сценарио 1B, разматра генерисање решења уз примену датих оперативних захтева, са додатним ограничењима заокрета ($TFta \leq -160^\circ$) и висине на MAEF ($PROC_ALT_{MAEF} \geq 3100$ ft), у циљу повећања оперативне прихватљивости решења.

13.1.1. Референтни сценарио

У оквиру ScREF рачунарски модел је употребљен искључиво за добијање оцене OF постојеће LPV CAT I процедуре на ПСС 36. Добијена оцена је даље искоришћена као основа за упоредну анализу са резултатима из модела. Оцена OF је добијена за вредности УП дефинисане према елементима стварне процедуре, како је објављено у [156] (Слика 72, а).

За ову потребу, MAS сегмент постојеће процедуре морао је бити прилагођен елементима математичког модела, како би био описан расположивим УП. Три заокрета су апроксимирана јединственим заокретом на 5.4 NM иза THR, са углом заокрета од 180° , ограничењем брзине од 185 kt и захтеваним већим нагибом крила ваздухоплова, у износу од 20° .

Како модел није развијен да начелно разматра нестандартне елементе процедуре, апроксимацијом постојеће процедуре није у потпуности описан њен нестандартни карактер и сложена структура (нпр. већи број WP у MAS сегменту и нестандартне вредности MSD између њих). Из тог разлога добијена оцена OF је повољнија и у одређеној мери одступа од реалног нивоа комплексности процедуре. И поред те чињенице, резултујућа вредност OF износи 42.00, и спада у категорију решења са ниским степеном квалитета, према дефинисаној скали комплексности процедура. Усвојен вектор решења постојеће процедуре дат је у следећој табели (Табела 36).

Табела 36. Вектор решења E1-ScREF

Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
REF	0	0	2.3	3.2	0.030	3.0	90	185	3.4	0	3.0	0	-5.4	-180	185	20	207

Из табеле се види да само 5 УП од укупно 17 узимају оптималне вредности: THRd, APPta, CPd и OCHadj (подебљане вредности у табели).

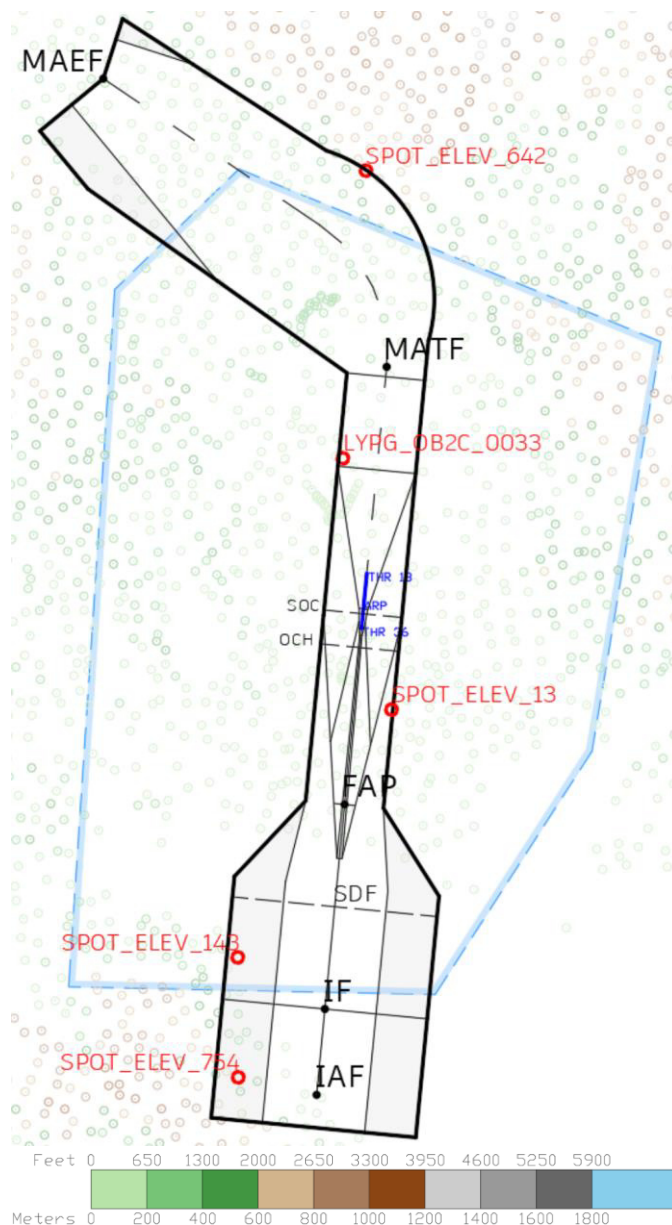
13.1.2. Сценарио 1A

У оквиру Sc1A модел је генерисао 21 прихватљиво решење, с тим да оптимално решење има оцену OF од 5.58 и генерисано је у 46. итерацији. Прво допустиво решење пронађено је одмах у 1. итерацији. Оптимална вредност OCH од 200 ft достигнута је у 12. итерацији. Табела 37 садржи вектор решења, док Слика 73 даје графички приказ хоризонталне пројекције оптималног решења.

Табела 37. Вектор решења E1-Sc1A

Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
1A	0	0	2.3	3.0	0.033	4.3	0	250	5.0	2.5	2.1	0	-6.4	-50	250	15	200

Код генерисаног решења, забележено је укупно 12 УП са оптималном вредношћу, док остали елементи показују релативно мала одступања од оптималних вредности дефинисаних у оквиру поглавља 7.2.1.



Слика 73. Хоризонтални приказ решења E1-Sc1A

Прилазни сегменти генерисане процедуре оријентисани су у правцу продужене осе ПСС, при чему је њихова дужина повољнија у односу на постојећу процедуру. У оквиру сегмента MAS, модел је произвео решење са углом заокрета од 50°, што представља оперативно једноставнији маневар у односу на исти сегмент постојеће процедуре. Осим тога, у предложеном решењу не постоје додатна ограничења у извршењу заокрета.

Вертикална ограничења предложеног решења приказује Табела 38. Најкритичнији сегмент представља INITIAL сегмент процедуре, у оквиру кога кота SPOT_ELEV_754 захтева минималну висину од 3000 ft, што је нешто испод прорачунате вредности PROC ALT на фиксу IF (3100 ft).

У оквиру INTER сегмента и OAS нису пронађене значајне препреке, које захтевају високе вредности PROC ALT и OCH, респективно. Слична ситуација је и у оквиру MAS сегмента, где је усвојена вредност CG од 3.5% условљена захтеваном висином на MAEF, а не препреком (SPOT_ELEV_642 - 3.3%).

Табела 38. Вертикална ограничења решења E1-Sc1A

Сегмент		Препреке				Ограничења	Резултат
		Ознака (Тип)	X (m)	Y (m)	Z (m)		
INITIAL	@IAF	/	/	/	/	PROC_ALT _{IAF} ≥ 3500 ft	PROC_ALT _{IAF} = 3800 ft
	IAF - IF	SPOT_ELEV_754 (Terrain)	20663	-3591	754	MOCA _{INITIAL} = 3000 ft	PROC_ALT _{IF} = 3100 ft
INTER	IF - SDF	SPOT_ELEV_143 (Terrain)	15282	-4131	143	MOCA _{INTER} = 600 ft	PROC_ALT _{SDF} = 2300 ft
	SDF - FAP	SPOT_ELEV_13 (Terrain)	3506	1697	13	MOCA _{SDF} = 600 ft	PROC_ALT _{FAP} = 1500 ft
FAS	OAS	/	/	/	/	/	OCH = 200 ft
MAS	Initial	LYPG_OB2C_0033 (Tower)	-7563	-1572	185	CG _{INIT} = 2.6 %	CG = 3.5 %
	Final	SPOT_ELEV_642 (Terrain)	-20568	-1779	642	CG _{FIN} = 3.3 %	

Анализа генерисане номиналне путање указује да процедура излази ван граница тренутног CTR-а. Из тог разлога, због близине терена, постоји потенцијални ризик од интеракције ваздухоплова са тзв. слојем слободног летења (класа G ваздушног простора), где се може очекивати неконтролисан VFR саобраћај. Иако овај проблем не може бити решаван у току самог пројектовања процедуре, он би требало бити узет у обзир приликом избора решења за имплементацију.

Поред овога, како би се обезбедили услови за континуитет летења и несметан прелазак у наредну фазу лета, неопходно је размотрити и додатне мере адаптације путање за наставак процедуре.

С тим у вези, уважавајући топографске карактеристике околног терена, једно од решења било би продужење MAS сегмента до постојеће путне тачке NIK. На овој позицији, у оквиру процедуре чекања, омогућио би се довољан маневарски простор за безбедно извођење заокрета и постизање потребне висине ваздухоплова. На овај начин осигурао би се повратак у фазу прилаза и слетања уз минималну потребу за додатним корекцијама путање.

Овакав концепт може се сматрати једним од оперативно прихватљивих сценарија, који уважавају постојећа ограничења структуре ваздушног простора и оперативне захтеве. У оквиру предложеног решења, потребно је додатно испитати могућности долазака ваздухоплова на безбедним висинама до локације фикса IAF. Прелиминарна анализа указује на то да су могуће безбедне путање ка овој тачки, преко планинских венаца јужно од језера Скадра, уз примену нешто већих градијената понирања.

У циљу отклањања појединих оперативних ограничења идентификованих код приказаног решења, развијен је додатни сценарио - Sc1B.

13.1.3. Сценарио 1B

За генерисање решења у Sc1B примењена је посебна стратегија претраге, усмерена на унапређење сегмента MAS. Како су прилазни сегменти решења генерисаног у оквиру Sc1A оцењени као адекватни, фокус претраге у Sc1B је преусмерен на оптимизацију MAS сегмента, са циљем отклањања уочених недостатака.

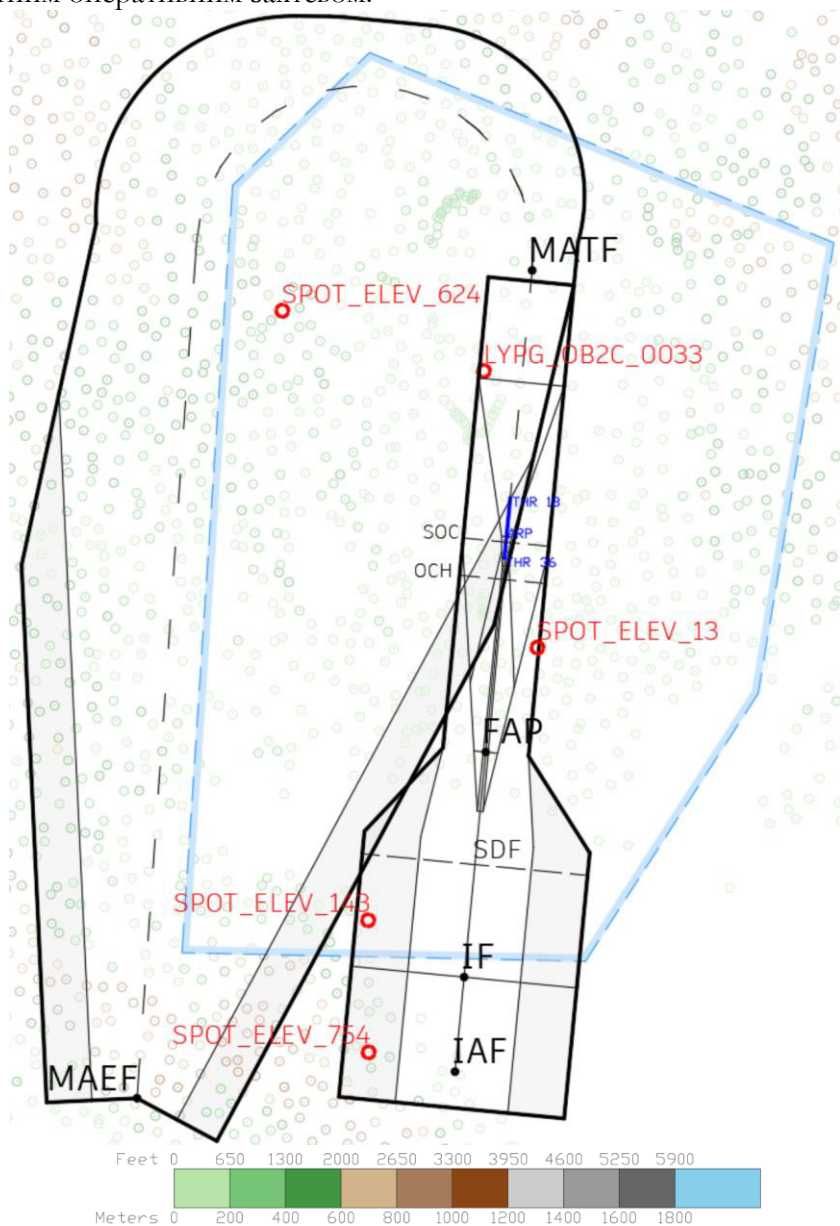
У том контексту, вредности првих 11 УП из решења добијеног у Sc1A су фиксиране, док су преостали УП били предмет оптимизације. Овакав приступ омогућио је очување квалитетних карактеристика прилазних сегмената, уз истовремено проналажење побољшаног решења за MAS, са потенцијално бољом усклађеношћу са оперативним окружењем. У ту сврху, захтеван је заокрет у MAS од најмање 160°, и захтевана висина на MAEF је снижена на 3100 ft, како би био омогућен поновни улазак у почетни сегмент процедуре.

У оквиру Sc1B модел је генерисао 9 прихватљивих решења, с тим да оптимално решење има оцену OF од 7.17 и генерисано је у 32. итерацији. Прво допустиво решење пронађено је одмах у 1. итерацији. Оптимална вредност OCH од 200 ft достигнута је већ у 4. итерацији. Табела 39 садржи вектор решења, док Слика 74 даје графички приказ хоризонталне пројекције оптималног решења.

Табела 39. Вектор решења E1 – Sc1B

Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
1B	0	0	2.3	3.0	0.033	4.3	0	250	5.0	2.5	2.1	0	-6.4	-160	250	15	200

Као и у случају Sc1A, у оквиру вектора решења забележено је 12 оптималних вредности УП. Остали елементи решења, показују мања одступања у односу на оптималне вредности УП и идентични су елементима решења из Sc1A, осим вредности заокрета TFta, који је повећан на 160°, у складу са додатним оперативним захтевом.



Слика 74. Хоризонтални приказ решења E1-Sc1B

Вертикална ограничења предложеног решења приказује Табела 40. Прорачуната ограничења идентична су као код решења добијеног у Sc1A, осим ниже вредности CG, која је последица

препрека (LYPG_OB2C_0033 и SPOT_ELEV_624), а не дефинисане висине на крајњој тачки процедуре.

Табела 40. Вертикална ограничења решења E1-Sc1B

Сегмент		Пребреке				Ограничења	Резултат
		Ознака (Тип)	X (m)	Y (m)	Z (m)		
INITIAL	@IAF	/	/	/	/	PROC_ALT _{IAF} ≥ 3100 ft	PROC_ALT _{IAF} = 3800 ft
	IAF - IF	SPOT_ELEV_754 (Terrain)	20663	-3591	754	MOCA _{INITIAL} = 3000 ft	PROC_ALT _{IF} = 3100 ft
INTER	IF - SDF	SPOT_ELEV_143 (Terrain)	15282	-4131	143	MOCA _{INTER} = 600 ft	PROC_ALT _{SDF} = 2300 ft
	SDF - FAP	SPOT_ELEV_13 (Terrain)	3506	1697	13	MOCA _{SDF} = 600 ft	PROC_ALT _{FAP} = 1500 ft
FAS	OAS	/	/	/	/	/	OCH = 200 ft
MAS	Initial	LYPG_OB2C_0033 (Tower)	-7563	-1572	185	CG _{INIT} = 2.6 %	CG = 3.3 %
	Final	SPOT_ELEV_624 (Terrain)	-9228	-10017	624	CG _{FIN} = 3.3 %	

Анализом графичког приказа генерисане процедуре, као и у случају првог сценарија, утврђено је да номинална путања и заштитни простор MAS излазе ван граница постојећег CTR-а. Додатном провером потврђено је да је увођењем ограничења на брзину у заокрету (нпр. до 230 kt) могуће обезбедити да процедура буде у захтеваним оквирима, а да испуњење оперативних захтева и постигнути степен комплексности операција летења не буду угрожени.

Такође, како би процедура била оперативно прихватљива и функционална потребно је обезбедити везу MAEF са INITIAL, односно INTER сегментом. Овај корак не би требало да представља проблем имајући на уму да су достизањем захтеване висине на MAEF испуњени услови безбедног надвишавања препрека.

13.1.4. Упоредни приказ резултата E1

Према добијеним резултатима (Табела 41), може се закључити да су решења генерисана у оквиру E1 (Sc1A и Sc1B) значајно надмашила постојећу LPV процедуру у погледу укупног квалитета процедуре, чиме је експеримент окончан са позитивним исходом.

Табела 41. Преглед резултата E1

Sc	Оцена OF	Степен квалитета	OCH (ft)
REF	42.00	Низак	207
1A	5.58	Висок	200
1B	7.17	Висок	200

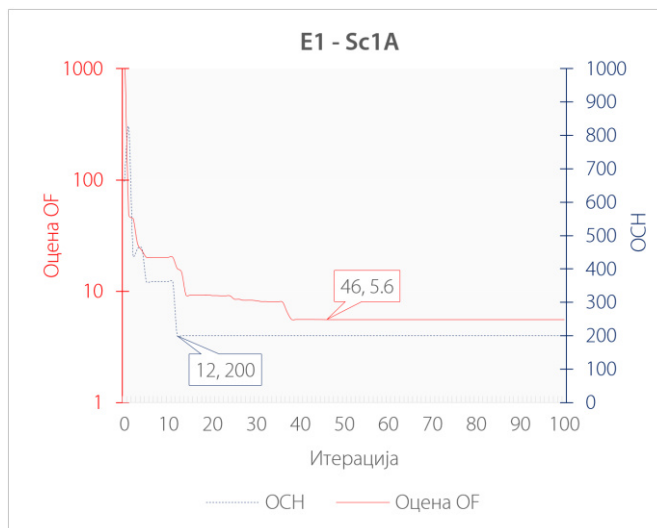
У оба дефинисана сценарија модел је успешно генерисао решења са високим степеном квалитета, уз оптималну вредност OCH и GPA, при чему је примењен мали број ограничења у вредностима УП, уз нешто повећан CG (са тренутних 3.0% на 3.5% у Sc1A, односно 3.3% у Sc1B).

У оквиру Sc1A, почетно прихватљиво решење добијено је у раној фази претраге, након чега је модел наставио конвергенцију ка оптималном, уз генерисање неколико додатних допустивих опција (Слика 75).

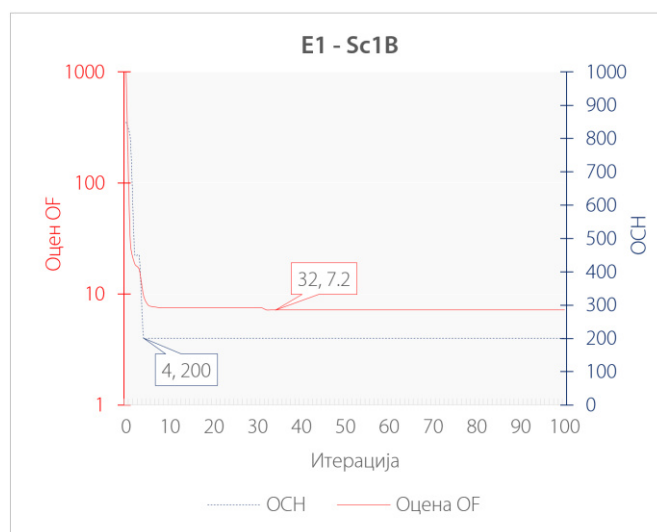
Добијена LPV процедура потврдила је могућност дефинисања стабилизованог прилаза у правцу продужене осе ПСС, са јужне стране аеродрома. Повећана дужина FINAL (са 3 на 4.3 NM) и INTER (са 3.4 на 5 NM) сегмената обезбеђује додатно време летачким посадама за конфигурацију ваздухоплова и оптимизацију вертикалног профила лета.

Међутим, и поред значајно унапређених карактеристика у односу на постојећу процедуру, додатна унапређења решења генерисаног у Sc1A била би неопходна како би се обезбедила одговарајућа континуираност летења након тачке MAEF.

Нека од потребних унапређења имплементирана су у оквиру сценарија Sc1B, у виду додатних оперативних захтева и усмеравањем претраге, односно оптимизације решења на MAS сегмент. Као резултат, добијено решење је у већини елемената идентично оном из Sc1A, и у веома малом износу одступа од претходно добијене вредности OF, али обезбеђује оперативно прихватљивију процедуру. Наравно, због додатно ограниченог простора претраге, конвергенција ка оптималном решењу је доста бржа у другом сценарију (Слика 76).



Слика 75. Понашање модела Е1-Sc1А



Слика 76. Понашање модела Е1-Sc1B

13.2. Експеримент 2 - Е2: Нова процедура за ПСС 18

За потребе извођења Е2 дефинисана су два сценарија:

Sc2A - сценарио 2А, разматра генерисање решења уз примену датих оперативних захтева и

Sc2B - сценарио 2В, разматра генерисање решења уз примену датих оперативних захтева, са додатним ограничењима заокрета ($\Gamma Ft_a \geq 160^\circ$), висине на MAEF ($PROC_ALT_{MAEF} \geq 3100 \text{ ft}$), као и оријентације сегмента почетног прилажења на више од 20° у односу на продужену осу ПСС ($20^\circ \leq \Gamma Ft_a \leq -20^\circ$), у циљу повећања оперативне прихватљивости решења.

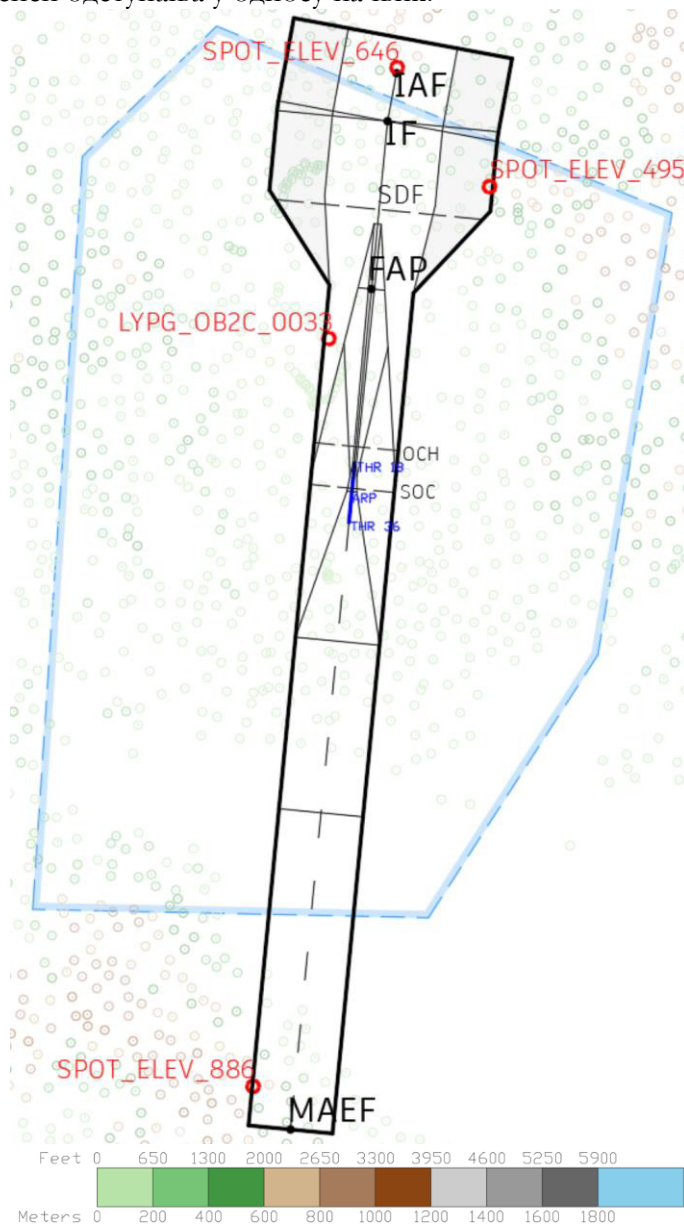
13.2.1. Сценарио 2А

У оквиру Sc2A модел је генерисао 12 прихватљивих решења, с тим да оптимално решење има оцену OF од 26.43 и генерисано је у 85. итерацији. Прво допустиво решење пронађено је у 67. итерацији. Оптимална вредност OCH од 200 ft достигнута је већ у 4. итерацији. Табела 42 садржи вектор решења, док Слика 77 даје графички приказ хоризонталне пројекције оптималног решења.

Табела 42. Вектор решења E2-Sc2A

Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	IFias	TFba	OCH
2A	300	0	2.3	3.5	0.038	4.1	-5	240	3.8	1.8	1.1	0	-8.0	0	250	15	200

Код генерисаног решења, укупно 7 УП има оптималне вредности, док остали елементи показују различити степен одступања у односу на њих.



Слика 77. Хоризонтални приказ решења E2-Sc2A

Прилазни сегменти генерисане процедуре су у најмањем могућем обиму (за 5°) отклоњени у односу на продужену осе ПСС, при чему је њихова дужина довољна за успостављање

стабилизованог прилаза. Такође, остатак процедуре, укључујући и целокупан MAS сегмент, дефинисан је без заокрета, пошто не постоје ограничења препрека.

Вертикална ограничења предложеног решења приказује Табела 43. Најкритичнији сегмент представља INITIAL сегмент процедуре (као и у случају решења из E1), у оквиру кога кога SPOT_ELEV_646 захтева минималну висину од 3100 ft, што је на граници прорачунате вредности PROC ALT на фиксу IF (3100 ft).

Додатно, да би у INITIAL сегменту било обезбеђено адекватно надвишавање препрека за прилаз у правцу, генерисано решење има измењен праг слетања за 300 m, а и примењена је максимална вредност GRA од 3.5°, уз последично повећан градијент понирања са IAF фикса на 6.1%.

У оквиру INTER сегмента и OAS нису пронађене значајне препреке које захтевају високе вредности PROC ALT и OCH, респективно. Слична ситуација је и у оквиру MAS сегмента, где је усвојена вредност CG од 3.8% условљена захтеваном висином на MAEF, а не препреком.

Табела 43. Вертикална ограничења решења E2-Sc2A

Сегмент		Препреке				Ограничења	Резултат
		Ознака (Тип)	X (m)	Y (m)	Z (m)		
INITIAL	@IAF	/	/	/	/	PROC_ALT _{IAF} ≥ 3500 ft	PROC_ALT _{IAF} = 3500 ft
	IAF - IF	SPOT_ELEV_646 (Terrain)	16899	-182	646	MOCA _{INITIAL} = 3100 ft	PROC_ALT _{IF} = 3100 ft
INTER	IF - SDF	SPOT_ELEV_495 (Terrain)	12313	-4497	495	MOCA _{INTER} = 1700 ft	PROC_ALT _{SDF} = 2400 ft
	SDF - FAP	LYPG_OB2C_0033 (Tower)	5363	1572	185	MOCA _{SDF} = 1100 ft	PROC_ALT _{FAP} = 1700 ft
FAS	OAS	/	/	/	/	/	OCH = 200 ft
MAS	Initial	/	/	/	/	/	CG = 3.8 %
	Final	SPOT_ELEV_886 (Terrain)	-26008	1725	886	CG _{FIN} = 3.6 %	

На основу графичког приказа, евидентно је да процедура, у складу са дефинисаним математичким моделом, задржава оптималан облик без уведених заокрета на сегментима. У овом контексту, MAS сегмент је такође конструисан у правцу, при чему се задата висина на последњем фиксу постиже ван граница CTR-а.

У циљу обезбеђења континуитета летења, потребно је размотрити даље повећање висине кроз MAS, имајући у виду присуство виших планинских врхова у окружењу, као и могућност повратка ка INITIAL сегменту.

Додатни изазов представљају изразита висинска ограничења за пројектовање прилазних сегмената, условљене теренским карактеристикама на северу аеродрома. Из тог разлога, поновни повратак на почетни фикс процедуре могућ је једино уз долазак кроз долину реке Мораче, што би захтевало лет из MAS сегмента уз значајно повећање висине и, последично, веће градијенте понирања током преласка у фазу прилаза.

Иако је генерисано решење допустиво и може бити оперативно изводљиво, у циљу отклањања идентификованих ограничења и развоја функционалније процедуре, размотрен је додатни сценарио - Sc2B.

13.2.2. Сценарио 2В

За генерисање решења у сценарију Sc2B, примењени су принципи стратегије претраге коришћени у оквиру експеримента E1, уз одговарајуће прилагођавање методолошког приступа. С обзиром на то да у основном сценарију другог експеримента (E2-Sc2A) није добијено решење са задовољавајућим резултатима, нарочито у контексту оперативне прихватаљивости, процес претраге је настављен кроз побољшање овог решења у две фазе.

У оквиру прве фазе (Sc2B-I), фиксирани су вредности УП из Sc2A које се односе на елементе MAS сегмента пронађеног допустивог решења, и то: CG, OCHadj, TFd, TFta, TFias и TFba. Фиксирањем ових вредности ограничава се простор претраге, чиме је процес усмерен ка прилазним сегментима који су идентификовани као критични. За разлику од приступа који је примењен у сценарију E1-Sc1B, где је оптимизација вршена само над једним делом процедуре, у овом случају примењен је исти принцип, али секвенцијално на два дела процедуре.

У оквиру друге фазе (Sc2B-II), фиксирани су вредности супротних УП, добијених у решењу Sc2B-I, и то: THRd, APPta, CPd, GPA, FAPd, IFta, IFias, IFd, SDFd и IAFd. Оптимизација је извршена над преосталим УП, чиме је генерисано коначно решење које представља најбољу могућу варијанту у контексту извођења експеримента E2.

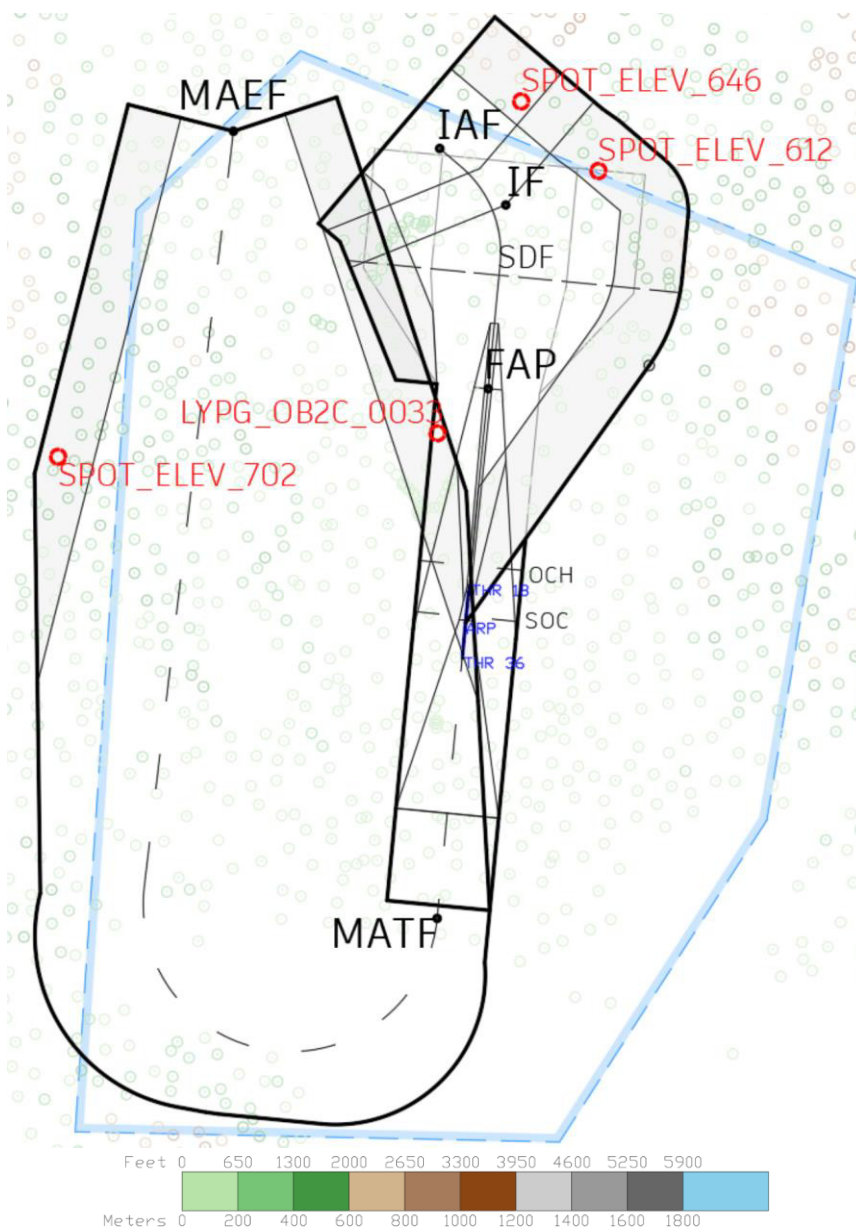
У оквиру Sc2B-I модел је генерисао 12, а у оквиру Sc2B-II 11 прихватаљивих решења, с тим да оптимално решење има оцену OF од 33.57 (генерисано у 57. итерацији) у првом, и 36.95 (генерисано у 37. итерацији) у другом случају. Прво допустиво решење у оба случаја пронађено је у 1. итерацији, као и вредност OCH од 200 ft, што је у складу са примењеном стратегијом оптимизације. Приликом тумачења добијених резултата треба имати на уму примењени двофазни процес оптимизације, који отежава директно поређење резултата између различитих сценарија.

Табела 44 садржи векторе добијених решења, док Слика 78 даје графички приказ хоризонталне пројекције коначног решења добијеног у оквиру Sc2B-II. Вредности означене плавом бојом одговарају оптималним вредностима УП специфичним за сценарио Sc2A.

Табела 44. Вектор решења E2-Sc2B

Sc	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
	THRd	APPta	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	TFd	TFta	TFias	TFba	OCH
2B-I	300	0	2.3	3.5	0.038	3.8	55	240	3.4	2.1	1.6	0	-8.0	0	250	15	200
2B-II	300	0	2.3	3.5	0.025	3.8	55	240	3.4	2.1	1.6	0	-6.0	160	250	20	200

Код коначно усвојеног решења, 6 УП је оптимално, док остали елементи показују различити степен одступања у односу на оптималне вредности.



Слика 78. Хоризонтални приказ решења E2-Sc2B

Вертикална ограничења предложеног решења приказује Табела 45. Прорачуната ограничења слична су као код решења добијеног у Sc2A, с тим да је обезбеђена значајно нижа вредности CG (2.5%). Критични сегменти су такође INITIAL и INTER, чије PROC ALT су идентичне утврђеним МОСА висинама, и захтевају увођење SDF у циљу испуњавања критеријума надвишавања препрека. Остали сегменти немају критичне препреке.

Табела 45. Вертикална ограничења решења E2-Sc2B

Сегмент		Препреке				Ограничења	Резултат
		Ознака (Тип)	X (m)	Y (m)	Z (m)		
INITIAL	@IAF	/	/	/	/	PROC_ALT _{IAF} ≥ 3100 ft	PROC_ALT _{IAF} = 3400 ft
	IAF - IF	SPOT_ELEV_646 (Terrain)	16899	-182	646	MOCA _{INITIAL} = 2800 ft	PROC_ALT _{IF} = 2800 ft
INTER	IF - SDF	SPOT_ELEV_612 (Terrain)	14790	-3034	612	MOCA _{INTER} = 2400 ft	PROC_ALT _{SDF} = 2400 ft
	SDF - FAP	LYPG_OB2C_0033 (Tower)	5363	1572	185	MOCA _{SDF} = 1100 ft	PROC_ALT _{FAP} = 1600 ft
FAS	OAS	/	/	/	/	/	OCH = 200 ft
MAS	Initial	/	/	/	/	/	CG = 2.5 %
	Final	SPOT_ELEV_702 (Terrain)	3321	14375	702	CG _{FIN} = 2.5 %	

Прилазни сегменти генерисане процедуре су у последњем сценарију прилагођени конфигурацији терена (усмерени ка долини реке Зете од Даниловграда), тако да је и долазак на фикс IAF доста лакше пројектовати, и са мањим ограничењима градијента понирања.

Као и у случају E1-Sc1B, потребно је обезбедити везу MAEF са INITIAL, односно INTER сегментом, што, имајући на уму да не постоје изражена ограничења у MAS, неће представљати захтеван задатак.

13.2.3. Упоредни приказ резултата E2

Према добијеним резултатима (Табела 46), може се закључити да је експеримент E2 успешно спроведен, пошто су у оквиру свих сценарија генерисана допустива решења. На овај начин потврђена је хипотеза да је за ПСС 18 могуће пројектовати LPV процедуру, под наведеним условима.

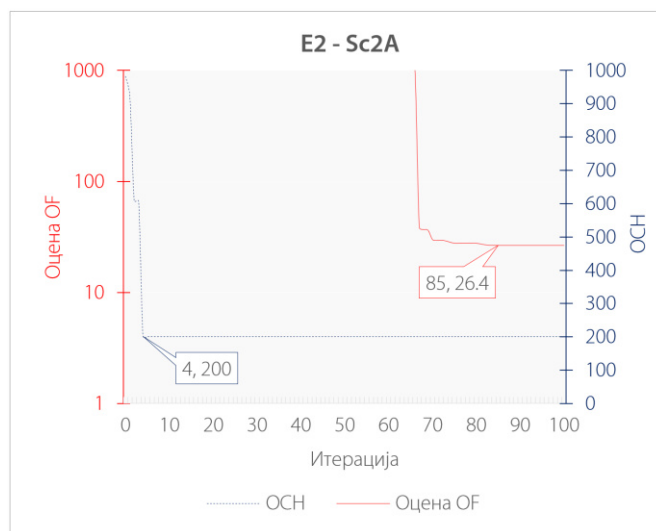
Генерисана решења припадају групи решења средњег квалитета, што додатно увећава значај добијених резултата.

Табела 46. Преглед резултата E2

Sc	Оцена OF	Степен квалитета	OCH (ft)
2A	26.43	Средњи	200
2B-I	35.57	Средњи	200
2B-II	36.95	Средњи	200

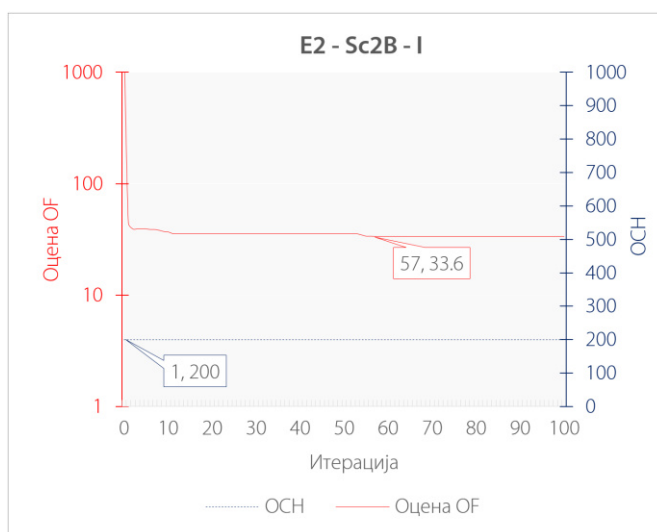
У свим решењима добијена вредност OCH износи оптималних 200 ft, што значи да у оквиру OAS простора нема значајних ограничења. У оквиру ових решења, приметан је напредак по питању добијене вредности CG (3.8 - 2.5 %), док су по питању GRA (од 3.5°) и локације прага (измештен на 300 m) забележене константне вредности, што додатно указује на критичност INITIAL и INTER сегмената, чија конструкција је у ранијим анализама представљала највећи фактор ограничења.

Када је модел извршен у пуном капацитету, у оквиру Sc2A, почетно прихватљиво решење постигнуто је у 85. итерацији (Слика 79). Због примењене двофазне стратегије оптимизације, ово решење је код Sc2B-I и Sc2B-II постигнуто раније у току оптимизационог процеса, у 57, односно 37. итерацији, респективно (Слика 80).

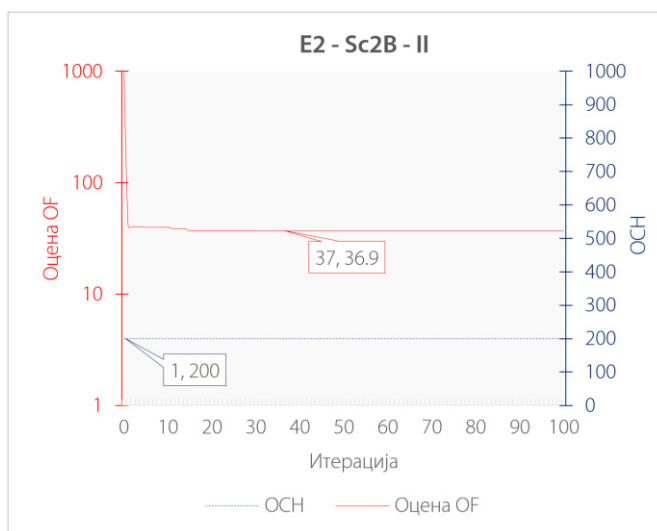


Слика 79. Понашање модела E2-Sc2A

а)



б)



Слика 80. Понашање модела E2-Sc2B

Решење добијено у оквиру фазе Sc2B-I оцењено је нешто боље у поређењу са Sc2B-II, што се може приписати задржавању оптималних вредности УП у MAS сегменту, преузетих из сценарија Sc2A. С друге стране, решење генерисано у Sc2B-II карактерише значајно мања вредност CG, и свакако већа прихватљивост у складу са постављеним оперативним ограничењима. У свим

случајевима, мања прилагођавања су неопходна како би се обезбедила одговарајућа континуираност лета након тачке МАЕФ код свих решења.

Применом различите стратегије оптимизације у овом експерименту, елементи допустивог решења, које има нижи степен оперативне прихватљивости, искоришћени су као основа за усмеравање капацитета модела ка циљаној оптимизацији критичних сегмената процедуре. Овим приступом постигнуто је смањење рачунског оптерећења и укупног времена извршавања модела, уз истовремено очување контроле над кључним параметрима поступка. Поред тога, предложена методологија омогућава доносиоцима одлука и пројектантима да се фокусирају на критичне аспекте процедуре, чиме се унапређује ефикасност процеса пројектовања и имплементације.

Основни закључак извођења другог експеримента, јесте да оперативном окружење и посредни захтеви, који се могу налазити ван домена обављања операција летења, могу диктирати избор коначног решења. У овом случају се конкретно захтева примена решења са нешто већим степеном комплексности како би се осигурао континуитет летења и лакша реинтеграција ваздухоплова у поновни прилаз. Међутим, и у оваквим околностима, веома је пожељно познавање најбољег допустивог решења, како би се кроз ниво одступања у односу на њега проценила оправданост другог избора и добијене користи.

13.3. Анализа резултата

Могућности имплементације процедура детаљно су проверене коришћењем представљеног модела, који је у сваком сценарију експеримента генерисао скуп допустивих опција. Овај скуп обухвата испитиване прилазе у правцу продужене осе ПСС, као и решења са мањим нивоом комплексности, при чему су оцењени различити аспекти примењивости генерисаних процедура.

Добијени резултати потврђују ефикасност примењеног оптимизационог алгорита, као и квалитет генерисаних процедура из модела, чиме је спроведен и завршни корак његове валидације. У том смислу, успешно је демонстрирано слагање предвиђеног понашања модела, у односу на пример стварних размера, у реалном оперативном окружењу.

На основу изнетих резултата, може се закључити да тренутни ниво развоја модела омогућава његову оперативну примену и у потпуности испуњава предвиђену намену. Остварени степен прецизности и поузданости решења указује на спремност модела за интеграцију у практичне сценарије, уз потенцијал за даље унапређење и прилагођавање специфичним оперативним захтевима.

У том контексту, у наставку текста биће анализирани кључни аспекти који су идентификовани након спроведених експеримената, а који могу имати значајан утицај на даљи развој и унапређење модела. Ови аспекти ће послужити као основа за дефинисање правца будућих истраживања, са циљем да се додатно побољшају перформансе, прилагодљивост и оперативна примењивост модела.

Време извршавања модела. Време извршавања модела за 100 итерација варирало је у зависности од сценарија, односно од тога да ли је оптимизација примењена на одређени сегмент процедуре или на њену целокупну структуру. Уочено је да се време извршавања кретало у распону од 7 до 72 сата.

Будући да је рачунар коришћен за примену модела истовремено извршавао и друге задатке, тачни временски подаци нису бележени. Стога, наведене вредности треба посматрати као приближне процене, које дају општи увид у временску сложеност процеса.

Анализом броја итерације у којој је пронађено оптимално решење, може се закључити да је у сценарију E1-Sc1A процес оптимизације достигао врхунац у 30. сату, док је у сценарију E2-Sc2A исти процес трајао око 61 сат. Ове разлике у трајању резултат су различитих карактеристика оперативног окружења и услова под којима је спровођен процес оптимизације.

Током тестирања модела, примењене су различите стратегије оптимизације и ограничења како би се пронашла прихватљива решења која су у већој мери примењива у стварном оперативном

окружењу. Овакав приступ показао је да су експертско знање и усмеравање кључни за успешност читавог процеса, као и да позитивно утичу на додатно смањење времена извршавања модела.

Наведене стратегије подразумевају:

- Ограничење простора претраге кроз примену оперативних захтева – смањивањем броја допуштених варијанти решења у складу са реалним оперативним ограничењима, могуће је значајно убрзати процес претраге, без угрожавања квалитета решења;
- Примена стратегија фазне и парцијалне оптимизације – уместо да се оптимизује целокупна процедура у једном кораку, подела процеса у више фаза може довести до постепеног сужавања претраге и бржег достизања задовољавајућег нивоа квалитета решења.

Један од најзначајнијих фактора који утиче на укупно време извршавања модела јесте број препрека укључених у оптимизациони прорачун. У анализираним сценаријима, модел је радио са приближно 3500 препрека, што је значајно допринело високој рачунској сложености процеса.

Иако овај фактор значајно утиче на време извршавања, он је истовремено и неопходан за обезбеђивање тачности модела. Због тога, будуће унапређење модела треба да буде усмерено на развој динамичких механизма селекције препрека, који би омогућили задржавање само оних елемената који имају директан утицај на дефинисање процедуре.

Ако се добијени резултати рада посматрају изоловано и упореде са другим оптимизационим моделима, односно са сличним алгоритмима примењеним на друге проблеме, може се закључити да је време рада модела релативно дуго. Међутим, када се резултати анализирају из стратешке перспективе, узимајући у обзир намену модела, њихова интерпретација добија сасвим другачију конотацију.

Искусствено је потврђено да процес пројектовања прихватљивих и допустивих решења на аеродромима са израженим теренским ограничењима захтева вишемесечни интензиван рад. У том процесу често се користе полу-аутоматизовани комерцијални алати, који омогућавају генерисање и проверу процедура у року од неколико секунди, али уз константну интервенцију експерата како би се осигурала њихова допустивост и оперативна прихватљивост.

Пример који илуструје сложеност овог процеса јесте развој решења за ПСС 18 аеродрома Подгорица, где је применом традиционалних метода пројектовања процедура било потребно приближно три месеца за идентификацију првог и јединог допустивог решења. Насупрот томе, представљени модел је исти задатак успешно решио за мање од три дана, чиме је значајно смањено време потребно за проналажење најбољег решења, уз очување предвиђеног нивоа квалитета и потпуно усклађивање са постављеним оперативним захтевима.

Параметри математичког модела. Иако су вредности тежинских коефицијената фино подешене у оквиру поступка анализе осетљивости у току развоја математичког модела, оне не би требало да се посматрају као фиксне или универзално вредности. Како различити оперативни услови могу захтевати различите приоритете у процесу оптимизације, ови параметри могу бити динамички подешавани у складу са специфичностима анализираних сценарија. Процес њихове калибрације треба да се врши под надзором стручњака, како би се осигурало да решења модела буду и оперативно прихватљива и оптимална у оквиру конкретног окружења.

С обзиром на то да је у овом раду иницијално дефинисана функција циља, која укључује елементе комплексности прилазних процедура, даљи рад треба да буде усмерен на проширење скупа значајних фактора. Ово би омогућило увођење додатних критеријумских функција, које би даље унапредиле поступак решавања овог вишекритеријумског проблема. Додатна истраживања у овом правцу допринела би развоју још прецизнијег модела, који би могао да одговори на специфичне захтеве различитих аеродромских окружења и оперативних услова.

Први кораци у овом смеру предузети су у оквиру [29]. У проширеном приступу питању комплексности, уведен је и појам динамичке комплексности, који има за циљ моделирање утицаја

додатних динамичних фактора на комплексност процедуре. Ту се пре свега мисли на атмосферске појаве, као што су база облака, видљивост, ветар и сл.

Примењивост у оперативном окружењу. Резултати експеримента показали су да мала одступања од најбољег добијеног решења могу бити оперативно прихватљивија у одређеним околностима. У таквим случајевима, пожељније је обезбедити стратегију претраге која генерише већи број независних, допустивих опција, уместо оне која се фокусира искључиво на једно оптимално решење.

Из перспективе развоја модела, ово указују на потребу за унапређењем интензификационе функције алгорита претраге како би се омогућила идентификација већег броја локалних минимума. Овакав приступ допринео би повећању флексибилности у процесу доношења одлука, међутим, он мора бити пажљиво спроведен како не би довео до деградације укупне ефикасности модела.

Као додатни контролни механизам у овом процесу, може се имплементирати мерење одступања квалитета изабраних (неоптималних) решења у односу на оптималне вредности. Овакав механизам омогућава дефинисање прихватљивих нивоа комплексности решења, чиме се, посредно, узимају у обзир и безбедносни аспекти њихове примене.

Поред тога, у циљу постизања пуне оперативне примењивости у конкретним условима, неопходно је обезбедити интеграцију предложеног решења у постојеће токове и организацију ваздушног саобраћаја. Ово подразумева увођење додатних прилазних сегмената и проширење елемената MAS сегмента, чиме се омогућава континуирано уклапање процедура у постојећу инфраструктуру ваздушног простора. У том контексту, пожељно је размотрити прилагођење модела коришћењем предефинисаних позиција IAF и MAEF фиксева. Иако овакав приступ донекле ограничава флексибилност модела, он истовремено обезбеђује континуитет лета у оквиру оперативног окружења, што је кључно за свеобухватно разматрање имплементације процедура у тренутку њиховог генерисања.

Иако би предложено проширење структуре решења имало практични значај, потребно је имати на уму основну намену модела, а то је екстензивно испитивање могућности за пројектовање процедура на посматраним локацијама. Ограничавањем елемената процедуре у основи структуре модела, као што је позиција појединих фиксева, могу се изгубити делови простора претраге који би понудили допустива решења у измењеном или прилагођеном оперативном концепту. Врло често имамо ситуацију да је управо конструкција IAP процедуре критичан корак у обезбеђивању оперативних услова за обављање ваздушног саобраћаја. Под тим условима често је потребно извршити прилагођивање осталих структура ваздушног простора, како би се то критично решење применило. Полетања и слетања ваздухоплова представљају суштинске фазе летења које морају бити несметано извођене, а сврха свих осталих структура јесте да осигура њихово безбедно извршавање на највишем нивоу.

ДЕО V
ЗАКЉУЧАК



14. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

У оквиру овог истраживања развијена је нова методологија за пројектовање процедура инструменталног прилажења и избор оптималног решења, базирана на принципима операционих истраживања [51]. Методологија је приказана на примеру LPV CAT I процедура, које представљају најновију генерацију процедура за прецизно прилажење и слетање, у потпуности базирану на сателитској навигацији. Значајне оперативне и економске користи ових процедура идентификоване су као основа за развој и увођење напредних концепата обављања операција и у будућности.

У првом кораку, извршена је детаљна анализа и поставка проблема, као резултат исцрпног прегледа расположиве литературе и експертског знања. На основу утврђене димензионалности и комплексности, проблем је окарактерисан као тежак проблем комбинаторне оптимизације. За потребе његовог решавања методама из домена комбинаторне оптимизације формулисан је математички модел, који обухвата посебно развијену функцију циља и ограничења, као и пажљиво изабране параметре оптимизације, у циљу добијања решења примењивих у реалном окружењу. Још један од значајних доприноса овог рада представља увођење комплексности процедура (са аспекта летачких посада) као критеријума за оптимизацију и доношење одлука у оквиру функције циља. Оваквим приступом омогућена је квантификација квалитета добијених решења, у форми која до сада није примењена у домену прилазних процедура, и пружен је начин за решавање једног од главних изазова у процесу њиховог пројектовања.

У складу са постављеним границама проблема и прописаним критеријумима пројектовања процедура инструменталног прилажења, дефинисан је концептуални модел, базиран на препознатим функционалностима и задацима неопходним у поступку добијања оптималних решења. Концептуални модел је чинио основу за развој рачунарског модела. Рачунарским моделом, односно програмом, решавање проблема је преведено у значајно ефикасније рачунарско окружење, фокусирано на примену развијеног математичког модела. Избор примарног метода за решавање истраживаног проблема заснован је на анализи његових кључних карактеристика и подразумева примену стохастичког метахеуристичког алгорита, који функционише према принципима понашања више агената у оквиру природних процеса. Овај приступ омогућава генерисање већег броја потенцијалних решења путем случајне модификације иницијалних вредности у оквиру једне итерације алгорита. У том контексту, примењено је стечено искуство у раду са алгоритмом за оптимизацију путем колоније пчела (BCO), који је, захваљујући потврђеној ефикасности при решавању проблема великих димензија, адаптиран за потребе предметног истраживања.

Математички модел се може сматрати „срцем“ програма, док BCO метахеуристички алгоритам за оптимизацију функционише као „мозак“ и „нервни систем“ који управља кључним процесима решавања проблема. Истовремено, PANS-OPS механизам за конструкцију и проверу решења може се посматрати као „моторички систем“ који обезбеђује динамичку функционалност и оперативну примену целокупног система. Међусобни односи и слагање рачунарског и концептуалног модела, односно концептуалног модела и стварног система проверени су и потврђени применом принципа верификације и вредновања дефинисаних у оквиру поступка симулацијског моделирања [80]. Изградња поверења у модел започета је од прве фазе његове формулације, применом принципа структуралног развоја главних функционалности, а завршена низом тестова који доказују доследност и ваљаност примене уграђених логичких принципа за добијање решења.

Модел је додатно проверен у односу на реално оперативно окружење. Ова провера је извршена кроз низ експеримената на примеру Аеродрома Подгорица. Изазовни положај аеродрома, одређен захтевном конфигурацијом терена, као и близином државне границе послужили су као одличан концепт за проверу могућности развијеног модела и потврду његове ефикасности и робусности при проналажењу решења.

Током експеримената испитане су могућности модела на обе ПСС (18/36). У случају ПСС 36, модел је понудио решење са значајно нижим нивоом комплексности у односу на постојећу процедуру. Овај резултат указује на потенцијал модела да, уз адекватно подешавање улазних ограничења, усмери претрагу ка допустивим решењима у било ком специфичном оперативном окружењу. Поред бољих опција за прилаз и слетање, отворен је простор за примену различитог приступа организацији долазног саобраћаја на аеродрому, и основа за уређење токова саобраћаја на вишем нивоу.

Могућности модела су даље потврђене резултатима за ПСС 18. У овом случају, модел је такође успео да понуди више примењивих решења, која омогућавају додатно уређење токова саобраћаја у околини аеродрома. Међутим, посебан значај добијених резултата огледа се у томе што су по први пут пронађена допустива решења која омогућавају имплементацију прилазних процедура за ову ПСС. До сада се сматрало да та имплементација није могућа.

Карактеристична за оба нумеричка примера је кључна улога експерата у управљању моделом, која је неопходна за добијање примењивих решења. Упркос високим могућностима модела, процес доношења одлука и даље захтева централну улогу човека, чиме се наглашава значај људског фактора у оперативном контексту. На овај начин примена нове методологије не подразумева укидање или замену улоге пројектаната процедура (PANS-OPS експерата), већ служи да омогући неопходну помоћ за истраживање крајњих могућности пројектовања и примене процедура. Ова помоћ подразумева и подршку приликом доношења одлуке о избору најбољег решења, коју експерти не могу утврдити самостално или у ограниченом временском року, применом традиционалних метода пројектовања.

Успостављањем систематизованог свеобухватног приступа процене услова пројектовања процедура обезбеђује се њихова примена на аеродромима или ПСС-ма на којима то раније није било могуће. Ово је од посебне важности за регионалне и мање аеродроме, који не поседују навигациону инфраструктуру или су трошкови њиховог одржавања превелики. Развојем њихових капацитета може се извршити дисперзија оптерећења која ја тренутно присутна на главним европским ваздушним лукама.

Такође, увођењем додатног фактора квалитета у процес пројектовања процедура, оперативни аспекти обављања операција летења су уграђени у сам процес израде решења, пре његове оперативне употребе, чиме се омогућује унификација и скраћење процеса имплементације процедура.

Хармонизованом применом прописаних PANS-OPS критеријума, која је уграђена у развијени модел, обезбеђује се стандардизованост процеса пројектовања сваке LPV процедуре, уз смањену могућност грешака условљених различитим тумачењем или девијацијом примене прописаних ограничења.

Даље, модулarna архитектура рачунарског модела, уз једноставно прилагођавање критеријума, омогућава лако проширење примене модела на друге системе за прецизно прилажење (xLS). У ову групу процедура спадају ILS и GBAS процедуре, укључујући LPV APV I процедуре и тзв. хеликоптерске PinS (Point-in-Space) LPV процедуре, које се налазе у домену PBN RNP APCH процедура.

По истим принципима, уз додатну модификацију програма, могуће је проширити његову примену и користи и на друге типове процедура, као што су SID и STAR руте. У том смислу, значајан потенцијал модела препознат је у евентуалној примени за пројектовање хеликоптерских рута на нижим висинама (low level route), на које пресудно утичу конфигурација терена и услови залећивања лопатица ротора, који код ваздухоплова са ротационим крилима представљају доста комплекснији и опаснији проблем него код оних са фиксним крилима [157].

Посебан значај развијеног модела огледа се у његовој способности да пружи подршку у спровођењу студија изводљивости за избор локација и планирање будућих аеродрома, као и у пројектима развоја постојећих аеродрома. У тим студијама, модел би служио као вредан алат за

допуну стандардних елемената, пружајући рани увид у потенцијална ограничења за извршавање будућих операција летења.

Специфична примена модела, могла би бити обезбеђена и приликом спровођења безбедносних анализа. У овој улози, његова способност директне процене комплексности процедуре, могла би да представља основни индикатор одступања изабраног решења у односу на постојећи или пројектовани ниво безбедности саобраћаја.

Додатна примена модела, такође, може бити вишеструка. Може се обезбедити место модела у процесу валидације нових или измењених PANS-OPS критеријума. Уз додавање основних могућности за брзу и једноставну визуелизацију решења, модел би омогућио анализу граничних и екстремних случајева са циљем идентификације слабости нових критеријума. Поред тога, његова примена би могла указати на потенцијална ограничења или немогућност примене предложених принципа пројектовања у специфичним оперативним условима.

Осим наведеног, модел може послужити као помоћни алат у испитивању нових оперативних концепата, омогућавајући симулацију и тестирање различитих сценарија у контролисаним условима. На тај начин би се могла проверити њихова усклађеност са постојећим стандардима и ограничењима која проистичу из критеријума за пројектовање процедура.

14.1. Правци будућег истраживања

Наставак развоја представљеног модела биће пре свега усмерен на даље прилагођавање и унапређење његових функционалности, као и проширење опсега могуће употребе.

У том смислу, главни акценат ће бити на ангажовању ефикаснијих метода за конструкцију процедура, у односу на оне које су иницијално инкорпорирани у модел. Ове методе могу да обухвате примену тзв. wind spiral методе за конструкцију заштитног простора заокрета, као и проширење могућности модела по питању употребе додатних типова path terminator-а и врста заокрета (заокрет на висини, у односу на fly-by WP, RF заокрет), као и могућност избора предефинисане локације почетних и крајњих фиксева, и др. Овим приступом се омогућава генерисање решења са сложенијом структуром, и повећава робусност модела за примену на ограниченим локацијама.

Поред тога, применом нестандартних елемената процедура у већем обиму (нпр. угао понирања већи од 3.5° , бочни прилаз под већим углом и сл.), обезбедио би се шири скуп допустивих решења у ситуацијама када избегавање препрека није могуће извршити у оквиру стандардних вредности PANS-OPS критеријума. Даље, увођењем различитих степена недопустивости решења, може се извршити додатна категоризација добијених опција. Опције са нижим степеном недопустивости би требало да обухвате решења чије карактеристике би се применом других механизма или алгоритама (нпр. за додатну локалну претрагу решења) могле превести у скуп допустивих. На овај начин обезбедила би се већа флексибилност у креирању решења у изазовним теренским условима, при чему би формулисани математички модел служио као контролни механизам за спречавање превеликог одступања од дозвољених вредности комплексности, односно од постојећег нивоа безбедности обављања операција летења.

Тренутна ограничења модела захтевају и побољшања по питању коришћења и манипулације подацима о препрекама. У том контексту, неопходно је прилагодити програм тако да омогући директну примену постојећих формата података о препрекама, чиме би се елиминисала потреба за њиховим претпроцесирањем. Ово укључује интеграцију расположивих дигиталних модела терена (DEM или DTM) и других електронских база података о препрекама које се објављују на националном и глобалном нивоу. Таква интеграција би значајно допринела оперативној ефикасности и примени модела у реалним условима.

Посматрано са аспекта рада, неопходно је размотрити даља унапређења постојећег кода и програмског језика у циљу повећања ефикасности времена рада модела (видети поглавље 10.3). Ова унапређења, поред оптимизације тренутног програма (поготово са аспекта идентификације

препрека), треба да обухвате истраживање других техника из области комбинаторне оптимизације са циљем додатног побољшања перформанси модела.

Поред испитивања метахеуристичких алгоритама сродних примењеном ВСО алгоритму (као што је нпр. АСО алгоритам), потребно је размотрити и употребу метахеуристика заснованих на итеративном поступку конструкције решења. Ова врста алгоритама, иако генерише ограничен број решења, може у комбинацији са другим алгоритмима, који омогућавају бољу локалну претрагу, представљати ефикасан алат за решавање специфичних проблема као што је пројектовање процедура летења. Могућности примене различитих метода би требало проширити и на друге стохастичке алгоритме, али и на алтернативне методе оптимизације уколико се процени да постоји потенцијал за даљим повећањем робусности и ефикасности рада и примене модела (видети поглавље 8.1.1.2).

Важан елемент предложене методологије представља и формула за оцену комплексности процедура за инструментално прилажење, дефинисана у оквиру функције циља математичког модела. Како је у оквиру овог истраживања направљен само иницијални корак у њеној примени, због великог практичног значаја неопходно је посебну пажњу усмерити на њен даљи развој и прилагођавање. Наставак истраживања комплексности прилазних процедура обезбедиће даље разумевање сложености операција летења и њихове везе са структуром и оперативним окружењем пројектоване процедуре. У том смислу, посебно је важно размотрити аспект динамичке комплексности. Ова компонента комплексности је веома битна за процену изводљивости процедура, односно искоришћења капацитета аеродрома у зависности од метеоролошких услова локације. Поред комплексности, као основног индикатора безбедности, потребно је уложити додатне напоре у истраживање и идентификацију директне повезаности између пројектовања процедура и различитих типова опасности извођења операција летења. Овај циљ би се могао остварити развојем специфичних модела за процену ризика (од колизије са препрекама, одлазак у неуспело прилажење и сл.) на основу историјских података о летовима или спровођењем тзв. fast-time симулација операција слетања за различите категорије ваздухоплова.

Крајњи задатак унапређења модела треба да буде развој специјализованог алгоритма за пројектовање процедура инструменталног прилажења, са високим нивоом робусности који ће доносиоцима одлука омогућити избор из ширег и прикладнијег спектра опција. Реализација таквог модела могућа је у границама посебног експертског система који користи приступ вештачке интелигенције (artificial intelligence - AI) базиран на развијеном моделу [158]. Иницијална улога AI је дефинитивно препозната у процесу претраге решења, где би на ефикасан начин могла да имитира когнитивне процесе експерата, неопходне за унапређења усмеравања претраге и достизања оптималних решења.

Такав систем би био у стању да подржи развој будућих концепата операција, у складу са актуелним и предстојећим захтевима у ваздухопловству, омогућавајући транзицију ка динамичком приступу пројектовању процедура летења. Ове процедуре би биле прилагођене специфичностима сваког ваздухоплова и посаде, као и тренутним условима извођења лета, чиме би се обезбедила оптимална искоришћеност расположивих перформанси и унапређења безбедност и ефикасност операција.

Међутим, како би се омогућила адекватна употреба AI у домену управљања ваздушним саобраћајем, посебно у оперативном сегменту, неопходно је прецизно дефинисати захтеве за њену примену. Ови захтеви морају јасно одредити постојећа ограничења система и очекивана унапређења која се могу постићи применом AI. Имајући у виду тренутне карактеристике AI система и методе развоја, оправдано је да њихова почетна улога буде ограничена на пружање подршке у процесу доношења одлука, а не на самосталан избор и примену решења у реалном времену.

Ово је нарочито важно јер одлука о примени конкретног решења подразумева свест о потенцијалним последицама, како у редовним, тако и у ванредним ситуацијама, укључујући и питање одговорности за изабрано решење. Примену AI прате бројни изазови, који укључују безбедносне провере, процес стандардизације и сертификације, што представља кључне

предуслове за увођење нових концепата у ваздухопловству [159]. Процес прилагођавања употребе AI представља дугорочан процес који ће трајати годинама и који захтева транспарентан мултидисциплинарни приступ са циљем изградње поузданог и етички усаглашеног екосистема. Тај екосистем мора да интегрише прописе о безбедности, управљање подацима и континуирану сарадњу са свим релевантним актерима као предуслов за безбедну и ефикасну оперативну примену [158].

Иако је пуна примена AI у домену ваздухопловства и даље у развоју, домен пројектовања процедура летења суочава се, такође, са бројним изазовима. Тренутни приступ фазног развоја критеријума за пројектовање процедура, у основи заснован на принципима рада конвенционалне навигације од пре више од четири деценије, захтева хитно преиспитивање и ажурирање. Усвајање савременог приступа подразумева радикалну ревизију концепта пројектовања процедура, што укључује дефинисање нових правила и стандарда који ће бити усклађени са захтевима будућих напредних система и технологија. Такав приступ не само да мора задовољити потребе тренутног ваздухопловног система, већ мора обезбедити и флексибилност и адаптабилност за интеграцију са иновативним концептима и решењима које AI и аутоматизација могу донети у будућности. Овај корак је кључан за омогућавање безбеднијег, ефикаснијег и технолошки напреднијег система који ће одговорити на све сложеније захтеве у области управљања ваздушним саобраћајем и планирања операција летења.

Последице одлагања увођења нових приступа у процес пројектовања процедура инструменталног летења већ су приметне у појединим аспектима примене концепта PBN. Реалне користи овог концепта ограничене су наслеђеним системом пројектовања процедура, што често доводи до предимензионисаних заштитних простора. У многим случајевима, ови простори су већих димензија него код конвенционалних процедура, што указује на неефикасност постојећих критеријума. Недостаци који се уочавају у граничним случајевима резултат су сложености примене критеријума и принципа конструкције, који су развијени за прве генерације процедура. Ова ситуација наглашава потребу за ревизијом и поједностављењем критеријума, и употребу историјских података о обављеним операцијама, које модерни системи подржавају. Коришћењем предности дигитализације и доступности великих количина података омогућило би се дефинисање прецизнијих и оперативно ефикаснијих процедура, које су усклађене са савременим захтевима операција летења.

15. ОЗНАКЕ И СКРАЋЕНИЦЕ

ABAS	Airborne-based augmentation systems	IR	Implementing regulation
ACFT	Aircraft	KASS	Korea Augmentation Satellite System
AI	Artificial intelligence	LNAV	Lateral navigation
AIS	Aeronautical information services	LOC	Localizer
ANP	Actual navigation performance	LP	Localizer performance
APV	Approach procedure with vertical guidance	LPV	Localizer performance with vertical guidance
AR	Authorization Required	LTP	Landing threshold point
(A)RAIM	(Advanced) Receiver autonomous integrity monitoring	LTP	Latest turning point
ARP	Aerodrome reference point	MAEF	Missed approach end fix
ASQF	Application Specific Qualification Facility	MAS	Missed approach segment
ATC	Air traffic control	MATF	Missed approach turning fix
ATM	Air traffic management	MCC	Mission Control Centres
ATS	Air traffic services	MDA/H	Minimum descent altitude/height
ATT	Along-track tolerance	MLS	Microwave landing system
AW	Area width	MOC(A)	Minimum obstacle clearance (altitude)
BA	Bank angle	MSA	Minimum sector altitude
BCO	Bee colony optimization	MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
BV	Buffer value	MSD	Minimum stabilization distance
CAD	Computer-aided design	MSL	Mean sea level
CAT	Category	ND	Navigation display
CDFA	Continuous descent final approach	NDB	Non-directional beacon
CG	Climb gradient	NLES	Navigation Land Earth Stations
CON	Conventional	NPA	Non-precision approach
COTS	Commercial off-the-shelf software	NSE	Navigational system error
CP	Crossing point	OAS	Obstacle assessment surface
DA/H	Decision altitude/height	OBPMA	On-board performance monitoring and alerting
DEM	Digital elevation model	OCA/H	Obstacle clearance altitude/height
DFMC	Dual-frequency multi-constellation	PA	Precision approach
DG	Descent gradient	PACF	Performance Assessment and Checkout
DME	Distance measuring equipment	PANS-OPS	Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations
DTM	Digital terrain model	PAR	Precision approach radar
EASA	European Agency	PBN	Performance-based navigation
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	PDE	Path definition error
ELEV	Elevation	PFD	Primary flight display
ESSP	European Satellite Services Provider	PinS	Point-in-space
ETP	Earliest turning point	PROC ALT	Procedure altitude
EU	European Union	RDH	Reference datum height
EUSPA	EU Agency for the Space Programme	RF	Radius-to-fix
EWAN	EGNOS Wide Area Network	RIMS	Ranging Integrity Monitoring Stations
FAA	Federal Aviation Administration	RNAV	Area navigation
FAP	Final approach point	RNP	Required navigation performance
FAS	Final approach segment	RWY	Runway
FMS	Flight management system	SARPs	Standards and Recommended Practices
FPAP	Flight path alignment point	SBAS	Satellite-based augmentation system
FRA	Free route airspace	SDF	Stepdown fix
FTE	Flight technical error	SID	Standard instrument departure

FTP	Fictitious threshold point	SIS	Signal-in-space
FUA	Flexible use of airspace	SMS	Safety management system
GAGAN	GPS-Aided GEO Augmented Navigation	SOC	Start of climb
GARP	GNSS azimuth reference point	SoL	Safety of Life
GBAS	Ground-based augmentation system	SRA	Surveillance radar approach
GEO	Geostationary	STAR	Standard instrument arrival
GIS	Geographic information system	TAA	Terminal arrival altitude
GLONASS	GLObal Navigation Satellite System	TAS	True airspeed
GLS	GBAS landing system	THR	Threshold
GNSS	Global navigation satellite system	TID	Turn initiation distance
GPA	Glide path angle	TP	Turning point
GPS	Global Positioning System	TRD	Track distance
HL	Height loss	TSE	Total system error
IAF	Initial approach fix	VDF	VHF direction-finding station
IAP	Instrument approach procedure	VHF	Very high frequency
IAS	Indicated airspeed	VNAV	Vertical navigation
ICAO	International Civil Aviation Organization	VOR	VHF omnidirectional radio range
IF	Intermediate approach fix	WAAS	Wide Area Augmentation System
IFP	Instrument flight procedure	WP(T)	Waypoint
IFR	Instrument flight rules	XTT	Cross-track tolerance
ILS	Instrument landing system	ПСС	Полетно-слетна стаза
INS	Inertial navigation systems		

16. ЛИТЕРАТУРА

- [1] ICAO, *Annex 11 Air Traffic Services, Fifteenth Edition*, Montreal, Canada, 2018.
- [2] ICAO, *Doc 4444 Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management, Sixteenth Edition*, Montreal, Canada, 2016.
- [3] ICAO, *Annex 2 Rules of the Air, Tenth Edition*, Montreal, Canada, 2005.
- [4] ICAO, *Doc 8168 Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations (PANS-OPS), Volume II - Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, Seventh Edition*, Montreal, Canada, 2020.
- [5] EASA, *Easy Access Rules for Aerodromes (Regulation (EU) No 139/2014)*, Cologne, Germany, 2023.
- [6] GSA (EUSPA), "(GNSS-based) instrument flight procedures implementation for general aviation: uncontrolled aerodromes and non-instrument runways," Prague, Czech Republic, 2019.
- [7] ICAO, *Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual, Fifth Edition*, Montreal, Canada, 2023.
- [8] EUROCONTROL, "ERNIP Part 1 - European Airspace Design Methodology Guidelines, Edition 2.1," Brussels, Belgium, 2024.
- [9] T. Dautermann, "Civil air navigation using GNSS enhanced by wide area satellite based augmentation systems," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 67, pp. 51-62, 2014.
- [10] ESSP SAS, *Guidelines for ANSP/Airports and Aircraft Operators for LPV implementation*, Toulouse, France, 2015.
- [11] C. Hernando, A. Marquez, P. Pintor, R. Roldán, J. Álvarez и J. Lorenzo, „SBAS CAT-I Capability in Europe: The LPV-200 Service,“ y *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, Tampa, Florida, 2015.
- [12] W. Kaleta and J. Skorupski, "A fuzzy inference approach to analysis of LPV-200 procedures influence on air traffic safety," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 106, pp. 264-280, 2019.
- [13] J. Skorupski и W. Kaleta, „Method for evaluation of the influence of LPV-200 procedures usage on the probability of CFIT,“ y *European Safety and Reliability conference (ESREL)*, Glasgow, Scotland, 2016.
- [14] EC, *Commission Implementing Regulation (EU) 2018/1048 of 18 July 2018 laying down airspace usage requirements and operating procedures concerning performance-based navigation*, vol. 61, Official Journal of the European Union, 2018.
- [15] C. Gonzaga-López, F. M. Buchmann, T. Dautermann and T. Ludwig, "Implementing Precision Approaches Supported by Satellite-Based Augmentation Systems in the Austrian Alps," *Journal of Air Transportation*, vol. 28, no. 3, pp. 70-81, 2020.
- [16] T. Dautermann, V. Mollwitz, H. H. Többen, M. Altenscheidt, S. Bürgers, O. Bleeker and S. Bock-Janning, "Design, implementation and flight testing of advanced RNP to SBAS LPV approaches in Germany," *Aerospace Science and Technology*, vol. 47, pp. 280-290, 2015.
- [17] Ö. Goteman and S. Dekker, "Flight crew and aircraft performance during RNAV approaches: studying the effects of throwing new technology at an old problem," in *Human Factors and Aerospace Safety*, First ed., H. Muir and D. Harris, Eds., London, UK, Routledge, 2003, pp. 147-164.

- [18] AIRBUS, "A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958-2019," Blagnac, France, 2020.
- [19] J. Barrios, J. G. Pericacho, S. Domenech and N. Álvarez López, "Worldwide SBAS Broadcasts Between 2017 and 2022: A Comparative Study," in *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*, Denver, CO, 2022.
- [20] EUSPA, "EGNOS GSC Europa," [Online]. Available: <https://egnos.gsc-europa.eu/resources-tools/sbas-avionics>. [Accessed 2024].
- [21] FAA, "Performance Based Navigation Strategy," Washington, DC, 2016.
- [22] SESAR JU, "European ATM Master Plan," Brussels, Belgium, 2020.
- [23] M. Kovar, L. Almeida Cypriano, M. Kucera and P. Ptacek, "SBAS-based navigation system for precision approach in CAT II LVC," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2526, 2023.
- [24] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister and E. Akkogiounoglou, "Benefits for Greek Regional Airports Through Innovative Approach Technology Using an LPV to GLS Converter: A Case Study for Corfu and Thessaloniki," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 36-44, 2021.
- [25] T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister and L. Ehmke, "Enabling LPV for GLS equipped aircraft using an airborne SBAS to GBAS converter," in *2019 IEEE/ALAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Diego, CA, 2019.
- [26] FAA, "Satellite Navigation - GPS/WAAS Approaches," 2024. [Online]. Available: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/approaches. [Accessed January 2024].
- [27] EUSPA, "LPV Procedures Map," 2024. [Online]. Available: <https://egnos.gsc-europa.eu/resources-tools/lpv-procedures-map>. [Accessed January 2024].
- [28] EUROCONTROL, "PBN Map Tool," [Online]. Available: https://ext.eurocontrol.int/airport_map_tool/. [Accessed September 2024].
- [29] V. Andrić and F. Netjasov, "Method for Evaluation of Instrument Approach Procedures Complexity," in *Proceedings of the 51st Symposium on Operational Research (SYM-OP-IS 2024)*, Tara, Serbia, 2024.
- [30] R. Unkelbach, *Design and Testing of RNP AR to SBAS LPV approaches into Salzburg Airport*, Master's Thesis, Technical University of Berlin, 2022.
- [31] L. Lu, X. Lai, J. Jiang and J. Zhou, "Research on optimization of approach procedures for airports in an alpine environment," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, p. 1336705, 2024.
- [32] R. Sáez, D. Toratani, R. Mori and X. Prats, "Generation of RNP Approach Flight Procedures with an RRT* Path-Planning Algorithm," in *2023 IEEE/ALAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Barcelona, Spain, 2023.
- [33] L. Zhu, J. Wang, Y. Wang, Y. Ji and J. Ren, "DRL-RNP: Deep Reinforcement Learning-Based Optimized RNP Flight Procedure Execution," *Sensors*, vol. 22, no. 17, p. 6475, 2022.
- [34] D. Toratani and R. Mori, "RNP AR Approach Route Optimization Using a Genetic Algorithm," in *2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Dulles, VA, 2022.
- [35] E. Israel, W. J. Barnes and L. Smith, "Automating the Design of Instrument Flight Procedures," in *2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, 2020.

- [36] D. Stauffer, W. J. Barnes and L. Smith, "Modified Depth-First Search for the Automated Design of RNAV Approach Procedures," in *2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, 2020.
- [37] F. Morscheck, "The influence of shape and density of exemplary city areas on the possible benefit of optimized noise abatement A-RNP and RNP-AR procedures," in *ALAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL, 2020.
- [38] M. Zhang, *Multi-objective trajectory optimisation on environmental impacts*, PhD dissertation, University of Manchester, 2019.
- [39] F. Morscheck, "Noise mitigation optimization of A-RNP /RNP AR approaches," in *2018 ALAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Atlanta, GA, 2018.
- [40] T. Hasegawa, T. Tsuchiya and R. Mori, "Optimization of Approach Trajectory Considering the Constraints Imposed on Flight Procedure Design," *Procedia Engineering*, vol. 99, p. 259–267, 2015.
- [41] M. Richter, M. Bittner, R. M. Rieck and F. Holzapfel, "A Realistic Flight Path Parameterization for Calculation of Noise Minimal Trajectories using Bi-level Optimal Control," in *2014 ALAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, National Harbor, MD, 2014.
- [42] S. Khardi and L. Abdallah, "Optimization approaches of aircraft flight path reducing noise: Comparison of modeling methods," *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 4, pp. 291-301, 2012.
- [43] B. Shi, P. Cheng and N. Cheng, "3D flight path planning based on RRTs for RNP requirements," in *2012 IEEE International Conference on Information and Automation*, Shenyang, China, 2012.
- [44] M. Braakenburg, S. Hartjes, H. Visser and S. Heblij, "Development of a Multi-Event Trajectory Optimization Tool for Noise-Optimized Approach Route Design," in *2011 ALAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Virginia Beach, VA, 2011.
- [45] R. H. Hogenhuis, S. J. Hebly and H. G. Visser, "Optimization of area navigation noise abatement approach trajectories," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 225, no. 5, pp. 513-521, 2011.
- [46] X. Prats, F. Nejjari, V. Puig, J. Quevedo and F. Mora-Camino, "A Framework for RNAV trajectory generation minimizing noise nuisances," in *Proceedings of Second International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2006)*, Belgrade, Serbia, 2006.
- [47] H. Visser, "Generic and site-specific criteria in the optimization of noise abatement trajectories," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 10, no. 5, pp. 405-419, 2005.
- [48] ICAO, *Doc 9905 Required Navigation Performance Authorization Required (RNP AR) Procedure Design Manual, Third Edition*, Montreal, Canada, 2021.
- [49] EUROCONTROL, "CNS Dashboard," EUROCONTROL, [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/dashboard/communication-navigation-and-surveillance-dashboard>. [Accessed November 2024].
- [50] ICAO, "EUR OPS Bulletin 001 - Risks related to altimeter setting errors during APV Baro-VNAV and non-precision approach operations," Montreal, Canada, 2023.
- [51] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, Eleventh ed., New York, NY: McGraw-Hill Education, 2021.
- [52] X.-S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 2nd, Ed., London, UK: Elsevier, 2021.

- [53] ICAO, *Doc 10068 Manual on the Development of a Regulatory Framework for Instrument Flight Procedure Design Service, First Edition*, Montreal, Canada, 2018.
- [54] R. Romanović, K. Samardžić and D. Novak, "Prerequisites for Statistical Analyses of the Quality of Instrument Flight Procedures," *Promet - Traffic & Transportation*, vol. 36, no. 2, pp. 203-218, 2024.
- [55] V. Andrić, M. Nikolić and F. Netjasov, "A metaheuristic-based optimization model for flight procedure design," *Engineering Optimization*, pp. 1-26, 2024.
- [56] EUROCONTROL, "Cognitive Complexity in ATC - A Literature Review," Brussels, Belgium, 2004.
- [57] T. Radišić, P. Andraši, D. Novak, B. Juričić and B. Antulov-Fantulin, "Air Traffic Complexity as a Source of Risk in ATM," in *Risk Assessment in Air Traffic Management*, J. A. Pérez Castán and . Á. Rodríguez Sanz, Eds., IntechOpen, 2020.
- [58] F. Netjasov, "Terminal airspace traffic complexity," in *Proceedings of the 1st International Conference on Research in Air Transportation ICART 2004*, Zilina, Slovakia, 2004.
- [59] F. Netjasov, M. Janić and V. Tošić, "Developing a generic metric of terminal airspace traffic complexity," *Transportmetrica*, vol. 7, no. 5, pp. 369-394, 2011.
- [60] ATSB, "Perceived Pilot Workload and Safety of RNAV (GNSS) Approaches," ATSB, Canberra City, ACT, 2006.
- [61] M. Heiligers, *Pilot task demand load during RNAV approaches*, PhD dissertation, Delft University of Technology, 2011.
- [62] D. C. Chandra and R. Markunas, "Line Pilot Perspectives on Complexity of Terminal Instrument Flight Procedures Terminal Instrument Flight Procedures," U.S. Department of Transportation, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 2017.
- [63] EC, *Commission Implementing Regulation (EU) 2017/373*, Official Journal of the European Union, 2017.
- [64] ICAO, *Annex 4 Aeronautical Charts, Eleventh Edition*, Montreal, Canada, 2009.
- [65] S. M. Dražić, *Morphometric characteristics of the relief and their influence on forest openness by the primary forest roads network in the Republic of Srpska*, Belgrade: PhD dissertation, University of Belgrade, 2021.
- [66] Z. Li, C. Zhu and C. Gold, *Digital Terrain Modeling - Principles and Methodology*, First ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.
- [67] RTCA, *Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/ Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA DO-229)*, Washington, DC, 2020.
- [68] I. Dhief, S. Alam, C. C. Mean and N. Lilith, "A Tree-based Machine Learning Model for Go-around Detection and Prediction," in *SESAR Innovation Days (SID 2021)*, Virtual event, 2021.
- [69] NLR, *Memorandum IN-81-007 U, Description of program booklet for the calculation of ICAO-OAS data*.
- [70] W. Gautschi, *Numerical Analysis*, Second ed., Boston, MA: Birkhäuser, 2011.
- [71] J. Stoer and R. Bulirsch, *Introduction to Numerical Analysis*, Second ed., New York, NY: Springer-Verlag, 1996.
- [72] ENRI, "PANS-OPS OAS Software, version 4.5.2," Electronic Navigation Research Institute, 8 September 2024. [Online]. Available: <https://www.enri.go.jp/cnspub/oas/>.

- [73] A. Schrijver, *Combinatorial Optimization - Polyhedra and Efficiency*, vol. 24, 2003: Springer.
- [74] . M. Gendreau and J.-Y. Potvin, *Handbook of Metaheuristics*, Third ed., vol. ISOR 272, Springer, 2019.
- [75] A. Vasuki, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, First ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [76] S. S. Rao, *Engineering Optimization - Theory and Practice*, Fifth ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd, 2019.
- [77] G. Zäpfel, R. Braune u M. Bögl, *Metaheuristic Search Concepts: A Tutorial with Applications to Production and Logistics*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [78] R. W. Floyd, "Nondeterministic Algorithms," *Journal of the ACM*, vol. 14, no. 4, pp. 636-644, 1967.
- [79] M. Sipser, *Introduction to the Theory of Computation*, Second ed., Thomson Course Technology, 2006.
- [80] V. Čerić, *Simulacijsko modeliranje*, Zagreb: Školska knjiga, 1993.
- [81] V. Andrić, F. Netjasov and M. Nikolić, "A Novel Methodology for Optimizing Instrument Approach Procedures," in *SESAR Innovation Days (SID 2024)*, Rome, Italy, 2024.
- [82] V. Tošić and B. Mirković, "Investigating Untapped Capacity at Single-Runway Airports using Short Final Curved Approach, Dual Glide Slope, and Double Threshold," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2674, no. 9, 2020.
- [83] ICAO, *Annex 14 Aerodromes - Volume I Aerodrome Design and Operations, Eighth Edition*, Montreal, Canada, 2018.
- [84] ICAO, *Doc 9365 Manual of All-Weather Operations, Fifth Edition*, Montreal, Canada, 2024.
- [85] M. Šelmić, D. Teodorović and K. Vukadinović, "Locating inspection facilities in traffic networks: an artificial intelligence approach," *Transportation Planning and Technology*, vol. 33, no. 6, p. 481–493, 2010.
- [86] L. Duckstein, Multiobjective optimization in structural design:the model choice problem. In: E. Atrek, R.H. Gallagher, K.M. Ragsdell, and O.C. Zienkiewicz, eds. *New directions in optimum structural design.*, John Wiley, 459-448., 1985.
- [87] N. Dunford and J. T. Schwartz, *Pure and Applied Mathematics - Linear Oprators*, vol. VII, R. Courant, L. Bers and J. J. Stoker, Eds., New York, NY: Interscience Publishers, Inc., 1958.
- [88] R. R. Đukić, "Metod vektora sličnosti varijanata idealnom rešenju," *Vojnotehnički glasnik*, vol. 64, no. 1, pp. 45-74, 2016.
- [89] J. J. Vuleta, "Višekriterijumska optimizacija izbora izvođača projekta," *Economic Annals*, vol. 44, no. 157, pp. 7-40, 2003.
- [90] M. Vujošević, *Metode optimizacije u inženjerskom menadžmentu*, Beograd: Akademija inženjerskih nauka Srbije, Odeljenje rudarskih i geoloških nauka; Fakultet organizacionih nauka, 2012.
- [91] C. Blum, M. J. B. Aguilera, A. Roli and M. Sampels, Eds., *Hybrid Metaheuristics - An Emerging Approach to Optimization*, *Studies in Computational Intelligence (SCI)* ed., vol. 114, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [92] C. Blum, J. Puchinger and G. R. Raidl, "Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization - A survey," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 6, pp. 4135-4151, 2011.

- [93] C. Blum and G. R. Raidl, *Hybrid Metaheuristics - Powerful Tools for Optimization*, Artificial Intelligence: Foundations, Theory, and Algorithms ed., Cham, Switzerland: Springer, 2016.
- [94] G. Beni and J. Wang, "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems," in *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?*, NATO ASI Series ed., P. Dario, G. Sandini and P. Aebischer, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 1993, p. 703–712.
- [95] A. H. Bond and L. Gasser, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, 1st ed., San Mateo, CA: Morgan Kaufman Publishers Inc., 1988.
- [96] Y. Yonezawa and T. Kikuchi, "Ecological algorithm for optimal ordering used by collective honey bee behavior," in *Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1996.
- [97] T. Sato and M. Hagiwara, "Bee System: finding solution by a concentrated search," in *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, Orlando, FL, 1997.
- [98] T. Davidović, D. Teodorović and M. Šelmić, "Bee Colony Optimization - Part I: The Algorithm Overview," *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. Number 1, no. 25, pp. 33-56, 2015.
- [99] H. A. Abbass, "Marriage in Honey-Bee Optimization (MBO): A Haplometrosis polygynous Swarming Approach," in *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC2001)*, Seoul, South Korea, 2001.
- [100] H. F. Wedde, M. Farooq and Y. Zhang, "BeeHive: An Efficient Fault-Tolerant Routing Algorithm Inspired by Honey Bee Behavior," in *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence (ANTS 2004)*, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) ed., vol. 3172, M. Dorigo, M. Birattari, C. Blum, L. M. Gambardella, F. Mondada and T. Stützle, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2004, pp. 83-94.
- [101] S. Nakrani and C. Tovey, "On Honey Bees and Dynamic Server Allocation in Internet Hosting Centers," *Adaptive Behavior*, vol. 12, no. 3-4, pp. 223-240, 2004.
- [102] D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization," Kayseri, Türkiye, 2005.
- [103] H. Drias, S. Sadeg and S. Yahi, "Cooperative Bees Swarm for Solving the Maximum Weighted Satisfiability Problem," in *Computational Intelligence and Bioinspired Systems (IWANN 2005)*, Lecture Notes in Computer Science (LNTCS) ed., vol. 3512, J. Cabestany, A. Prieto and F. Sandoval, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2005, pp. 318-325.
- [104] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim and M. Zaidi, "The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems," in *Intelligent Production Machines and Systems*, 2nd I*PROMS Virtual International Conference ed., D. T. Pham, E. E. Eldukhri and A. J. Soroka, Eds., Elsevier Science, 2011, pp. 454-459.
- [105] D. T. Pham, A. J. Soroka, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri and M. Packianather, "Optimising Neural Networks for Identification of Wood Defects Using the Bees Algorithm," in *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Singapore, 2006.
- [106] A. Afshar, O. Bozorg-Haddad, M. A. Mariño, B. J. Adams and A. M. Afshar, "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 344, no. 5, pp. 452-462, 2007.
- [107] C. Yang, J. Chen and X. Tu, "Algorithm of Fast Marriage in Honey Bees Optimization and Convergence Analysis," in *2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, China, 2007.

- [108] X.-S. Yang , "Engineering Optimizations via Nature-Inspired Virtual Bee Algorithms," in *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach (IWINAC 2005)*, Lecture Notes in Computer Science (LNTCS) ed., vol. 3562, J. Mira and J. R. Álvarez, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2005, pp. 317-323.
- [109] D. Teodorović, "Bee Colony Optimization (BCO)," in *Innovations in Swarm Intelligence*, Studies in Computational Intelligence (SCI) ed., vol. 248, L. Peng Chee, J. C. Lakhmi and D. Satchidananda, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 39-60.
- [110] P. Lučić and D. Teodorović, "Bee system: Modeling combinatorial optimization transportation engineering problems by swarm intelligence," in *Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis*, Sao Miguel, Azores Islands, Portugal, 2001.
- [111] D. Teodorović and M. Dell Orco, "Bee colony optimization - A cooperative learning approach to complex transportation problems," in *Proceedings of the 16th Mini-EURO Conference on Advanced OR and AI Methods in Transportation*, Poznan, Poland, 2005.
- [112] D. Teodorović, M. Šelmić and T. Davidović, "Bee Colony Optimization Part II: The Application Survey," *Yugoslav Journal of Operations Research*, vol. 25, no. 2, p. 185–219, 2015.
- [113] P. Lučić and D. Teodorović, "Transportation modeling: an artificial life approach," in *2002 IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2002)*, Washington, DC, 2002.
- [114] P. Lučić and D. Teodorović, "Computing with bees: Attacking complex transportation engineering problems," *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 12, no. 3, pp. 375-394, 2003.
- [115] L.-P. Wong, C. S. Chong and M. Y. Hean Low, "Bee Colony Optimization with local search for traveling salesman problem," in *2008 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Daejeon, South Korea, 2008.
- [116] L.-P. Wong, M. Y. Hean Low and C. S. Chong, "An efficient Bee Colony Optimization algorithm for Traveling Salesman Problem using frequency-based pruning," in *2009 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Cardiff, UK, 2009.
- [117] L.-P. Wong, M. Y. Hean Low and C. S. Chong, "Bee colony optimization with local search for traveling salesman problem," *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 19, no. 3, pp. 305-334, 2010.
- [118] P. Lučić and D. Teodorović , "Vehicle Routing Problem With Uncertain Demand at Nodes: The Bee System and Fuzzy Logic Approach," in *Fuzzy Sets Based Heuristics for Optimization*, Studies in Fuzziness and Soft Computing (STUDFUZZ) ed., vol. 126, J. Verdegay, Ed., Berlin, Heidelberg, Springer, 2003, pp. 67-82.
- [119] G. Marković, . D. Teodorović and V. Aćimović-Raspopović, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks based on the bee colony optimization," *AI Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 273-285, 2007.
- [120] T. Davidović, D. Ramljak, M. Šelmić and D. Teodorović, "Bee colony optimization for the p-center problem," *Computers & Operations Research*, vol. 38, no. 10, pp. 1367-1376, 2011.
- [121] M. Šelmić, E. Praveen and D. Teodorović, "Bee colony optimization approach to optimize locations of traffic sensors on highways," *Tehnika*, vol. 55, no. 6, pp. 9-15, 2008.
- [122] B. Dimitrijević, D. Teodorović, V. Simić and M. Šelmić, "Bee Colony Optimization Approach to Solving the Anticovering Location Problem," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 759-768, 2011.

- [123] D. Teodorović and M. Šelmić, "The BCO algorithm for the p-median problem," in *Proceedings of the 34th International Symposium on Operational Research (SYM-OP-IS 2007)*, Zlatibor, Serbia, 2007.
- [124] M. F. Sohi, M. Shirdel and A. Javidaneh, "Applying BCO algorithm to solve the optimal DG placement and sizing problem," in *5th International Power Engineering and Optimization Conference*, Shah Alam, Malaysia, 2011.
- [125] T. Levanova and E. A. Tkachuk, "Development of a Bee Colony Optimization Algorithm for the Capacitated Plant Location Problem," in *II International Conference - Optimization and Applications (OPTIMA-2011)*, Petrovac, Montenegro, 2011.
- [126] T. Davidović, M. Šelmić and D. Teodorović, "Scheduling independent tasks: Bee Colony Optimization approach," in *17th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Thessaloniki, Greece, 2009.
- [127] T. Davidović, M. Šelmić, D. Teodorović and D. Ramljak, "Bee colony optimization for scheduling independent tasks to identical processors," *Journal of Heuristics*, vol. 18, pp. 549-569, 2012.
- [128] D. Teodorović and M. Dell Orco, "Mitigating Traffic Congestion: Solving the Ride-Matching Problem by Bee Colony Optimization," *Transportation Planning and Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 135-152, 2008.
- [129] A. P. Pertiwi and P. Suyanto, "Globally evolved dynamic bee colony optimization," in *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, Part I - 15th International Conference (KES 2011)*, Kaiserslautern, Germany, Lecture Notes in Computer Science (LNAI) ed., vol. 6881, A. König, A. Dengel, K. Hinkelmann, K. Kise, R. J. Howlett and L. C. Jain, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 52-61.
- [130] Z. Mousavinasab, R. Entezari-Maleki and A. Movaghar, "A Bee Colony Task Scheduling Algorithm in Computational Grids," in *Digital Information Processing and Communications (ICDIPC 2011)*, Communications in Computer and Information Science ed., vol. 188, V. Snasel, J. Platos and E. El-Qawasmeh, Eds., Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 200-210.
- [131] R. Nedeljković, S. Mitrović and D. Drenovac, "Bee colony optimization meta-heuristic for backup allocation problem," in *Zbornik radova XXVII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju (PosTel 2009)*, Belgrade, Serbia, 2009.
- [132] N. Kovač, "Bee Colony Optimization Algorithm for the Minimum Cost Berth Allocation Problem," in *Proceedings of the XI Balkan Conference on Operational Research, (BALCOR 2013)*, Zlatibor, Serbia, 2013.
- [133] D. Teodorović, M. Šelmić and L. Mijatović-Teodorović, "Combining case-based reasoning with Bee Colony Optimization for dose planning in well differentiated thyroid cancer treatment," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 6, pp. 2147-2155, 2013.
- [134] M. Saidi, N. Mostoufi and R. Sotudeh-Gharebagh, "Modelling and optimisation of continuous catalytic regeneration process using bee colony algorithm," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 91, no. 7, pp. 1256-1269, 2012.
- [135] M. Nikolić and D. Teodorović, "Transit network design by Bee Colony Optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 15, pp. 5945-5955, 2013.
- [136] M. Nikolić and D. Teodorović, "Empirical study of the Bee Colony Optimization (BCO) algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 11, pp. 4609-4620, 2013.
- [137] T. Stojanović, T. Davidović and Z. Ognjanović, "Bee colony optimization for the satisfiability problem in probabilistic logic," *Applied Soft Computing*, vol. 31, pp. 339-347, 2015.

- [138] T. Jakšić Krüger, "On the convergence of the bee colony optimization meta-heuristic," in *Proceeding of the IV Symposium Mathematics and Applications*, Belgrade, Serbia, 2013.
- [139] T. Jakšić Krüger, T. Davidović, D. Teodorović and M. Šelmić, "The bee colony optimization algorithm and its convergence," *International Journal of Bio-Inspired Computation*, vol. 8, no. 5, pp. 340-354, 2016.
- [140] T. Davidović, J. Tatjana, D. Ramljak, M. Šelmić and D. Teodorović, "Parallelization strategies for bee colony optimization based on message passing communication protocol," *Optimization*, vol. 62, no. 8 - Advances in Discrete Optimization, pp. 1113-1142, 2013.
- [141] T. Davidović, D. Ramljak, M. Šelmić and D. Teodorović, "MPI parallelization of bee colony optimization," in *Proceedings of the 1st International Symposium & 10th Balkan Conference on Operational Research (BALCOR 2011)*, Thessaloniki, Greece, 2011.
- [142] K. von Frisch, *The dance language and orientation of bees*, First ed., Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press, 1967.
- [143] Nobel Foundation, "The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1973," [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1973/summary/>.
- [144] C. Thom, D. C. Gilley, J. Hooper and H. E. Esch, "The scent of the waggle dance," *PLoS Biology*, vol. 5, no. 9, 2007.
- [145] F. C. Dyer, "The Biology of the Dance Language," *Annual Review of Entomology*, vol. 47, pp. 917-949, 2002.
- [146] T. Stojanović, *Razvoj i analiza metaheurističkih metoda za ispitivanje zadovoljivosti formula u verovatnosnim logikama*, PhD dissertation, University of Kragujevac, 2015.
- [147] A. Jovanović and D. Teodorović, "Fixed-Time Traffic Control at Superstreet Intersections by Bee Colony Optimization," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2676, no. 4, pp. 228-241, 2022.
- [148] M. Nikolić and D. Teodorović, "Rešavanje problema trgovačkog putnika metaheuristicom Optimizacija kolonijom pčela," in *Proceedings of the 42nd Symposium on Operational Research (SYM-OP-IS 2015)*, Silver Lake Resort, Serbia, 2015.
- [149] M. Nikolić and D. Teodorović, "Mitigation of disruptions in public transit by Bee Colony Optimization," *Transportation Planning and Technology*, vol. 42, no. 6, pp. 573-586, 2019.
- [150] M. Nikolić, M. Šelmić, D. Macura and J. Čalić, "Bee Colony Optimization metaheuristic for fuzzy membership functions tuning," *Expert Systems with Applications*, vol. 158, p. 113601, 2020.
- [151] H. Anton and C. Rorres, *Elementary Linear Algebra - Applications Version*, 11th ed., Wiley, 2014.
- [152] M. Berg, O. Cheong, M. Kreveld and M. Overmars, *Computational Geometry - Algorithms and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [153] ICAO, *Doc 9906 Quality Assurance Manual for Flight Procedure Design, Volume 3 - Flight Procedure Design Software Validation, First Edition*, Montreal, Canada, 2010.
- [154] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th, Ed., Wiley, 2019.
- [155] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th, Ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [156] SMATSA, "eAIP Serbia / Montenegro," 2023. [Online]. Available: <https://smatsa.rs/en/aip-2/>. [Accessed 15 June 2023].

- [157] Flight Safety Foundation, "Inflight Icing and the Helicopter," *Helicopter Safety*, vol. 16, no. 6, pp. 1-3, 1990.
- [158] EASA, "Artificial Intelligence Roadmap 2.0: Human-centric approach to AI in aviation," Cologne, Germany, 2023.
- [159] P. Lanzi, E. Spiller, M. Jameel, L. Christoffels, G. Gigante and R. Esposito, "Challenges and new Directions for the Certification," in *SESAR Innovation Days 2024*, Rome, Italy, 2024.
- [160] MITRE, „On-Board Performance Monitoring and Alerting (OPMA) - Airborne System Calculations, Statistical Meaning and Relationships to Separation Standards Development,“ 2009.
- [161] F. Netjasov and O. Babić, *Kontrola letenja 2 - Postupci instrumentalnih prilaza i odleta*, III ed., Beograd: Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, 2021.
- [162] EUSPA, "EGNOS Safety of Life (SoL) for Aviation Service Definition Document (SDD), Issue 3.6," Prague, Czech Republic, 2024.
- [163] ICAO, *Annex 10 Aeronautical Telecommunications - Volume I Radio Navigation Aids, Eighth Edition*, Montreal, Canada, 2023.
- [164] EASA, *Easy Access Rules for Air Operations (Commission Regulation (EU) No 965/2012)*, Cologne, Germany, 2023.

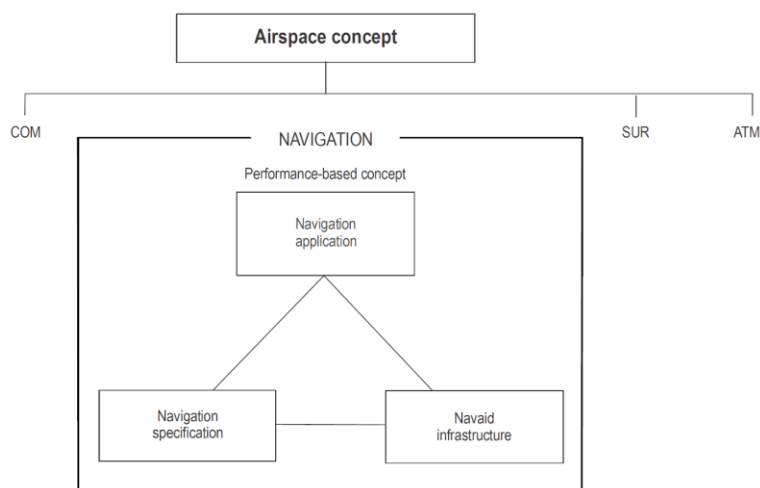
ПРИЛОГ 1 – PBN концепт

Основни елементи

PBN концепт је развијен од стране Међународне организације цивилног ваздухопловства (International Civil Aviation Organization - ICAO) како би се уредио домен ваздухопловне навигације, који је почетком деведесетих година прошлог века био у наглој експанзији, и обезбедила неометана примена нових и различитих технологија. Одбачен је приступ прописивања обавезне опреме ваздухоплова и усвојен нови приступ, који дефинише захтеве по питању перформанси уређаја и система. На овај начин је осигуран неометан развој технологије и могућност избора економски исплативијих решења, са већим степеном употребљивости.

PBN концепт је дефинисан у оквиру [7] и чине га три основна елемента (Слика 81):

- **навигациона спецификација** (navigation specification),
- **навигациона инфраструктура** (navigation infrastructure) и
- **примена навигације** (navigation application).



Слика 81. Елементи PBN концепта

Навигациона спецификација дефинише захтеве перформанси које ваздухоплови морају да испуне приликом обављања лета у одређеном ваздушном простору или дуж одређене руте. Ови захтеви се односе на прецизности (accuracy), интегритет (integrity), континуитет (continuity) и доступност (availability) навигационих система, као и неопходне функционалности за обављање посебних операција (нпр. заокрет ваздухоплова са константним радијусом - Radius-to-Fix (RF) leg, и сл.).

Навигациона инфраструктура се односи на расположива навигациона средства (тзв. сензоре на земљи и у ваздуху), која пружају помоћ при испуњавању навигационих перформанси дефинисаних у оквиру навигационих спецификација, омогућавајући позиционирање и вођење ваздухоплова у различитим оперативним окружењима.

Земаљска навигациона средства (нпр. VOR - VHF Omnidirectional Radio Range и DME - Distance Measuring Equipment) се постепено мењају и допуњују модерним сателитским системима (укључујући нпр. глобалне GPS - Global Positioning System и Galileo системе, подржане аугментационим системима, као што су WAAS - Wide Area Augmentation System и EGNOS). Ови системи у сарадњи са постојећим системима на ваздухопловима, као што је систем инерцијалне навигације (Inertial Navigation Systems - INS), представљају главну снагу модерног PBN концепта.

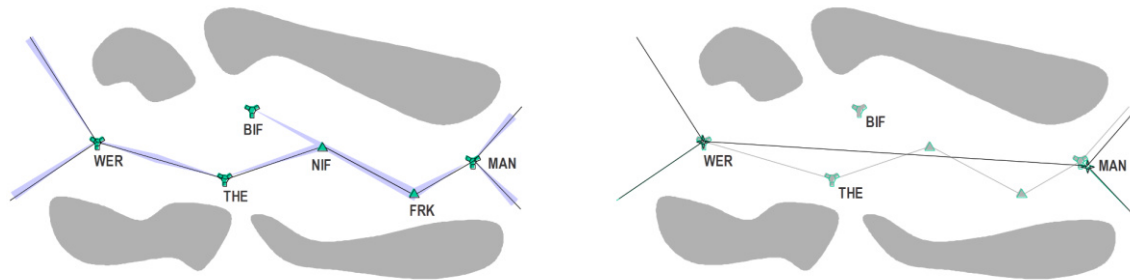
Примена навигације се односи на специфичан начин на који су предности PBN концепта искоришћене за унапређење операција летења у одређеном ваздушном простору. Огледају се кроз имплементацију IFP у складу са изабраном навигационом спецификацијом, са циљем унапређења обављања операција летења у одређеној фази лета.

Заједно, ова три елемента обезбеђују постизање предвиђених циљева и ефеката коришћења PBN у оквиру модерног управљања ваздушним саобраћајем.

Навигационе спецификације

У зависности од типа система просторне навигације, разликујемо две навигационе спецификације: RNAV (area navigation) и RNP (required navigation performance).

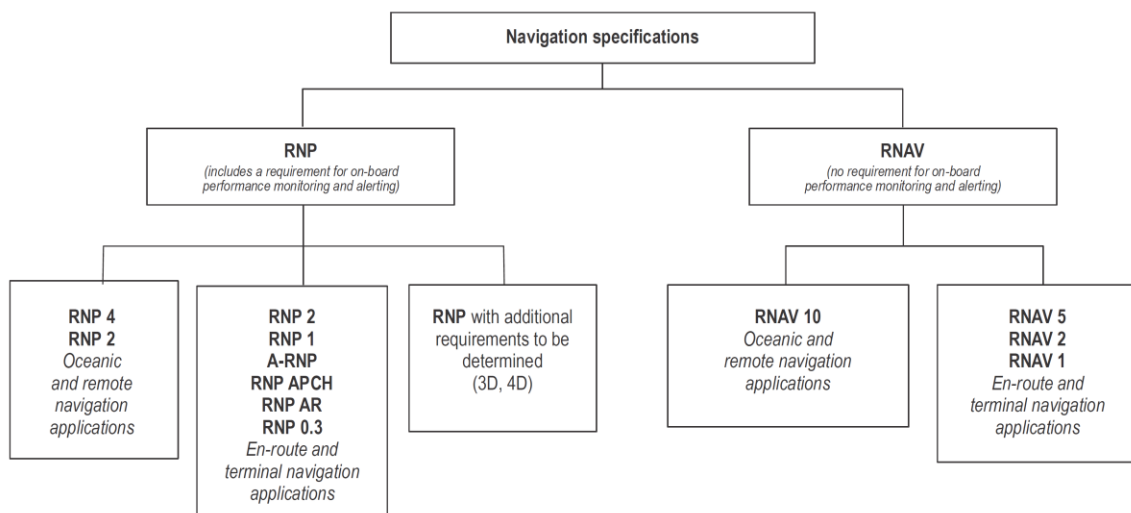
RNAV систем представља навигациони систем који омогућава неометано обављање операција ваздухоплова на жељеним путањама, у оквиру домета референтног навигационог средства и/или у оквиру граница могућности опреме у ваздухоплову. Путање летења су дефинисане тачкама на путу, чије позиције не зависе од локација земаљских навигационих средстава (Слика 82, извор [7]).



Слика 82. Конвенционалне (лево) и PBN (десно) путање

RNP систем припада напредним RNAV навигационим системима, уз основу разлику да подразумева постојање опреме у ваздухоплову чији је задатак надгледање сопствених навигационих перформанси и упозоравање летачке посаде када су оне изван прописаних граница (тзв. On-board performance monitoring and alerting (ОВРМА) способност). Такође, RNP систем и навигационе спецификације су у потпуности засновани на употреби сателитских сигнала, и једини имају примену у завршној фази лета, код IAP.

Избор одговарајуће навигационе спецификације је процес који захтева ангажовање стручњака различитих профила, чији је задатак да задовоље циљеве постављеног концепта ваздушног простора по питању безбедности, капацитета и ефикасности одвијања саобраћаја. Поред фазе лета у којој се примењује, на избор навигационе спецификације утичу и захтеви корисника ваздушног простора (цивилни, војни саобраћај, генерална авијација и сл.), опремљеност ваздухоплова, навигациона инфраструктура, као и постојање других сервиса (комуникација и надзор, системи за управљање ваздушним саобраћајем и др.). Подела навигационих спецификација је дата на следећој слици (Слика 83, извор [7]).



Слика 83. Приказ врста навигационих спецификација

Табела 47 даје детаљнији приказ захтева прецизности (у NM) према навигационим спецификацијама по фази лета [7].

Табела 47. Приказ захтева према навигационим спецификацијама и фази лета

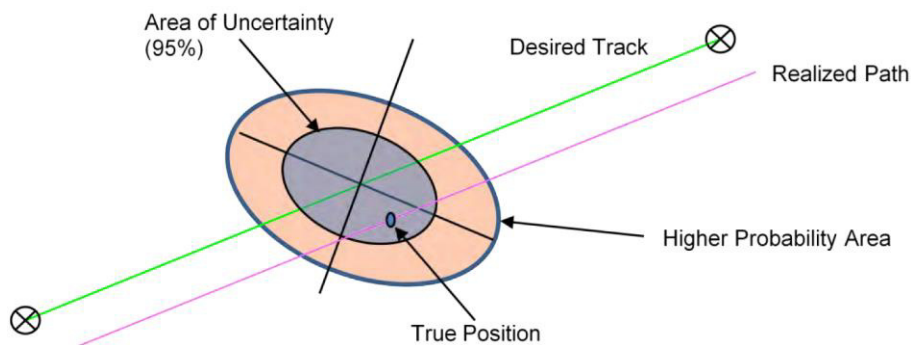
Nav Spec	Flight Phase							
	Oceanic / Remote	En-route	Arrival	Approach				Departure
				Initial	Intermediate	Final	Missed ¹	
RNAV 10	10							
RNAV 5		5	5 ²					
RNP 4	4							
RNP 2	2	2						
RNAV 2		2	2					2
Advanced RNP³	2	2 / 1	1 - 0.3	1 - 0.3	1 - 0.3	0.3	1 - 0.3	1 - 0.3
RNP 1			1	1	1		1	1
RNAV 1		1	1	1	1		1	1
RNP 0.3 (Cat H)		0.3	0.3	0.3	0.3		0.3	0.3
RNP APCH (LNAV / LNAV/VNAV)				1	1	0.3	1	
RNP APCH (LP / LPV)				1	1	Angular	1 / 0.3 - initial straight	
RNP AR APCH				1 - 0.1	1 - 0.1	0.3 - 0.1	1 - 0.1	

Напомене:

- 1 RNP захтеви се не односе на почетну и међуфазу сегмента завршног прилажења.
- 2 RNAV 5 се може користити у почетним деловима STAR процедура, на удаљености већој од 30 NM од ARP (aerodrome reference point).
- 3 Advanced RNP (A-RNP) захтеви су дефинисани у складу са RNP 2 захтевима у прекоокеанској, удаљеној и континенталном делу рутне фазе лета, док су у осталим фазама захтеви лимитирани RNP 1 захтевима, осим у завршном прилажењу (RNP 0.3); опција тзв. скалабилних захтева се може применити код IAP (осим у сегменту завршног прилажења), STAR и SID процедура, тако да захтевана прецизност може имати вредност од 0.1 до 0.3 NM, са инкрементом од 0.1 NM.

Принцип рада

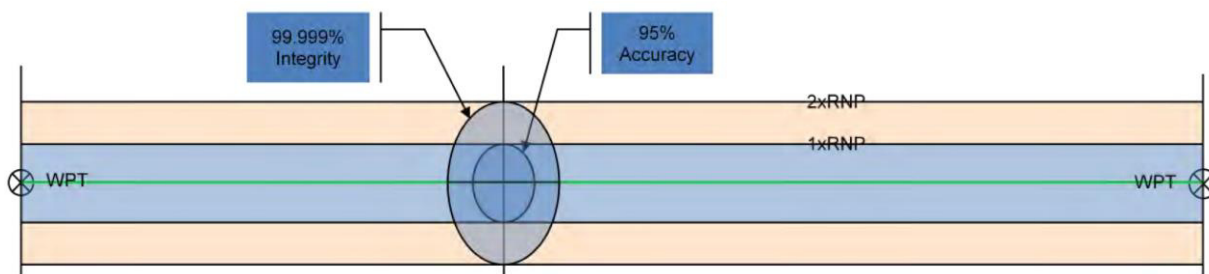
Оба типа навигационих система деле исте карактеристике по питању навигационе грешке које остварују у раду [160]. Систем просторне навигације функционише у дводимензионалном координатном систему, где се позиција одређује у односу на географску ширину и дужину (latitude/longitude). У односу на утврђену позицију врши се навигација ваздухоплова дуж дефинисане путање са одређеним степеном прецизности. Тај степен прецизности подразумева простор неизвесности (area of uncertainty) одређених димензија око стварне позиције ваздухоплова, као што је представљено на следећој слици (Слика 84, извор [160]).



Слика 84. Генерални концепт навигационе грешке RNAV система

У општем случају, у простору представљеним сивом бојом постоји 95% вероватноће да садржи стварну позицију ваздухоплова, и он се користи да дефинише **прецизност** навигационог система, дуж путање и латерално (along track - АТТ и cross track - ХТТ). Шири простор, наранџасте боје, представља простор веће вероватноће (99.999%) и служи да одреди границе у коме се гарантује **интегритет** система у латералним границама (ХТТ). Ово практично значи да се током лета ваздухоплов креће стварном или реализованом путањом, док се његова системска позиција помера дуж пројектоване, тј. захтеване путање.

Код RNP навигационе спецификације, изабрана RNP вредност прецизности, изражена у наутичким миљама (NM), практично утиче на ширину заштитног простора око дефинисане путање лета. У случају RNP 1 навигационе спецификације, ширина заштитног простора у вези са 95% границом износи 1 NM, а у вези са 99.999% границом износи $2 \times \text{RNP}$ (ХТТ) вредност = 2 NM, као што је приказано на следећој слици (Слика 85, извор [160]).



Слика 85. Веза прецизности RNP система и димензија заштитног простора

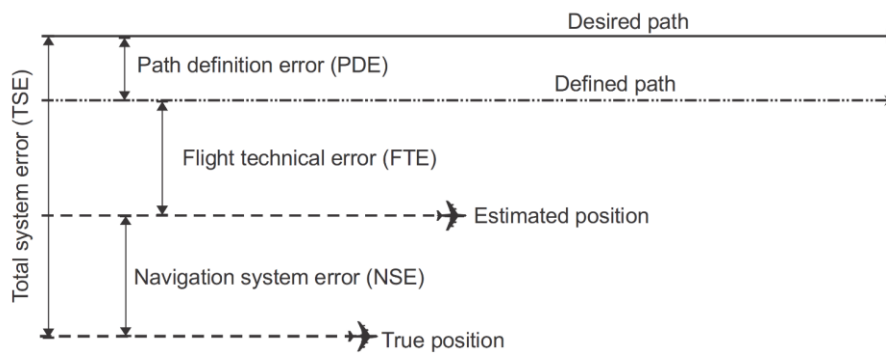
На овај начин се постављањем захтева прецизности RNP дефинишу и захтеви перформанси навигационог система по питању вредности интегритета и континуитета. Овај принцип омогућава да пројектовање процедура не зависи од типа сензора, већ се та зависност преноси на оперативно одобрење (operational approval) навигационог система и ваздухоплова. Такође, ОВРМА функција има задатак да у реалном времену процењује стварне перформансе система (actual navigation performance - ANP) и изда адекватно упозорење када ANP прелази границе задате RNP вредности.

Дефинисани захтеви прецизности подразумевају да укупна грешка навигационог система, (total system error - TSE), у најмање 95% укупног времена трајања лета буде у границама изабране RNP вредности, односно ХТТ ($TSE = \text{ХТТ}$). У односу на овај захтев сертификациона власт издаје одобрење за употребу система, односно ваздухоплова.

У општем случају TSE зависи од следећих елемената (Слика 86) [7]:

- грешке при дефинисању путање (path definition error – PDE): разлика између путање у навигационој бази навигационог система и жељене (пројектоване) путање;
- грешке пилотирања (flight technical error - FTE): способност летачке посаде или аутопилота да прати дефинисану путању, укључујући и било коју грешку која се може јавити на инструменталном приказу пилота; и

- грешке навигационог система (navigation system error - NSE): разлике између процењене и стварне позиције ваздухоплова.



Слика 86. Приказ елемената TSE

TSE се прорачунава по следећој формули [7]:

$$TSE = \sqrt{PDE^2 + FTE^2 + NSE^2} \quad (71)$$

Основна претпоставка подразумева да је TSE заснована на нормалној (гаусовој) расподели. Поред тога, PDE грешка се може занемарити приликом прорачуна, с обзиром да пројектована путања и оба система (за глобално позиционирање и навигациони систем) користе исти стандардни референтни координатни систем - *World Geodetic System 1984 (WGS-84)*, односно еквивалентни референтни модел Земље. У овом случају, на вредност TSE практично утичу FTE и NSE, при чему прва грешка има доминантан ефекат.

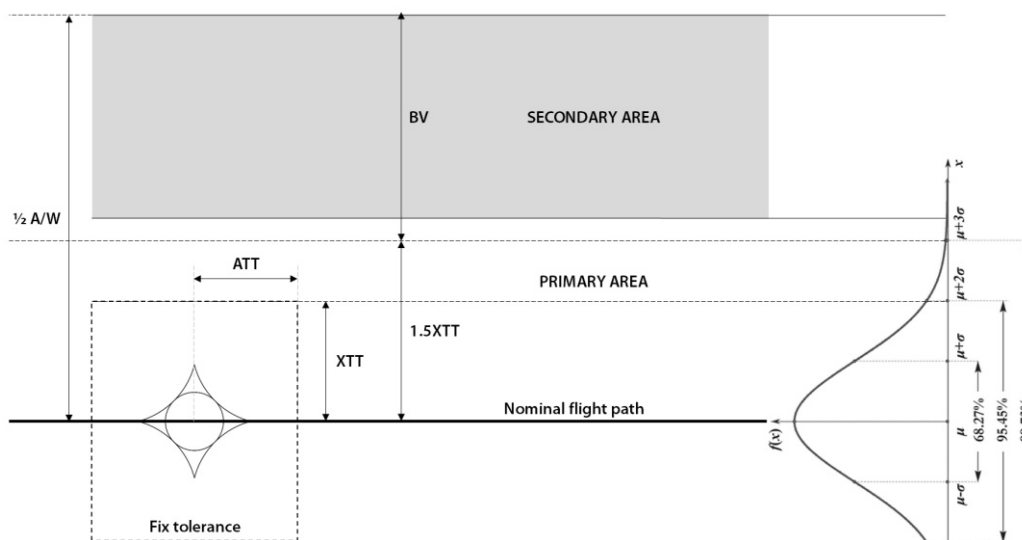
Заштитни простори

Због специфичности фазе лета, као и да би се додатно осигурало да су сви ефекти који могу утицати на безбедност летења узети у обзир, за дефинисање граница заштитног простора се у појединим случајевима користе додатне заштитне вредности, тако да латерална полуширина простора може превазићи вредност од $2 \times RNP$ (ОВРМА функција и даље мора да задовољи захтев да врши упозоравање летачких посада када је вероватноћа да ће TSE превазићи $2 \times RNP$ вредност већа од 1×10^{-5}).

Основна идеја приликом утврђивања граница заштитног простора подразумева да $\frac{1}{2} A/W$ обухвати простор у коме ће се популација ваздухоплова која користи процедуру наћи у најмање 99.7% времена летења. Ова вредност одређена је у складу са тзв. правилем 3σ (3σ rule), које прописује три интервала код нормалне расподеле, дефинисана вредношћу једне, две и три стандардне девијације (σ - сигма): 68%, 95% и 99.7% (респективно). Овај простор је увећан за додатну вредност - *buffer value (BV)*, заснованом на карактеристикама ваздухоплова (брзина, могућност маневрисања, итд.) и фазе лета (време реакције пилота, и сл.), да би се у обзир узели и потенцијални прелази преко вредности од 3σ TSE (Слика 87). Коначна формула за прорачун $\frac{1}{2} A/W$ гласи [4]:

$$\frac{1}{2} \frac{A}{W} = 1.5 \cdot XTT + BV \quad (72)$$

где $1.5XTT$ одговара вредности од 3σ TSE.

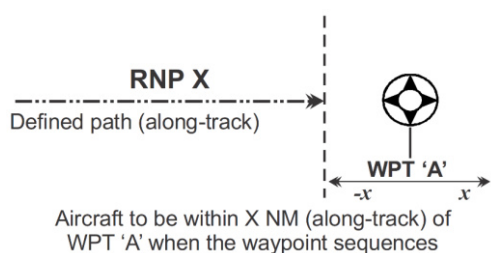


Слика 87. Принцип утврђивања граница заштитног простора

Захтеви лонгитудиналне прецизности (ATT) су, такође, у директној вези са вредношћу TSE, према следећој формули [4]:

$$ATT = 0.8 \cdot TSE \quad (73)$$

ATT дефинише толеранцију фикса, тј. путне тачке дуж путање, као што је представљено на следећој слици (Слика 88, извор [7]).



Слика 88. Навигациона грешка дуж путање

Предности

PBN концепт поседује низ предности у односу на конвенционални метод навигације [7]:

- навигација није више базирана на фиксним локацијама уређаја, већ је обезбеђено летење по жељеним путањама, са мањим оперативним и трошковима одржавања уређаја и IFP;
- обезбеђен је нови, виши ниво флексибилности за пројектовање IFP;
- са аспекта летачких посада, радно оптерећење је мање - омогућено је учитавање плана лета у RNAV систем за обављање летења путем аутопилота и једноставну транзицију ваздухоплова између различитих делова путање лета;
- поједностављење и стандардизација поступка добијања оперативних одобрења за ваздухопловне операторе, у односу на коначан скуп навигационих спецификација намењен за глобалну употребу;
- све навигационе информације су приказане летачкој посади у кабини: растојање и смер до следеће тачке, бочно одступање од пројектоване путање лета и остало;
- већа ефикасност коришћења ваздушног простора – омогућено креирање директних путања, уз смањење потрошње горива и емисије штетних гасова, додатне могућности за смањење утицаја буке и сл.

PBN процедуре су у знатно већој мери стандардизоване него конвенционалне. То је један од предуслова за употребу у навигационим базама и системима на ваздухоплову. Стандардизација такође пружа веће могућности по питању аутоматизације процеса пројектовања процедура.

ПРИЛОГ 2 – EGNOS систем

Системи за побољшање сигнала сателита (satellite-based augmentation systems - SBAS) представљају један од три типа система чији је задатак да смање грешку позиционирања, насталу код глобалних навигационих сателитских система (global navigation satellite systems - GNSS), у највећој мери услед ефеката јоносфере, утицаја броја и геометрије расположивих сателита, као и утицаја соларних ветрова и гравитације. Поред њих постоје и системи за побољшање сигнала на земљи (ground-based augmentation systems - GBAS) и системи за побољшање сигнала на ваздухоплову (airborne-based augmentation systems - ABAS) [161].

Код **GBAS** система грешка GNSS сигнала се мери уређајима на земљи, и трансмитује корисницима у околини аеродрома слетања. Најчешћа **ABAS** техника која користи искључиво GNSS информације назива се аутономно праћење интегритета пријемника (Receiver Autonomous Integrity Monitoring - RAIM). RAIM представља софтверски алгоритам код GNSS пријемника, који на аутономан начин открива грешку приликом одређивања 3D позиције ваздухоплова (неопходно пет доступних сателита), али и сателит који је генерише (код модернијих верзија; неопходно шест доступних сателита).

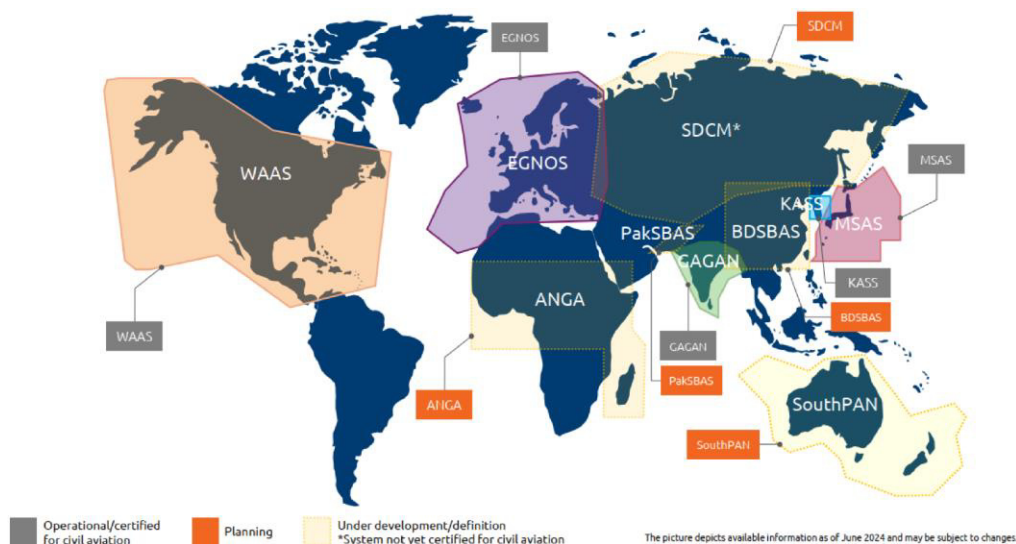
Тренутно су заступљена четири GNSS, од којих су само прва два потпуно оперативна:

- амерички **GPS** (Global Positioning System),
- руски **GLONASS** (GLObal Navigation Satellite System),
- европски **GALILEO**, и
- кинески **BEIDOU**;

као и пет SBAS система:

- **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) у Европи,
- **WAAS** (Wide Area Augmentation System) у САД,
- **MSAS** (Multi-functional Satellite Augmentation System) у Јапану,
- **GAGAN** (GPS-Aided GEO Augmented Navigation) у Индији, и
- **KASS** (Korea Augmentation Satellite System) у Јужној Кореји;

док је у процедури развоја још низ регионалних система у Кини, Русији, Африци, Пакистану, као и у Аустралији са Новим Зеландом (Слика 89, извор [162]).

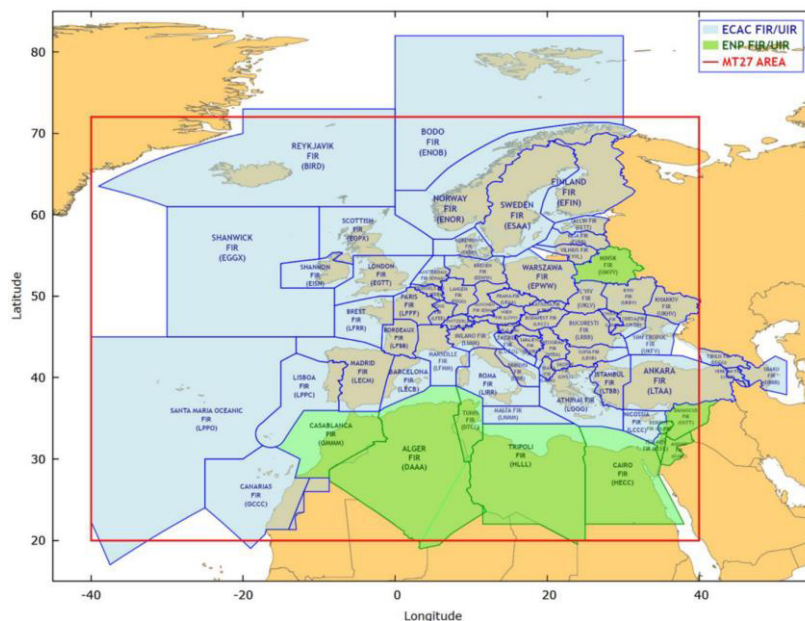


Слика 89. Постојећи и планирани SBAS системи

SBAS системи су дизајнирани да у значајној мери побољшају прецизност и интегритет навигације, и да корисницима у року од 6 до 10 секунди издају упозорење о неисправности GNSS.

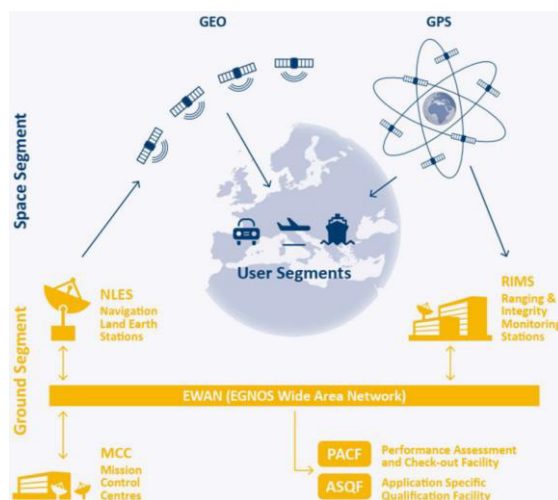
EGNOS систем је, као и остали SBAS системи, пројектован да побољша (аугментује) сирови сигнал који потиче са тренутне констелације сателита, емитујући додатни сигнал са тзв.

геостационарних (GEO) сателита. EGNOS систем располаже са три GEO сателита, лоцирана изнад екваторијалног појаса Африке, који емитују сигнал у оквиру L1 фреквенцијског опсега (1575.42 MHz). Њихов рад је организован на начин да у сваком тренутку два од три GEO сателита емитују оперативан сигнал, док трећи емитује тестни сигнал. Овакав приступ омогућава неометану замену оперативних сателита у случају прекида рада, што доприноси високом нивоу редундантности у оквиру целог простора пружања услуге (Слика 90, извор [162]).



Слика 90. EGNOS простор пружања услуга

Поред просторне компоненте, EGNOS архитектура се састоји и од мреже фиксираних земаљских станица за мониторингање, са прецизно измереним координатама (Слика 91, извор [162]), које се називају Ranging Integrity Monitoring Stations (RIMS). Ове станице, којих има укупно 38 (Слика 92, извор [162]), имају задатак да примaju GNSS сигнал, и да сваке секунде сирове податке шаљу ка два центра за контролу и процесуирање - Mission Control Centres (MCC). У њима се на основу разлике у одређивању позиције (упоређује се стварна позиција RIMS са оном добијеном преко сателитског пријемника) утврђује ниво грешке, који се потом, заједно са поруком о статусу сателита (интегритет), шаљу ка тзв. Navigation Land Earth Stations (NLES), којих има по две за сваки GEO. Задатак NLES станица је да даље врше трансмисију EGNOS порука ка GEO сателитима, који их даље емитују ка крајњим корисницима, односно њиховим EGNOS пријемницима у ваздухопловима. Комуникација свих земаљских елемената EGNOS система се остварује преко тзв. EGNOS Wide Area Network (EWAN).



Слика 91. Архитектура EGNOS система



Слика 92. EGNOS RIMS локације

Подршку неведеним центрима и станицама пружају два додатна елемента, под називом Performance Assessment and Checkout Facility (PACF) и Application Specific Qualification Facility (ASQF). Њима управља компанија ESSP (European Satellite Services Provider), која представља тренутно изабраног EGNOS оператора. Преко ова два елемента се врши оперативно планирање система и континуално спроводе процене перформанси система.

EGNOS је данас оспособљен за пружање подршке GPS и GALILEO сателитским системима у различитим доменама примене, који обухватају ваздухопловство, поморство, железнички и друмски саобраћај, као и пољопривредне активности. У оквиру домена ваздухопловства, пружа се тзв. Safety of Life (SoL) услуга, која обезбеђује највиши ниво перформанси сигнала у простору (Signal-In-Space - SIS), који је у складу са прописаним ICAO стандардима и препорученом праксом (Standards and Recommended Practices - SARPs) за SBAS системе [163].

Основни циљ EGNOS SoL услуге за ваздухопловство је да пружи подршку имплементацији PBN операција. У том смислу, примат имају LPV CAT I процедуре, за прецизно прилажење, али EGNOS даје подршку и NPA и APV процедурама у оквиру RNP APCH навигационе спецификације. У општем случају, прецизност позиционирања у овим применама иде до 1-2 m хоризонтално и до 3-5 m вертикално.

Главне користи примене EGNOS система се огледају у омогућавању већег броја слетања у отежавајућим временским условима, као и на слабије опремљеним аеродромима, чиме се увећавају капацитети аеродрома и дају веће опције ваздухопловним компанијама. Такође, флексибилност приликом пројектовања процедура даје могућност за успостављање ефикаснијих путања, чиме се утиче и на факторе заштите животне средине. Додатно, увођење процедура базираних на EGNOS систему даље олакшава повлачење из оперативне употребе значајног дела земаљске инфраструктуре, чиме се, поред великих уштеда на трошковима куповине и одржавања опреме и парцела, ослобађа део загушеног радио спектра за друге примене.

Један од најважнијих аспеката се односи на смањење радног оптерећења контролора летења и летачких посада, што посредно води и ка повећању нивоа безбедности обављања ваздушног саобраћаја. Заштитни простори EGNOS процедура, који се не преклапају у латералним границама, обезбеђују адекватно раздвајање ваздухоплова на стратешком нивоу. Тиме се умањује број задатака које извршавају контролори летења при чему се њихова пажња може усмерити на друге активности. Летачке посаде обављају операције у односу на процедуре које поседују стандардизовану структуру, са већим нивоом прецизности и поузданости у односу на конвенционалне процедуре.

ПРИЛОГ 3 – Методи пројектовања IFR

У документу [4] дефинисана су три општа метода за пројектовање процедура:

- 1) Ручни метод (manual);
- 2) Метод примене комерцијалних програмских алата (commercial off-the-shelf software – COTS);
- 3) Метод примене специјализованих програмских алата (custom-made software).

Ручни метод подразумева спровођење прорачуна и конструкцију процедура самостално, на ручни начин, од стране пројектанта. Пројектовање се извршава на подлози одговарајућег типа (најчешће провидан паус папир), уз употребу одговарајућих врста оловака, лењира, шестара и калкулатора, где се подаци о препрекама проверавају постављањем фотокопија топографских карата, различите размере, испод папира на коме се ради. Овај метод се због велике непрецизности, углавном више не користи, осим за потребе обуке нових пројектаната.

Метод примене комерцијалних програмских алата обично подразумева употребу комерцијалних софтвера, чија је намена првенствено у домену графичког дизајна или управљања просторним подацима (нпр. група софтвера за помоћ пројектовања путем рачунара (computer-aided design - CAD) или географски информациони системи (geographic information system - GIS) и сл.). Овакви програмски пакети обезбеђују лакшу и прецизнију манипулацију ваздухопловних података у електронском облику и омогућавају бржу припрему и примену шаблона за пројектовање појединих елемената процедура, као и визуелно представљање резултата. Поред тога, дозвољавају и додавање сопственог програмског кода, који се може искористити за додатно повећање ефикасности процеса пројектовања. Пре употребе, функције ових алата које се користе за конструкцију процедура, морају бити проверене у складу са документом [153], како би се осигурала усклађеност са примењивим критеријумима.

Метод примене специјализованих програмских алата подразумева употребу аутоматизованих софтвера који су посебно развијени за потребе пружања помоћи приликом пројектовања процедура. Рад ових алата се мора посебно валидирати према правилима постављеним у [153], а сама употреба мора бити у складу са корисничким упутствима. Други начин валидације функција ових алата може подразумевати примене принципа из домена система управљања безбедношћу (Safety Management System - SMS), који се односе на Систем осигурања безбедности софтвера (Software Safety Assurance System). Овај систем се састоји од низа захтева које софтвери морају да испуне по питању нивоа сигурности, уверења о верификацији, и конфигурације софтвера и сл. Ови захтеви су обично прописани на регионалном или глобалном регулаторном нивоу, са додатним циљем, да се поред осигуравања безбедности, обезбеди и интероперабилност употребе широм света без ограничења.

Поступак конструкције и провере процедура у односу на критеријуме се не мења у зависности од примењеног метода пројектовања. Избор примењеног метода утиче само на брзину и једноставност добијања решења.

За повећање интегритета процеса пројектовања процедура препоручује се већа примена аутоматизованих или полуаутоматизованих програмских алата. Тренутно се у свету најчешће примењује комбинована метода пројектовања, која подразумева заједничку примену комерцијалних и специјализованих алата, који су често дизајнирани као њихови посебни модули. Треба напоменути, да специјализовани алати поседују различити степен аутоматизације, и нису предвиђени за самостално пројектовање комплетних решења. У највећем броју случајева њихова примена захтева унос улазних података од стране пројектанта процедуре, на основу чега ће бити извршени: аутоматска конструкција, анализа препрека и графички приказ једног решења. Пројектант изменом улазних података проверава следеће решење до добијања задовољавајуће процедуре. Алати се разликују и по томе да ли се ограничења, у складу са прописаним PANS-OPS критеријумима, аутоматски примењују или о примењивим ограничењима улазних података мора да брине сам пројектант.

ПРИЛОГ 4 – Подела IAP

За потребе утврђивања класификације, неопходно је направити јасну разлику између процедура (**IAP**) и **операција** инструменталног прилажења. IAP су дефинисане као IFR које омогућују навигацију ваздухоплову у сегменту завршног прилажења до дефинисане вредности апсолутне/релативне висине надвишавања препрека (obstacle clearance altitude/height - OCA/H), засновану на одговарајућем типу навигационе инфраструктуре. Са друге стране, операције означавају начин на који ће операције бити изведене ваздухопловом у односу на IAP.

Према основном методу навигације, IAP се могу класификовати као [4]:

- **конвенционалне процедуре** (conventional procedures - CON) и
- **процедуре са навигацијом заснованом на могућностима ваздухоплова** (performance-based navigation – PBN).

Конвенционалне процедуре су базиране на конвенционалној навигацији, која свој рад заснива на свесмерном или усмереном емитовању радио сигнала са уређаја и система искључиво лоцираних на земљи, који се често називају земаљски радио-навигациони уређаји (ЗРНС). Сигнал се путем различитих сензора и пријемника прима на ваздухоплову и у одговарајућем облику дистрибуира у рачунар у оквиру FMS система. Из рачунара се одговарајуће излазне информације шаљу ка инструментима и навигационим приказима за потребе позиционирања и управљања ваздухопловом од стране летачких посада. Конвенционална навигација представља традиционалан метод навигације, који подразумева летење ка или од уређаја у тачно дефинисаним смеровима, што значи да су путање директно зависне од локација уређаја. За пројектовање ових процедура неопходан је већи број навигационих уређаја на земљи.

PBN процедуре су део новог концепта, базираног на тзв. просторној навигацији (area navigation - RNAV) и другим савременим технологијама, који за потребе навигације такође подразумевају употребу сигнала са различитих извора, али за разлику од конвенционалне навигације, укључујући и сигнал са сателитских система (GNSS). Друга разлика у односу на конвенционалну навигацију јесте што просторна навигација омогућава директно летење између било које две тачке дефинисане у простору, и практично може бити примењена без уређаја инсталираних на земљи, само уз помоћ пријемника сателитског сигнала у ваздухоплову.

Конвенционалне и PBN IAP се даље могу поделити у три основне врсте процедура [4]:

- **процедуре за непрецизни прилаз** (non-precision approach - NPA),
- **процедуре за прилаз са вертикалним вођењем** (approach procedure with vertical guidance - APV) - само код PBN процедура, и
- **процедуре за прецизни прилаз** (precision approach - PA).

У зависности од примарног уређаја, односно сигнала (код PBN), у односу на који је обезбеђено вођење у сегменту завршног прилажења, ове процедуре садрже низ подгрупа (Слика 93).

Конвенционалне процедуре у групи **NPA** су пре свега базиране на следећим уређајима:

- VOR (very high frequency (VHF) omnidirectional radio range) и
- LOC (localizer), који у општем случају представља део комплекснијег ILS система.

Уређај DME (distance measuring equipment) не обезбеђује самостално вођење, већ се, обично у комбинацији са другим уређајима, користи за добијање информације о косом растојању од сопствене локације. Такође, у оквиру ове групе нису поменути NDB (non-directional beacon) и VDF (very high frequency direction-finding station) уређаји, као ни SRA (surveillance radar approach) прилази, чија је оперативна употреба данас сведена на минимум.

Конвенционалне **PA** процедуре се данас највише односе на ILS (instrument landing system), који садржи три категорије (category - CAT) процедура за прецизно прилажење. Поред овог

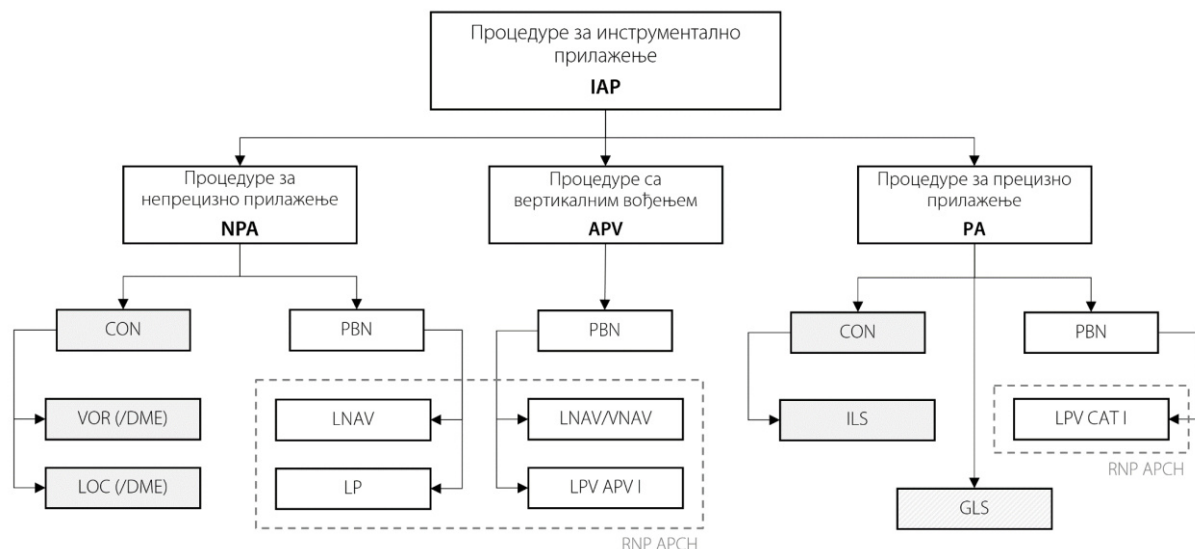
сложеног система постоје још и MLS (microwave landing system), PAR (precision approach radar) чија је употреба веома ограничена последњих деценија.

Тренутно ван оквира PBN концепта се налази група IAP под називом GLS (GBAS landing system). Ове процедуре су базиране на GBAS (ground-based augmentation system) систему, који подразумева посебну аеродромску инфраструктуру за корекцију грешке GNSS сигнала, али са друге стране пружа сличне оперативне могућности као ILS систем.

У оквиру PBN IAP, тренутно постоје критеријуми за пројектовање процедура које припадају RNP APCH и RNP AR APCH навигационим спецификацијама. Како је фокус овог рада на RNP APCH и због чињенице да RNP AR APCH процедуре имају дефинисан засебан скуп критеријума за пројектовање, у наредној табели (Табела 48) је дата је подела IAP који се налазе у оквиру RNP APCH навигационе спецификације [4]:

Табела 48. Подела IAP у оквиру RNP APCH

Врста IAP	Тип IAP	Опис
NPA	LNAV	Базиране на коришћењу латералне навигације (lateral navigation), која омогућава вођење ваздухоплова у хоризонталној равни, уз помоћ GNSS сигнала.
	LP	Базиран на коришћењу латералне навигације, уз помоћ GNSS сигнала, који је побољшан путем SBAS система.
APV	LNAV/VNAV	Базиране на коришћењу латералне навигације, уз помоћ GNSS сигнала, и вертикалне навигације (vertical navigation), уз помоћ барометарског висиномера (Baro-VNAV) на ваздухоплову, која омогућава вођење ваздухоплова и у хоризонталној и у вертикалној равни.
	LPV APV I	Базиране на коришћењу латералне и вертикалне навигације, уз помоћ GNSS сигнала, при чему су и хоризонтална и вертикална компонента навигације побољшани путем SBAS система, али прецизност вертикалне компоненте је ограничена.
PA	LPV CAT I	Базиране на коришћењу латералне и вертикалне навигације, уз помоћ GNSS сигнала, при чему су и хоризонтална и вертикална компонента навигације побољшани путем SBAS система.



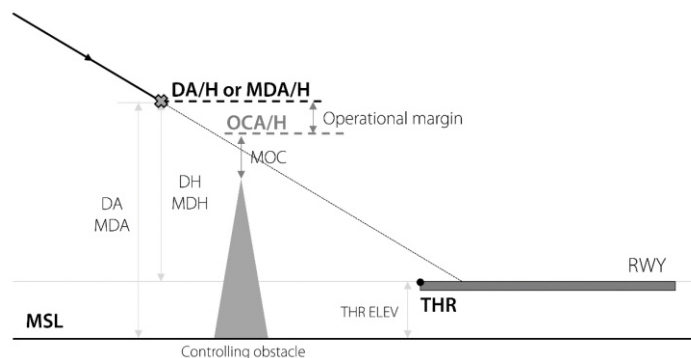
Слика 93. Подела IAP

Класификација операција инструменталног прилажења је дефинисана у односу на утврђени оперативни минимум и технику летења за дату IAP. У односу на оперативну технику извођења IAP, операције могу бити дводимензионалне (2D) или тродимензионалне (3D), у зависности да ли се захтева само латерално (LNAV), односно и вертикално (VNAV) вођење ваздухоплова. За потребе класификације у односу на оперативне минимуме, потребно је прво објаснити овај појам.

Оперативни минимум или прецизније аеродромски оперативни минимум за слетање, изражава се путем две компоненте - минималне хоризонталне видљивости или видљивости дуж ПСС (runway visual range) и минималне (апсолутне/релативне) висине (Слика 94).

Захтеви видљивости/RVR представљају минималне временске услове који морају бити задовољени да би пилоти могли да успоставе визуелни контакт (за наставак слетања) на утврђеној минималној висини (у понеким случајевима се додају и захтеви по питању услова облачности - висина доње базе облака). Визуелни контакт се односи на расположива визуелна помагала (нпр. прилазна светла, ПСС светла и ознаке...) у околини подручја прилаза, у довољном временском трајању да пилот изврши процену положаја ваздухоплова и брзине његове промене, у односу на жељену путању лета. Начин одређивања неопходних вредности видљивости/RVR је описан у оквиру документа [84], и налази се ван опсега овог рада.

Минимална висина се односи на минималну апсолутну/релативну висину снижавања (minimum descent altitude/height - MDA/H) за 2D операције, или на апсолутну/релативну висину одлуке (decision altitude/height - DA/H), код 3D операција.



Слика 94. Минимална висина

Вредности MDA/H и DA/H у највећој мери зависе од утврђене вредности OCA/H. OCA/H се дефинише када се на висину контролне, највише препреке у сегменту завршног прилажења дода минимална вредност за безбедно надвишавање препрека (minimum obstacle clearance - MOC), која је условљена типом IAP. Оператер ваздухоплова (авиокомпанија) задржава право да дату вредност додатно увећа у складу са сопственим оперативним специфичностима, које се тичу обучености летачких посада, опремљености ваздухоплова и сл. У општем случају, вредности MDA/H и DA/H су једнаке системској вредности OCA/H за дату IAP, када нема препрека које диктирају већу вредност. У овом смислу, када се говори о оперативним минимумима са аспекта пројектовања IAP обично се мисли на вредност OCA/H.

На основу најнижег пројектованог оперативног минимума операције инструменталног прилажења се даље класификују на [4]:

- a) **Type A** операције, када MDH или DH имају вредност 250 ft (75 m) или више и
- b) **Type B** операције, када DH има вредност испод 250 ft (75 m).

Табела 49 даје списак вредности IAP системских минимума у складу са [164].

Табела 49. Приказ системских минимума по типу IAP

Назив IAP	Тип IAP	Тип операција	Латерално вођење	Вертикално вођење	DH/MDH
ILS Cat I / ILS Cat II	PA	3D, Type B	Localizer ant.	Glide Path ant.	200 ft (60 m) / 100 ft (30 m)
GLS Cat I	PA	3D, Type B	GNSS + GBAS		200 ft (60 m)
LPV Cat I	PA	3D, Type B	GNSS + SBAS		200 ft (60 m)
LPV APV I	APV	3D, Type A	GNSS + SBAS		250 ft (75 m)
LP	NPA	2D, Type A	GNSS + SBAS	/	250 ft (75 m)
LNAV/VNAV	APV	2D, Type A	GNSS	Baro-VNAV	250 ft (75 m)
LNAV	NPA	2D, Type A	GNSS	/	250 ft (75 m)
LOC	NPA	2D, Type A	Localizer ant.	/	250 ft (75 m)
VOR	NPA	2D, Type A	VOR	/	300 ft (90 m)
VOR (DME)	NPA	2D, Type A	VOR/DME	/	250 ft (75 m)

ПРИЛОГ 5 – Општи домен УП

Табела 50. Општи домен УП

УП	THRd	APPtA	CPd	GPA	CG	FAPd	IFta	IFias	IFd	SDFd	IAFd	OCHadj	MATFd	MATFta	MATFias	MATFba
Мин	0	0	0.4	3.0	2.5	3	0	185	2.8	0	0.8	0	1.9	0	160	15
Макс	1500	±5	2.3	3.5	5	10	±90	250	10	9.2	10	800	-10	±180	185	30
ДОМЕН	0	0	0.4	3.0	2.5	3.0	0	185	2.8	0	0.8	0	1.9	0	160	15
	300	1	0.5	3.1	2.6	3.1	5	190	2.9	1.1	0.9	50	1.8	5	165	20
	600	2	0.6	3.2	2.7	3.2	10	195	3.0	1.2	1	100	1.7	10	170	25
	900	3	0.7	3.3	2.8	3.3	15	200	3.1	1.3	1.1	150	1.6	15	175	30
	1200	4	0.8	3.4	2.9	3.4	20	205	3.2	1.4	1.2	200	1.5	20	180	
	1500	5	0.9	3.5	3	3.5	25	210	3.3	1.5	1.3	250	1.4	25	185	
		-1	1.0		3.1	3.6	30	215	3.4	1.6	1.4	300	1.3	30		
		-2	1.1		3.2	3.7	35	220	3.5	1.7	1.5	350	1.2	35		
		-3	1.2		3.3	3.8	40	225	3.6	1.8	1.6	400	1.1	40		
		-4	1.3		3.4	3.9	45	230	3.7	1.9	1.7	450	1.0	45		
		-5	1.4		3.5	4.0	50	235	3.8	2	1.8	500	0.9	50		
			1.5		3.6	4.1	55	240	3.9	2.1	1.9	550	0.8	55		
			1.6		3.7	4.2	60	245	4.0	2.2	2	600	0.7	60		
			1.7		3.8	4.3	65	250	4.1	2.3	2.1	650	0.6	65		
			1.8		3.9	4.4	70		4.2	2.4	2.2	700	0.5	70		
			1.9		4	4.5	75		4.3	2.5	2.3	750	0.4	75		
			2.0		4.1	4.6	80		4.4	2.6	2.4	800	0.3	80		
			2.1		4.2	4.7	85		4.5	2.7	2.5		0.2	85		
			2.2		4.3	4.8	90		4.6	2.8	2.6		0.1	90		
			2.3		4.4	4.9	5		4.7	2.9	2.7		0	95		
					4.5	5.0	10		4.8	3	2.8		-0.1	100		
					4.6	5.1	15		4.9	3.1	2.9		-0.2	105		
					4.7	5.2	20		5.0	3.2	3		-0.3	110		
					4.8	5.3	25		5.1	3.3	3.1		-0.4	115		
					4.9	5.4	30		5.2	3.4	3.2		-0.5	120		
					5	5.5	35		5.3	3.5	3.3		-0.6	125		
						5.6	40		5.4	3.6	3.4		-0.7	130		
						5.7	45		5.5	3.7	3.5		-0.8	135		
						5.8	50		5.6	3.8	3.6		-0.9	140		
						5.9	55		5.7	3.9	3.7		-1.0	145		
							
						9.7	-75		9.7	8.9	9.7		-9.7	-165		
					9.8	-80		9.8	9.0	9.8		-9.8	-170			
					9.9	-85		9.9	9.1	9.9		-9.9	-175			
					10.0	-90		10.0	9.2	10.0		-10.0	-180			
УКУПАН БРОЈ МОГУЋИХ ВРЕДНОСТИ:																
6	11	20	6	26	71	37	14	73	83	93	17	120	73	6	4	
1.53E+22																

ПРИЛОГ 6 – Тачке конструкције процедуре

Списак свих тачака, које су коришћене за конструкцију процедуре у примеру за верификацију рачунарског модела, дат је у наредној табели.

Табела 51. Тачке конструкције процедуре

Р. бр.	Тачка	Сегмент	X (m)	Y (m)	Р. бр.	Тачка	Сегмент	X (m)	Y (m)
1.	IAF	Nominal Path	21522	4682	39.	IF-LTPs	INTER	20616	-3602
2.	IF	Nominal Path / INITIAL	17594	0	40.	E0s	INTER	20254	-4132
3.	SDF	Nominal Path	12038	0	41.	T11	INTER	19284	-5288
4.	FAP	Nominal Path / INTER	8334	0	42.	T12	INTER	17510	-6115
5.	MATF	Nominal Path	-7408	0	43.	T21	INTER	16001	-6115
6.	MAEF	Nominal Path / MAS	1940	13350	44.	T31	INTER	13224	-5371
7.	IAF-ATT-Lp	INITIAL	24248	4329	45.	T01	INTER	3921	0
8.	IAF-ATT-Ls	INITIAL	26022	2841	46.	T0	INTER	8551	0
9.	IF-Ls	INITIAL	21141	-2976	47.	T3	INTER	14382	-3367
10.	IF-Lp	INITIAL	19367	-1488	48.	T2	INTER	16001	-3800
11.	IAF-ATT-Rs	INTER	18928	8793	49.	T1	INTER	17510	-3800
12.	IAF-ATT-Rp	INTER	20701	7305	50.	E0p	INTER	18481	-2644
13.	IF-ETPp	INTER	17724	3757	51.	IF-LTPp	INTER	18842	-2114
14.	IF-Rp	INITIAL / INTER	16178	3036	52.	NN0	INTER	18798	924
15.	IF-Rs	INITIAL / INTER	15292	4937	53.	D	FAS	-259	142
16.	IF-ETPs	INITIAL / INTER	15951	5245	54.	E	FAS	-900	200
17.	IF-ATT-Rs	INTER	16486	5882	55.	E1	FAS	-900	-200
18.	FR	INTER	8334	1759	56.	D1	FAS	-259	-142
19.	F-2Rs	INTER	12038	4630	57.	C1	FAS	258	-63
20.	F-3Rs	INTER	19076	4630	58.	C2R	FAS	11494	60
21.	F-3Rp	INTER	19076	2315	59.	C2L	FAS	11494	-60
22.	F-2Rp	INTER	12038	2315	60.	E3R	FAS	-7302	1759
23.	FL	INTER	8334	-1759	61.	E3L	FAS	-7302	-1759
24.	F-2Lp	INTER	12038	-2315	62.	TF-ETP-L	MAS	-6964	-1759
25.	F-3Lp	INTER	19076	-2315	63.	TF-ETP-R	MAS	-6964	1759
26.	F-3Ls	INTER	19076	-4630	64.	TF-ETP-1p	MAS	-1859	3255
27.	F-2Ls	INTER	12038	-4630	65.	TF-ETP-1s	MAS	3245	8270
28.	DEL	INTER	487	-1759	66.	TF-ETP-2s	MAS	5131	11470
29.	D2L	INTER	5832	-934	67.	TF-ETP-2p	MAS	3535	12410
30.	FL-OAS	INTER	8334	-548	68.	MP-1p	MAS	-3685	13612
31.	FR-OAS	INTER	8334	548	69.	MP-2s	MAS	1007	16491
32.	D2R	INTER	5832	934	70.	MP-2p	MAS	1413	15126
33.	DER	INTER	487	1759	71.	TF-LTP	MAS	-8605	-1759
34.	IF-ETP-2s	INTER	14632	4630	72.	TM1	MAS	-12827	1634
35.	IF-ATT-Rp	INTER	17521	3662	73.	TM2	MAS	-12827	5153
36.	IF-ETP-2p	INTER	14632	2315	74.	TM3	MAS	-12809	5512
37.	IF-ATT-Lp	INTER	20320	-353	75.	TM31	MAS	-12724	6328
38.	IF-ATT-Ls	INTER	22093	-1841	76.	TM4	MAS	-9784	9870

ПРИЛОГ 7 – Резултати валидације модела

Извод података о резултатима тестирања модела дат је у следећој табели.

Табела 52. Резултати валидације модела - Sc1

Итер	Укупно време			Време по итер.			Укупно време			Време по итер.			Укупно време			Време по итер.			Оцена OF								
	Sc1-1-1	Sc1-1-2	Sc1-1-3	Sc1-1-1	Sc1-1-2	Sc1-1-3	Sc1-2-1	Sc1-2-2	Sc1-2-3	Sc1-2-1	Sc1-2-2	Sc1-2-3	Sc1-3-1	Sc1-3-2	Sc1-3-3	Sc1-3-1	Sc1-3-2	Sc1-3-3	Sc1-1-1	Sc1-1-2	Sc1-1-3	Sc1-2-1	Sc1-2-2	Sc1-2-3	Sc1-3-1	Sc1-3-2	Sc1-3-3
1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6	10.5	10.7	10.5	10.5	10.7	10.5	37.2	52.0	53.5	33.3	105.5	61.0	24.6	84.4	61.2
2	1.8	1.8	1.8	0.9	0.9	0.9	5.5	5.2	5.4	2.8	2.6	2.8	20.7	21.0	21.3	10.3	10.3	10.8	32.5	41.5	45.3	31.2	49.3	46.2	19.1	25.6	18.4
3	2.7	2.7	2.7	0.9	0.9	0.9	8.1	7.9	8.0	2.6	2.6	2.7	31.0	31.3	31.7	10.3	10.3	10.4	32.5	40.6	42.1	18.5	42.3	45.5	12.3	14.9	14.2
4	3.6	3.6	3.6	0.9	0.9	0.9	10.6	10.5	10.7	2.5	2.6	2.6	41.3	42.0	42.6	10.3	10.7	11.0	30.5	31.6	40.6	15.2	36.1	39.0	9.6	8.7	11.6
5	4.5	4.6	4.6	0.9	0.9	0.9	13.2	13.1	13.3	2.6	2.6	2.6	51.5	53.9	54.0	10.2	11.8	11.4	28.9	25.6	35.9	10.1	32.1	33.4	7.6	8.7	10.5
6	5.4	5.4	5.4	0.9	0.9	0.9	15.7	15.7	15.9	2.5	2.6	2.6	62.2	65.3	65.2	10.7	11.4	11.1	28.9	24.6	33.3	8.4	31.3	23.3	6.2	8.7	9.5
7	5.3	6.4	6.4	0.9	0.9	0.9	18.3	18.3	18.5	2.6	2.6	2.6	72.9	76.8	76.4	10.7	11.5	11.2	23.3	24.6	33.3	8.4	27.1	20.1	6.0	4.8	7.1
8	7.2	7.3	7.3	0.9	0.9	0.9	20.8	20.9	21.0	2.5	2.6	2.6	83.6	87.8	87.6	10.7	11.0	11.2	21.2	24.6	31.5	8.4	23.6	18.7	4.1	3.5	5.5
9	8.1	8.2	8.2	0.9	0.9	0.9	23.3	23.5	23.6	2.5	2.6	2.6	94.4	98.3	98.8	10.7	10.5	11.2	19.7	24.6	31.5	5.5	22.1	16.9	4.0	2.7	2.3
10	8.9	9.1	9.2	0.9	0.9	0.9	25.8	26.1	26.1	2.5	2.6	2.5	105.3	109.2	110.0	10.9	10.9	11.2	16.8	24.3	30.9	4.0	19.7	13.6	3.4	2.7	2.1
11	9.8	10.0	10.1	0.9	0.9	0.9	28.3	28.6	28.7	2.5	2.6	2.5	116.0	120.4	121.4	10.8	11.2	11.4	15.9	23.9	28.5	3.0	14.8	13.6	1.5	2.7	2.1
12	10.7	10.9	11.0	0.9	0.9	0.9	30.9	31.2	31.2	2.5	2.6	2.5	126.7	132.0	132.8	10.7	11.6	11.4	14.8	21.1	28.5	2.8	17.0	13.5	1.0	2.7	1.7
13	11.6	11.8	11.9	0.9	0.9	0.9	33.4	33.7	33.7	2.5	2.5	2.6	144.4	144.0	144.1	10.9	11.0	11.3	14.8	19.8	25.3	2.8	17.0	5.5	0.9	2.7	1.7
14	12.5	12.7	12.8	0.9	0.9	0.9	35.9	36.3	36.4	2.5	2.5	2.7	149.2	153.8	155.2	11.6	10.9	11.1	12.5	19.8	23.5	2.4	16.9	4.0	0.9	2.7	1.7
15	13.4	13.6	13.7	0.9	0.9	0.9	38.3	38.8	39.2	2.5	2.5	2.8	160.4	164.6	166.3	11.2	10.8	11.2	12.5	19.1	23.2	2.4	16.0	3.9	0.8	1.8	1.4
16	14.3	14.6	14.6	0.9	0.9	0.9	40.8	41.4	42.0	2.5	2.6	2.8	171.5	175.6	177.5	11.1	11.0	11.2	12.5	19.1	21.9	2.4	15.8	3.9	0.8	1.8	1.2
17	15.2	15.5	15.5	0.9	0.9	0.9	43.3	44.1	44.7	2.5	2.7	2.8	182.4	186.6	189.4	10.9	11.9	12.5	13.6	21.9	2.4	15.8	3.9	0.8	1.8	1.2	
18	16.1	16.4	16.4	0.9	0.9	0.9	45.8	46.8	47.5	2.5	2.7	2.8	193.3	197.6	200.8	10.9	11.0	11.4	9.5	13.6	21.9	2.0	15.8	3.8	0.8	1.8	1.2
19	16.9	17.3	17.3	0.9	0.9	0.9	48.3	49.6	50.3	2.5	2.8	2.8	204.2	208.7	212.2	10.9	11.2	11.4	9.5	13.0	21.9	2.0	15.8	3.8	0.6	1.8	1.1
20	17.8	18.2	18.2	0.9	0.9	0.9	50.8	52.5	53.0	2.5	2.8	2.8	215.2	219.9	223.4	11.0	11.1	11.3	9.5	13.0	21.9	2.0	14.5	3.8	0.6	1.8	0.7
21	18.7	19.1	19.1	0.9	0.9	0.9	53.4	55.3	55.7	2.6	2.8	2.7	226.3	230.9	234.5	11.1	11.0	11.1	9.5	12.9	21.0	2.0	14.3	3.8	0.6	1.6	0.7
22	19.6	20.0	20.0	0.9	0.9	0.9	56.0	58.0	58.5	2.6	2.8	2.8	237.6	242.0	245.6	11.3	11.1	11.1	9.5	12.9	21.0	2.0	14.3	3.8	0.6	1.6	0.7
23	20.5	20.9	20.9	0.9	0.9	0.9	58.6	60.7	61.3	2.6	2.7	2.7	248.9	253.2	257.0	11.3	11.2	11.4	9.5	11.7	18.0	2.0	11.7	3.5	0.6	1.6	0.7
24	21.4	21.8	21.8	0.9	0.9	0.9	61.2	63.4	64.0	2.6	2.7	2.8	260.1	264.4	268.2	11.2	11.3	11.3	9.0	11.7	16.2	2.0	11.5	3.5	0.6	1.4	0.7
25	22.3	22.7	22.7	0.9	0.9	0.9	63.8	66.2	66.8	2.6	2.7	2.7	271.1	275.5	279.4	11.1	11.0	11.2	9.0	11.7	15.8	2.0	11.5	3.5	0.1	1.4	0.2
26	23.2	23.6	23.6	0.9	0.9	0.9	66.4	68.9	69.5	2.6	2.8	2.8	282.2	286.6	290.5	11.1	11.0	11.0	9.0	11.7	15.8	2.0	11.5	3.5	0.1	1.4	0.2
27	24.0	24.5	24.5	0.9	0.9	0.9	69.0	71.7	72.4	2.6	2.8	2.8	293.3	297.6	301.5	11.1	11.1	11.0	7.9	11.1	15.7	2.0	11.5	3.5	0.1	1.4	0.1
28	24.9	25.4	25.4	0.9	0.9	0.9	71.6	74.5	75.1	2.6	2.8	2.8	304.5	308.5	312.5	11.2	10.9	11.0	7.9	11.1	15.7	2.0	11.5	3.5	0.1	1.4	0.1
29	25.8	26.3	26.3	0.9	0.9	0.9	74.2	77.2	77.9	2.7	2.8	2.7	315.6	319.6	323.9	11.1	11.1	11.4	7.6	11.1	15.7	2.0	11.5	3.5	0.1	1.4	0.1
30	26.7	27.2	27.2	0.9	0.9	0.9	76.9	80.0	80.7	2.6	2.7	2.8	326.7	330.8	335.1	11.1	11.2	11.3	7.6	11.1	15.7	2.0	11.1	3.3	0.1	1.4	0.1
31	27.6	28.1	28.1	0.9	0.9	0.9	79.5	82.7	83.4	2.7	2.7	2.8	337.9	342.1	346.4	11.1	11.3	11.2	7.6	10.5	15.7	2.0	11.1	3.3	0.1	1.4	0.1
32	28.5	29.0	29.0	0.9	0.9	0.9	82.2	85.4	86.2	2.6	2.7	2.8	349.0	353.2	357.5	11.1	11.1	11.1	2.9	10.5	15.7	2.0	10.9	3.3	0.1	1.4	0.1
33	29.4	29.9	29.9	0.9	0.9	0.9	84.9	88.1	88.9	2.7	2.7	2.7	360.1	364.3	368.6	11.1	11.2	11.2	2.9	10.5	15.7	2.0	10.9	3.3	0.1	1.4	0.1
34	30.2	30.8	30.8	0.9	0.9	0.9	87.5	90.9	91.6	2.7	2.7	2.7	371.5	375.4	379.8	11.4	11.1	11.2	2.9	10.5	15.7	2.0	10.9	3.3	0.1	1.4	0.1
35	31.1	31.7	31.7	0.9	0.9	0.9	90.2	93.6	94.4	2.7	2.8	2.7	383.1	386.6	391.3	11.6	11.2	11.4	2.9	10.5	15.7	2.0	10.8	3.3	0.1	1.4	0.1
36	32.0	32.6	32.6	0.9	0.9	0.9	92.9	96.4	97.2	2.7	2.8	2.8	395.0	398.7	403.7	11.8	11.2	11.5	2.9	10.5	15.7	2.0	10.5	3.3	0.1	1.4	0.1
37	32.9	33.5	33.5	0.9	0.9	0.9	95.6	99.2	100.0	2.7	2.8	2.8	406.4	409.0	414.8	11.4	11.2	11.1	2.9	10.5	15.7	2.0	10.5	3.3	0.1	1.4	0.1
38	33.8	34.4	34.4	0.9	0.9	0.9	98.3	102.0	102.8	2.7	2.8	2.8	418.4	419.9	424.9	12.0	11.0	11.1	2.9	10.5	15.7	2.0	10.5	3.3	0.1	1.4	0.1
39	34.7	35.3	35.3	0.9	0.9	0.9	101.0	104.7	105.6	2.8	2.7	2.8	430.2	431.1	436.1	11.8	11.1	11.2	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
40	35.6	36.2	36.2	0.9	0.9	0.9	103.8	107.5	108.3	2.8	2.8	2.7	441.5	442.2	447.2	11.4	11.2	11.1	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
41	36.4	37.1	37.1	0.9	0.9	0.9	106.5	110.3	111.1	2.7	2.8	2.7	453.1	453.6	458.2	11.5	11.3	11.0	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
42	37.3	38.0	38.0	0.9	0.9	0.9	109.5	113.0	113.9	2.9	2.7	2.8	464.9	464.9	469.9	11.8	11.3	11.7	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
43	38.2	38.9	39.0	0.9	0.9	0.9	112.3	115.9	116.6	2.9	2.9	2.7	476.8	476.0	481.1	12.0	11.2	11.2	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
44	39.1	39.8	40.0	0.9	0.9	0.9	115.2	118.7	119.4	2.9	2.8	2.8	488.8	487.3	492.2	11.9	11.3	11.1	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
45	40.0	40.8	41.0	0.9	1.0	1.0	118.1	121.5	122.2	2.9	2.8	2.8	500.5	498.7	503.4	11.7	11.4	11.2	2.9	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
46	40.9	41.7	41.9	0.9	1.0	1.0	121.0	124.3	124.9	2.9	2.8	2.7	511.7	510.0	514.5	11.2	11.3	11.1	2.8	10.5	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
47	41.8	42.7	42.9	0.9	1.0	1.0	124.0	127.1	127.7	3.0	2.8	2.7	522.9	521.4	525.7	11.2	11.3	11.1	2.8	10.3	15.7	2.0	10.4	3.3	0.1	1.4	0.1
48	42.7	43.7	43.9	0.9	1.0	1.0	126.7	129.9	130.4	2.7	2.8	2.8	534.2	532.6	537.3	11.2	11.3	11.7	2.8	1							

102	92.7	96.3	96.3	0.9	1.0	1.0	275.5	281.7	281.4	2.7	2.8	2.9	1157.1	1412	1503	1.8	1.3	1.2	0.3	0.2	1.3	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
103	93.7	97.3	97.3	0.9	1.0	1.0	278.3	284.6	284.2	2.8	2.9	2.9	1168.4	1531	1617	1.3	1.8	1.4	0.3	0.2	1.3	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
104	94.6	98.2	98.2	0.9	1.0	1.0	281.0	287.5	287.0	2.8	2.9	2.8	1179.9	1646	1728	1.5	1.5	1.1	0.3	0.2	0.8	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
105	95.5	99.2	99.2	0.9	1.0	1.0	283.9	290.3	289.7	2.8	2.8	2.7	1192.6	1758	1840	1.2	1.2	1.2	0.3	0.2	0.8	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
106	96.4	100.2	100.2	0.9	1.0	1.0	286.7	293.1	292.4	2.8	2.8	2.7	1204.5	1868	1952	1.8	1.0	1.2	0.3	0.2	0.8	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
107	97.4	101.1	101.2	0.9	1.0	1.0	289.4	295.9	295.3	2.8	2.8	2.9	1216.4	1984	2064	1.9	1.6	1.2	0.3	0.2	0.8	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
108	98.3	102.1	102.1	0.9	1.0	1.0	292.2	298.6	298.1	2.8	2.8	2.8	1228.3	2094	2179	1.9	1.0	1.5	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
109	99.2	103.1	103.1	0.9	1.0	1.0	295.0	301.5	301.0	2.8	2.9	2.9	1240.4	2204	2292	1.2	1.0	1.3	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
110	100.2	104.0	104.1	0.9	1.0	1.0	297.8	304.4	303.8	2.8	2.9	2.8	1252.5	2313	2405	1.2	1.0	1.3	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
111	101.1	105.0	105.0	0.9	1.0	1.0	300.6	307.4	306.5	2.8	3.0	2.8	1264.4	2423	2523	1.9	1.0	1.8	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
112	102.0	106.0	106.0	0.9	1.0	1.0	303.4	310.4	309.3	2.8	3.0	2.8	1276.6	2533	2634	1.2	1.0	1.1	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
113	103.0	106.9	107.0	1.0	1.0	1.0	306.2	313.6	312.0	2.8	3.1	2.8	1288.4	2643	2745	1.7	1.0	1.1	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
114	104.0	107.9	107.9	0.9	1.0	1.0	309.0	316.5	314.8	2.8	3.0	2.7	1300.6	2753	2855	1.2	1.0	1.0	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
115	104.9	108.9	108.9	0.9	1.0	1.0	311.8	319.5	317.6	2.8	3.0	2.8	1313.1	2862	2965	1.2	1.0	1.0	0.3	0.2	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
116	105.9	109.8	109.9	0.9	1.0	1.0	314.5	322.5	320.3	2.8	3.0	2.7	1325.6	2972	3075	1.2	1.0	1.0	0.3	0.0	0.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
117	106.8	110.8	110.9	1.0	1.0	1.0	317.3	325.6	323.1	2.8	3.1	2.8	1337.9	3082	3185	1.2	1.0	1.0	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
118	107.8	111.8	111.8	0.9	1.0	1.0	320.0	329.2	325.8	2.7	3.6	2.8	1350.2	3192	3296	1.2	1.0	1.1	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
119	108.7	112.8	112.8	1.0	1.0	1.0	322.8	332.6	328.5	2.7	3.4	2.7	1362.5	3302	3411	1.2	1.0	1.5	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
120	109.7	113.7	113.8	1.0	1.0	1.0	325.5	335.9	331.3	2.8	3.2	2.8	1374.9	3412	3525	1.2	1.0	1.4	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
121	110.7	114.7	114.8	1.0	1.0	1.0	328.3	339.0	334.7	2.7	3.1	2.7	1386.8	3524	3648	1.9	1.3	1.2	0.3	0.0	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
122	111.6	115.7	115.8	0.9	1.0	1.0	331.2	342.0	336.8	2.9	3.0	2.8	1398.2	3637	3761	1.4	1.3	1.3	0.3	0.0	0.6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
123	112.5	116.6	116.7	0.9	1.0	1.0	334.0	345.0	339.6	2.9	3.0	2.8	1409.4	3758	3887	1.2	1.2	1.5	0.3	0.0	0.6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
124	113.5	117.6	117.7	0.9	1.0	1.0	336.9	348.0	342.4	2.9	3.0	2.8	1420.7	3874	3991	1.3	1.6	1.6	0.3	0.0	0.6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
125	114.4	118.6	118.7	0.9	1.0	1.0	339.9	351.0	345.1	3.0	3.0	2.8	1431.9	3989	4105	1.2	1.5	1.3	0.3	0.0	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
126	115.4	119.5	119.6	1.0	1.0	1.0	342.9	354.0	347.8	3.0	2.9	2.7	1443.1	4101	4216	1.2	1.2	1.1	0.3	0.0	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
127	116.3	120.5	120.6	0.9	1.0	1.0	345.9	356.9	350.6	3.0	2.9	2.8	1454.3	4211	4330	1.2	1.0	1.5	0.3	0.0	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
128	117.3	121.5	121.6	0.9	1.0	1.0	348.9	359.8	353.4	3.0	2.9	2.8	1465.5	4321	4443	1.2	1.0	1.3	0.3	0.0	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
129	118.2	122.4	122.5	0.9	1.0	1.0	351.9	362.9	356.1	3.0	3.1	2.8	1476.7	4433	4555	1.2	1.2	1.2	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
130	119.2	123.5	123.5	1.0	1.0	1.0	354.9	365.7	358.9	3.0	2.9	2.7	1488.1	4545	4668	1.4	1.2	1.3	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
131	120.1	124.4	124.5	1.0	1.0	1.0	357.9	368.7	361.6	3.0	3.0	2.8	1499.3	4656	4779	1.2	1.1	1.1	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
132	121.1	125.4	125.5	0.9	1.0	1.0	360.9	371.6	364.5	3.0	2.9	2.8	1510.5	4767	4895	1.2	1.1	1.6	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
133	122.0	126.4	126.4	0.9	1.0	1.0	363.9	374.5	367.3	3.0	2.9	2.8	1521.7	4878	5011	1.2	1.1	1.5	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
134	123.0	127.3	127.4	0.9	1.0	1.0	366.9	377.5	370.1	3.0	3.0	2.8	1532.9	4991	5124	1.2	1.2	1.4	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
135	123.9	128.3	128.4	1.0	1.0	1.0	369.9	380.5	372.8	3.0	3.0	2.8	1544.1	5104	5239	1.2	1.4	1.5	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
136	124.9	129.2	129.3	0.9	1.0	1.0	372.9	383.4	375.6	3.0	3.0	2.8	1555.4	5215	5359	1.3	1.1	1.9	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
137	125.8	130.2	130.3	0.9	1.0	1.0	375.9	386.3	378.4	2.9	2.9	2.8	1566.7	5320	5474	1.3	1.4	1.6	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
138	126.8	131.1	131.3	1.0	1.0	1.0	378.8	389.1	381.1	2.9	2.8	2.8	1578.6	5448	5588	1.9	1.8	1.4	0.3	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
139	127.7	132.1	132.3	0.9	1.0	1.0	381.9	391.9	383.9	3.1	2.8	2.8	1590.7	5563	5700	1.2	1.5	1.3	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
140	128.7	133.1	133.2	0.9	1.0	1.0	384.9	394.8	386.6	3.0	2.9	2.7	1602.8	5676	5812	1.2	1.3	1.1	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
141	129.6	134.0	134.0	1.0	1.0	1.0	387.8	397.6	389.4	2.9	2.8	2.8	1614.2	5788	5924	1.4	1.2	1.2	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
142	130.6	135.0	135.2	0.9	1.0	1.0	390.8	400.5	392.2	3.0	2.8	2.8	1625.6	5900	6035	1.4	1.2	1.2	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
143	131.5	135.9	136.1	0.9	1.0	1.0	393.8	403.3	394.9	3.0	2.8	2.8	1637.3	6012	6149	1.7	1.2	1.4	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
144	132.5	136.9	137.1	0.9	1.0	1.0	396.6	406.1	397.7	2.9	2.8	2.8	1649.5	6125	6272	1.2	1.3	1.2	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
145	133.4	137.9	138.1	1.0	1.0	1.0	399.5	408.9	400.4	2.8	2.8	2.8	1661.0	6238	6391	1.4	1.2	1.9	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
146	134.4	138.8	139.1	0.9	1.0	1.0	402.3	411.8	403.2	2.8	2.9	2.7	1672.4	6351	6508	1.4	1.4	1.7	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
147	135.3	139.8	140.1	1.0	1.0	1.0	405.0	414.7	405.9	2.8	2.8	2.8	1684.5	6462	6624	1.2	1.0	1.6	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
148	136.3	140.8	141.1	1.0	1.0	1.0	407.9	417.5	408.7	2.8	2.8	2.8	1696.5	6574	6738	1.2	1.4	1.4	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
149	137.3	141.7	142.1	1.0	1.0	1.0	410.8	420.3	411.4	3.0	2.8	2.8	1707.7	6683	6849	1.3	1.0	1.1	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150	138.2	142.7	143.1	1.0	1.0	1.0	413.6	423.1	414.2	2.7	2.8	2.7	1718.9	6793	6959	1.2	1.0	1.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
151	139.2	143.6	144.1	1.0	1.0	1.0	416.3	425.9	416.9	2.8	2.8	2.8	1730.2	6903	7069	1.2	1.0	1.0	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
152	140.2	144.6	145.0	1.0	1.0	1.0																					

109	1948	2015	2120	18	18	2.1	515.6	517.1	533.2	4.8	4.8	4.8	2173.7	2114.7	2172.6	19.7	19.1	19.3	17.6	9.7	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
110	1966	2034	2142	18	19	2.2	520.4	522.1	538.0	4.8	4.9	4.8	2194.3	2134.1	2192.0	20.6	19.4	19.4	17.6	9.7	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
111	1985	2053	2162	19	19	2.0	525.2	527.1	542.8	4.8	5.1	4.8	2214.5	2154.9	2211.2	20.2	20.8	19.2	17.6	9.7	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
112	2003	2071	2182	18	18	2.0	530.3	532.0	547.6	5.1	4.9	4.8	2233.7	2174.5	2230.4	19.2	19.6	19.2	17.6	9.6	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
113	2021	2089	2202	19	19	2.0	535.2	536.9	552.6	4.8	4.9	5.0	2254.7	2195.9	2249.6	21.0	19.4	19.2	17.6	9.6	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
114	2039	2107	2221	18	18	1.9	540.0	542.2	557.5	4.8	5.3	4.9	2275.9	2213.3	2269.2	21.2	19.4	19.7	17.6	9.6	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
115	2057	2126	2241	18	19	2.0	545.2	547.4	562.3	5.2	5.2	4.8	2298.0	2232.4	2288.4	22.1	19.2	19.2	17.6	9.6	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
116	2075	2145	2260	18	18	1.9	550.1	552.8	567.2	4.9	5.4	4.9	2317.6	2251.6	2308.0	19.6	19.2	19.6	17.6	9.6	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
117	2093	2163	2281	18	18	2.1	555.0	557.9	572.1	4.9	5.1	4.9	2337.3	2270.8	2327.2	19.8	19.2	19.2	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
118	2112	2181	2301	18	18	2.1	559.8	563.0	576.9	4.9	5.1	4.8	2356.9	2289.9	2347.0	19.6	19.1	19.8	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
119	2130	2199	2321	19	18	1.9	564.8	568.0	582.0	4.9	5.0	5.1	2376.9	2308.8	2366.2	20.0	18.9	19.1	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
120	2149	2217	2339	18	18	1.8	569.5	572.9	587.0	4.7	4.9	5.0	2397.3	2327.7	2386.0	20.4	18.9	19.9	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
121	2167	2235	2358	18	19	1.9	574.4	578.0	592.1	4.9	5.1	5.2	2417.7	2346.9	2405.1	20.4	19.2	19.1	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
122	2185	2253	2377	18	18	1.9	579.3	583.2	597.1	4.9	5.1	5.0	2437.0	2365.9	2424.2	19.3	19.0	19.0	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
123	2203	2272	2396	18	18	1.9	583.9	588.0	602.0	4.7	4.9	4.9	2456.5	2384.7	2443.6	19.4	18.8	19.4	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
124	2222	2290	2414	18	18	1.8	588.7	593.0	606.8	4.8	4.9	4.9	2475.9	2403.9	2462.8	19.4	19.2	19.2	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
125	2240	2308	2433	18	18	1.8	593.4	598.1	611.7	4.7	5.1	4.8	2495.2	2423.8	2482.5	19.4	19.0	19.7	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
126	2258	2327	2458	18	18	1.9	598.1	603.2	616.7	4.7	5.1	5.0	2515.0	2441.8	2501.8	19.8	19.0	19.3	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
127	2276	2345	2470	18	19	1.9	602.8	608.5	621.7	4.7	5.3	5.0	2535.3	2461.2	2521.2	20.3	19.4	19.4	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
128	2295	2364	2489	19	18	1.9	607.6	613.6	626.6	4.8	5.1	4.9	2555.2	2480.3	2540.7	19.8	19.1	19.4	17.6	9.3	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
129	2313	2382	2508	18	18	1.8	612.4	618.6	631.5	4.8	5.0	4.9	2575.1	2499.2	2559.8	19.9	18.9	19.1	17.6	9.2	1000.7	18.2	1000.6	9.9	9.8	10.5	10.2
130	2332	2400	2526	18	18	1.9	617.2	623.6	636.5	4.8	5.0	4.9	2595.1	2518.1	2579.0	20.0	18.9	19.2	17.6	9.2	1000.7	18.0	14.6	9.3	9.7	10.5	10.2
131	2350	2419	2545	19	19	1.9	622.0	628.7	641.5	4.8	5.1	5.0	2615.1	2537.3	2598.4	20.0	19.2	19.4	17.6	9.2	1000.7	18.0	14.6	9.3	9.7	10.5	10.2
132	2369	2437	2564	19	19	1.9	626.7	633.6	646.5	4.7	4.9	5.0	2635.4	2556.2	2617.4	20.3	18.8	19.0	17.6	9.2	1000.4	18.0	14.6	9.3	9.7	10.5	10.2
133	2387	2456	2582	18	19	1.8	631.5	638.4	651.4	4.8	4.7	4.9	2655.6	2575.1	2636.7	20.2	18.9	19.3	17.6	9.2	1000.4	18.0	14.6	9.3	9.7	10.5	10.2
134	2406	2474	2601	18	18	1.9	636.1	643.3	656.3	4.6	4.9	4.9	2676.1	2593.9	2656.1	20.5	18.8	19.4	17.6	9.2	1000.4	18.0	11.0	9.3	9.7	10.5	10.2
135	2424	2492	2620	18	18	1.9	640.9	648.1	661.1	4.8	4.8	4.8	2696.0	2613.3	2675.3	19.9	19.4	19.2	17.6	9.2	1000.4	18.0	11.0	9.3	9.7	10.5	10.2
136	2443	2510	2638	19	18	1.9	645.6	652.8	665.9	4.6	4.7	4.8	2716.5	2632.2	2694.4	20.4	18.9	19.1	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
137	2462	2529	2657	19	18	1.8	650.3	657.5	670.7	4.7	4.7	4.8	2736.1	2651.5	2713.7	19.6	19.3	19.3	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
138	2481	2547	2676	20	18	1.9	655.1	662.2	675.5	4.8	4.7	4.8	2755.7	2670.7	2732.9	19.6	19.2	19.2	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
139	2500	2565	2694	19	18	1.9	659.8	667.1	680.4	4.7	4.8	4.8	2775.6	2689.7	2752.1	19.9	19.0	19.3	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
140	2519	2583	2713	19	19	1.8	664.5	671.9	685.3	4.7	4.8	4.9	2794.9	2709.0	2771.4	19.3	19.3	19.2	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
141	2538	2602	2732	19	19	1.9	669.3	676.7	690.1	4.7	4.8	4.8	2814.2	2727.8	2790.5	19.2	18.8	19.2	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
142	2557	2620	2750	19	18	1.8	674.0	681.4	695.0	4.7	4.7	4.9	2833.4	2746.9	2809.5	19.2	19.1	19.0	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
143	2576	2639	2769	19	18	1.9	678.9	686.1	699.8	4.9	4.8	4.9	2853.3	2765.6	2828.8	19.9	18.8	19.3	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
144	2594	2657	2787	18	19	1.9	683.7	690.8	704.8	4.8	4.7	5.0	2872.8	2784.5	2848.2	19.5	18.8	19.4	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
145	2612	2677	2806	18	19	1.8	688.5	695.6	709.6	4.8	4.8	4.8	2892.2	2803.8	2867.4	19.4	19.3	19.2	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
146	2630	2696	2825	18	19	1.9	693.3	700.4	714.4	4.8	4.8	4.8	2911.6	2822.5	2887.0	19.5	18.8	19.6	17.6	9.2	1000.4	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
147	2649	2714	2843	18	18	1.9	698.2	705.2	719.3	4.8	4.8	4.9	2931.4	2841.4	2906.5	19.7	18.8	19.5	17.6	9.2	1000.2	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
148	2667	2732	2862	19	18	1.9	703.2	710.0	724.1	5.0	4.8	4.9	2950.6	2860.4	2925.8	19.2	19.0	19.3	17.6	9.2	1000.2	17.6	10.1	9.3	9.7	10.5	10.2
149	2685	2752	2881	18	19	1.9	708.3	714.8	729.1	5.1	4.8	4.9	2970.1	2879.5	2945.2	19.6	19.1	19.4	17.6	9.2	1000.2	17.6	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
150	2703	2772	2900	18	20	1.9	713.4	719.5	733.8	5.1	4.7	4.8	2989.4	2898.5	2964.6	19.2	18.9	19.4	17.6	9.2	1000.2	17.6	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
151	2722	2791	2918	18	20	1.8	718.4	724.2	738.5	5.0	4.7	4.8	3009.0	2917.5	2983.8	19.6	19.0	19.3	17.6	9.2	1000.2	17.6	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
152	2740	2810	2937	19	19	1.9	723.2	729.0	743.4	4.8	4.9	4.8	3028.3	2936.6	3003.1	19.4	19.1	19.3	17.6	9.2	1000.2	17.6	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
153	2759	2830	2956	19	19	1.9	727.9	733.8	748.3	4.7	4.8	4.9	3048.2	2955.7	3022.5	19.8	19.1	19.4	17.6	9.2	1000.2	17.6	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
154	2777	2849	2975	18	19	1.9	732.6	738.6	753.3	4.8	4.8	5.0	3068.0	2974.7	3041.8	19.8	19.0	19.3	17.6	9.2	1000.2	14.5	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
155	2797	2868	2994	20	19	1.9	737.3	743.4	758.1	4.7	4.7	4.8	3087.3	2993.6	3061.0	19.3	18.9	19.2	17.6	9.2	1000.2	14.5	9.2	9.3	9.7	10.5	10.2
156	2816	2888	3013	19	19	1.9	742.2	748.1	762.9	4.9	4.8	4.8	3106.5	3012.7	3080.2	19.2	19.1	19.2	17.6	9.2	1000.2	14.4	9.0	9.8	9.7	10.5	10.2
157	2835	2907																									

Табела 54. Резултати валидације модела - Sc3

Итер	Укупно време			Време по итер.			Укупно време			Време по итер.			Укупно време			Време по итер.			Оцена OF																
	Sc3-1-1	Sc3-1-2	Sc3-1-3	Sc3-1-1	Sc3-1-2	Sc3-1-3	Sc3-2-1	Sc3-2-2	Sc3-2-3	Sc3-2-1	Sc3-2-2	Sc3-2-3	Sc3-3-1	Sc3-3-2	Sc3-3-3	Sc3-3-1	Sc3-3-2	Sc3-3-3	Sc3-1-1	Sc3-1-2	Sc3-1-3	Sc3-2-1	Sc3-2-2	Sc3-2-3	Sc3-3-1	Sc3-3-2	Sc3-3-3	Sc3-1-1	Sc3-1-2	Sc3-1-3	Sc3-2-1	Sc3-2-2	Sc3-2-3	Sc3-3-1	Sc3-3-2
1.	1.7	1.9	1.8	1.7	1.9	1.8	4.6	5.1	5.1	4.6	5.1	5.1	21.0	20.2	20.8	21.0	20.2	20.8	051.3	058.7	029.9	2043.7	61.2	049.6	2748.7	70.6	66.4								
2.	3.5	3.7	3.6	1.7	1.9	1.8	9.4	10.4	10.1	4.8	5.3	5.0	42.3	39.7	41.0	21.3	19.5	20.2	041.3	057.8	028.7	047.7	61.2	40.1	34.5	54.6	58.0								
3.	5.2	5.6	5.3	1.8	1.9	1.7	14.6	15.5	15.1	5.2	5.1	5.0	63.2	59.0	61.6	20.9	19.2	20.6	040.4	057.8	024.8	042.4	58.4	39.1	41.5	52.7	50.0								
4.	7.0	7.4	6.9	1.8	1.8	1.7	19.8	20.6	20.1	5.3	5.1	5.0	84.0	78.5	83.5	20.8	19.5	21.9	036.1	048.3	024.8	036.7	52.3	39.1	37.1	52.4	40.3								
5.	8.9	9.3	8.6	1.9	1.9	1.6	24.8	25.6	25.0	4.9	5.0	5.0	104.6	99.3	105.5	20.7	20.8	22.0	030.8	048.3	023.8	034.2	46.1	37.0	35.6	45.8	36.8								
6.	10.8	11.3	10.3	1.9	2.0	1.7	29.7	30.7	30.1	4.9	5.1	5.0	125.8	120.7	126.6	21.2	21.4	21.1	030.5	048.1	018.7	034.2	44.1	36.2	33.5	35.5	34.2								
7.	12.7	13.3	12.0	1.9	2.0	1.7	34.6	35.7	35.2	4.9	5.0	5.1	146.5	143.0	147.7	20.7	22.3	21.0	030.5	044.6	017.9	032.2	44.1	33.9	31.5	32.5	31.9								
8.	14.7	15.2	13.6	1.9	1.9	1.7	39.5	40.8	40.2	4.9	5.1	5.0	167.3	165.8	168.8	20.8	22.8	21.1	030.5	044.6	017.9	032.2	44.1	33.9	28.2	32.4	29.9								
9.	16.6	17.1	15.3	1.9	2.0	1.7	44.3	45.8	45.2	4.9	5.0	5.1	188.3	186.9	189.8	21.1	21.1	21.0	030.1	043.9	013.9	032.2	44.1	33.9	27.7	31.9	28.7								
10.	18.4	19.0	17.1	1.8	1.9	1.7	49.1	50.9	50.3	4.7	5.1	5.0	209.5	207.9	211.1	21.2	21.1	21.3	027.8	043.9	013.9	030.4	43.6	33.8	26.5	30.1	28.7								
11.	20.1	20.8	18.8	1.8	1.9	1.7	53.9	56.1	55.3	4.9	5.3	5.0	230.8	228.5	231.9	21.3	20.5	20.8	027.8	042.4	011.1	030.4	43.3	33.8	24.5	30.1	28.7								
12.	21.9	22.6	20.5	1.8	1.8	1.7	58.8	61.6	60.4	4.8	5.5	5.1	252.2	250.3	252.7	21.3	21.9	20.7	027.8	042.4	011.1	030.4	41.9	33.8	23.6	28.9	28.7								
13.	23.7	24.4	22.2	1.8	1.8	1.7	63.6	67.3	65.6	4.9	5.7	5.2	273.1	272.3	273.5	21.0	22.0	20.8	027.8	041.4	011.1	030.1	40.6	33.8	22.6	26.1	27.7								
14.	25.5	26.3	23.9	1.8	1.9	1.7	68.5	73.3	70.8	4.9	6.1	5.2	294.3	293.3	293.9	21.2	21.0	20.4	027.8	041.4	010.4	029.6	40.6	33.8	21.7	26.1	26.5								
15.	27.3	28.2	25.5	1.8	1.9	1.7	73.4	79.2	76.0	4.9	5.9	5.2	315.5	314.9	314.2	21.2	21.6	20.3	027.8	041.4	010.3	029.6	40.6	33.6	21.7	25.6	26.5								
16.	29.1	30.0	27.2	1.8	1.8	1.7	78.5	84.9	81.2	5.1	5.7	5.3	336.7	336.2	334.4	21.2	21.2	20.2	027.8	034.4	010.3	029.3	40.4	33.6	21.7	25.1	26.5								
17.	30.9	31.8	28.9	1.8	1.8	1.7	83.4	90.6	86.4	4.9	5.7	5.2	358.0	358.2	354.9	21.3	22.0	20.4	027.8	034.1	010.3	028.9	39.4	33.6	21.7	25.1	26.5								
18.	32.7	33.6	30.6	1.8	1.8	1.7	88.3	96.1	91.6	5.0	5.5	5.2	379.2	378.8	375.0	21.2	21.6	20.1	027.8	034.1	010.0	028.6	41.4	33.6	21.7	24.8	26.3								
19.	34.5	35.3	32.3	1.8	1.8	1.7	93.4	101.4	96.9	5.1	5.3	5.3	400.4	402.4	395.3	21.2	22.6	20.3	027.8	034.1	010.0	028.3	28.0	33.6	21.7	24.8	24.8								
20.	36.3	37.1	34.0	1.8	1.8	1.7	98.5	106.6	102.0	5.1	5.3	5.2	421.6	424.0	415.6	21.2	21.6	20.3	027.8	034.0	010.0	017.1	25.0	33.6	21.7	24.8	24.8								
21.	38.1	38.7	35.7	1.8	1.6	1.7	103.5	111.8	107.2	5.0	5.2	5.2	442.8	446.1	436.0	21.3	22.1	20.4	027.8	032.2	010.0	015.9	22.0	33.6	21.7	23.8	24.8								
22.	39.9	40.4	37.4	1.8	1.7	1.7	108.5	117.1	112.4	5.0	5.2	5.2	463.8	467.8	456.6	20.9	21.7	20.5	027.8	032.2	010.0	015.9	22.0	33.6	21.3	23.8	24.8								
23.	41.8	42.2	39.0	1.8	1.6	1.6	113.7	122.3	117.5	5.1	5.2	5.2	485.9	489.1	477.3	22.1	21.4	20.8	027.8	032.2	009.6	015.4	21.4	33.6	21.3	23.8	24.8								
24.	43.6	44.0	40.6	1.9	1.8	1.6	118.8	127.5	122.8	5.1	5.2	5.3	508.3	510.3	498.1	22.5	21.1	20.8	027.8	032.2	008.2	015.4	20.9	33.6	21.3	23.8	24.8								
25.	45.5	45.7	42.3	1.9	1.7	1.6	123.9	132.8	128.4	5.1	5.3	5.6	529.6	531.7	518.6	21.3	21.4	20.5	027.8	030.3	008.2	013.1	20.9	33.6	21.3	23.8	24.1								
26.	47.4	47.5	43.9	1.9	1.8	1.6	129.0	138.2	133.9	5.1	5.4	5.4	551.0	552.8	539.2	21.4	21.1	20.6	027.6	030.3	008.2	012.9	20.9	33.6	21.3	23.5	23.7								
27.	49.2	49.3	45.6	1.9	1.8	1.7	134.1	143.7	139.2	5.1	5.5	5.3	572.8	573.8	560.1	21.8	21.0	20.9	027.2	030.3	008.2	012.5	20.9	33.6	21.3	22.1	23.7								
28.	51.1	51.2	47.2	1.9	1.9	1.7	139.3	149.0	144.4	5.2	5.3	5.2	594.5	595.2	580.8	21.7	21.4	20.8	027.2	030.3	008.2	011.7	20.9	33.6	21.3	21.6	23.7								
29.	53.0	53.2	48.9	1.9	1.9	1.7	144.4	154.6	149.6	5.1	5.6	5.2	616.0	617.5	601.7	21.5	22.2	20.8	026.6	030.3	008.2	011.7	20.7	33.6	21.3	21.6	21.1								
30.	54.9	54.9	50.6	1.9	1.7	1.7	149.5	160.1	154.9	5.1	5.5	5.3	637.7	639.4	622.6	21.7	21.9	20.9	026.6	030.3	007.9	011.7	20.7	33.6	21.3	21.5	21.1								
31.	56.8	56.7	52.2	1.9	1.8	1.7	154.6	165.6	160.2	5.1	5.5	5.4	659.2	661.2	643.6	21.5	21.8	21.0	026.6	030.3	007.9	011.7	20.7	33.1	21.3	21.5	19.8								
32.	58.7	58.5	54.0	1.9	1.7	1.8	159.9	170.8	165.7	5.3	5.2	5.4	680.4	682.6	663.9	21.2	21.4	20.3	026.6	030.3	007.9	010.3	20.7	33.1	21.3	21.5	19.8								
33.	60.5	60.3	55.8	1.9	1.8	1.7	165.0	176.0	171.0	5.1	5.2	5.3	702.1	704.6	684.5	21.7	22.0	20.7	026.6	029.2	007.4	010.3	20.7	33.1	21.3	21.3	19.8								
34.	62.5	62.3	57.5	2.0	2.0	1.7	170.1	181.6	176.4	5.1	5.5	5.4	724.3	725.9	705.1	22.3	21.3	20.6	026.1	028.0	007.4	010.3	20.7	33.1	21.3	21.3	19.8								
35.	64.5	64.2	59.2	2.0	1.9	1.7	175.3	187.1	182.2	5.2	5.5	5.8	747.2	747.0	725.5	22.8	21.2	20.4	026.1	027.1	007.4	009.9	20.7	33.1	21.3	21.3	19.8								
36.	66.6	66.4	60.9	2.1	2.1	1.7	180.4	192.5	187.8	5.1	5.4	5.6	769.8	768.5	745.8	22.6	21.5	20.3	026.1	027.1	007.4	009.8	20.1	33.1	21.2	21.1	19.5								
37.	68.6	68.3	62.6	2.0	1.9	1.7	185.4	197.6	192.9	5.1	5.2	5.2	792.0	789.5	766.1	22.2	21.1	20.3	024.1	020.5	007.3	009.8	20.1	33.1	21.2	21.1	19.5								
38.	70.5	70.1	64.3	1.9	1.8	1.7	190.5	202.9	198.2	5.1	5.3	5.2	813.6	810.8	786.4	21.6	21.2	20.3	024.1	018.0	007.3	009.8	20.1	33.1	21.2	20.2	19.5								
39.	72.4	71.9	66.1	1.9	1.8	1.7	195.6	208.2	203.4	5.0	5.3	5.3	835.3	832.1	806.7	21.7	21.3	20.3	024.1	016.8	007.3	009.8	20.1	33.1	21.2	20.2	19.5								
40.	74.3	73.8	67.8	1.9	1.9	1.7	200.6	214.0	208.7	5.0	5.8	5.2	857.3	853.7	827.1	22.0	21.6	20.4	024.1	014.0	007.3	009.8	19.9	33.1	21.2	20.2	19.5								
41.	76.2	75.7	69.5	1.9	1.8	1.8	205.7	219.7	213.9	5.1	5.6	5.2	878.5	874.8	847.8	21.3	21.1	20.7	024.1	011.6	007.3	009.8	19.9	33.1	21.2	20.2	19.5								
42.	78.1	77.6	71.3	1.9	2.0	1.7	210.8	224.9	219.2	5.1	5.3	5.3	899.8	895.7	868.4	21.3	20.9	20.6	024.1	011.1	007.3	009.8	19.9	33.1	21.2	20.2	19.5								
43.	79.9	79.5	73.0	1.9	1.9	1.7	215.9	230.5	224.4	5.0	5.6	5.3	921.7	916.5	889.1	21.9	20.8	20.7	024.1	011.1	006.8	009.8	19.2	33.1	21.2	19.9	19.5								
44.	81.8	81.5	74.0	1.9	2.0	1.7	220.9	235.9	229.7	5.1	5.4	5.3	943.0	937.3	909.6	21.3	20.8	20.4	023.3	011.1	005.6	009.8	19.2	33.1	21.2	19.9	19.5								
45.	83.7	83.4	76.4	1.9	1.9	1.7	226.1	241.1	234.9	5.1	5.2	5.2	964.5	958.1	930.2	21.5	20.8	20.6	023.3	011.1	005.6	009.8	19.2	33.1	21.2	19.9	19.5								
46.	85.6	85.4	78.2	1.9	1.9	1.8	231.2	246.2	240.1	5.1	5.1	5.2	987.2	978.8	950.8	22.8	20.7	20.6	023																

109	2247	2296	1896	24	2.6	1.7	5507	5700	5726	5.1	5.1	5.3	23418	23054	24858	21.3	20.5	27.8	10102	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	17.8	17.7
110	2271	2320	1913	24	2.4	1.7	5558	5752	5779	5.1	5.2	5.3	23634	23258	25116	21.6	20.5	25.9	10102	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	17.8	17.7
111	2296	2345	1930	24	2.4	1.7	5609	5802	5832	5.1	5.0	5.3	23859	23462	25367	22.5	20.3	25.1	10102	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	17.8	17.7
112	2320	2369	1948	2.5	2.4	1.8	5659	585.3	5885	5.1	5.1	5.3	24079	23668	25620	22.0	20.6	25.3	10097	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	17.8	17.7
113	2344	2392	1967	24	2.4	1.8	5711	5904	5937	5.2	5.1	5.3	24291	23873	25873	21.3	20.5	25.3	10097	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
114	2368	2416	1985	24	2.4	1.8	5762	5955	5990	5.1	5.1	5.3	24504	24079	26135	21.3	20.7	26.2	10097	244	2003.3	21.1	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
115	2392	2440	2003	24	2.4	1.8	5815	6007	6042	5.3	5.2	5.3	24716	24285	26390	21.2	20.5	25.5	10097	244	2003.3	21.0	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
116	2417	2464	2020	2.5	2.4	1.8	5871	6059	6095	5.6	5.2	5.2	24930	24489	26651	21.4	20.5	26.1	10097	232	2003.3	19.0	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
117	2441	2488	2038	24	2.4	1.8	5925	6109	6147	5.4	5.1	5.2	25143	24696	26933	21.3	20.6	26.2	10097	232	2003.3	19.0	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
118	2466	2513	2056	2.5	2.5	1.8	5978	6161	6202	5.2	5.1	5.5	25358	24904	27199	21.5	20.8	26.6	10097	232	2003.3	19.0	17.9	32.2	21.2	16.3	17.7
119	2490	2537	2074	24	2.4	1.8	6030	6212	6258	5.2	5.1	5.6	25571	25113	27469	21.3	20.9	27.0	10097	232	2003.3	19.0	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
120	2515	2561	2091	24	2.5	1.8	6082	6263	6313	5.2	5.1	5.5	25784	25321	27740	21.2	20.9	27.1	10097	232	2003.3	18.8	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
121	2538	2585	2109	24	2.4	1.8	6134	6315	6370	5.2	5.2	5.8	25992	25528	28004	20.9	20.7	26.5	10097	232	2003.3	18.8	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
122	2562	2610	2127	24	2.5	1.8	6186	6367	6427	5.2	5.2	5.7	26205	25737	28257	21.3	20.8	25.3	10097	232	2003.3	17.9	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
123	2586	2635	2145	24	2.5	1.8	6237	6418	6483	5.1	5.1	5.7	26418	25945	28526	21.3	20.9	26.9	10097	230	2003.1	17.9	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
124	2611	2658	2162	24	2.4	1.8	6288	6469	6540	5.0	5.2	5.7	26630	26154	28796	21.3	20.9	27.0	10097	221	2003.1	17.9	17.7	32.2	21.2	16.3	17.7
125	2635	2682	2180	24	2.3	1.8	6338	6521	6598	5.1	5.2	5.7	26840	26363	29067	21.0	20.9	27.1	10097	221	2003.5	17.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
126	2659	2706	2198	24	2.4	1.8	6388	6572	6652	5.0	5.1	5.4	27064	26569	29342	22.4	20.6	27.5	10097	221	2002.5	17.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
127	2683	2730	2216	24	2.4	1.8	6439	6624	6705	5.1	5.1	5.3	27302	26777	29624	23.7	20.8	28.2	10097	221	2002.5	17.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
128	2707	2753	2234	24	2.4	1.8	6491	6675	6759	5.2	5.2	5.4	27540	26987	29900	23.9	21.1	25.6	10097	221	2002.5	17.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
129	2731	2777	2251	24	2.3	1.8	6542	6727	6812	5.2	5.2	5.3	27762	27194	30136	22.2	20.6	25.6	10097	221	2002.5	17.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
130	2755	2800	2270	24	2.4	1.8	6593	6778	6864	5.1	5.1	5.3	27991	27401	30391	22.9	20.8	25.5	10097	221	2002.5	17.1	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
131	2778	2824	2287	2.3	2.3	1.8	6643	6830	6918	5.1	5.2	5.4	28224	27606	30661	23.3	20.4	27.0	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
132	2801	2848	2305	2.3	2.4	1.8	6694	6881	6971	5.1	5.1	5.2	28436	27813	30920	21.2	20.8	25.9	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
133	2826	2871	2323	24	2.4	1.8	6744	6933	7023	5.0	5.2	5.3	28651	28028	31205	21.5	21.5	28.5	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
134	2850	2895	2341	2.5	2.3	1.8	6794	6986	7076	5.0	5.3	5.3	28860	28234	31500	20.9	20.6	29.6	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
135	2874	2918	2359	24	2.3	1.8	6845	7036	7131	5.1	5.1	5.5	29072	28450	31781	21.1	21.5	28.0	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
136	2898	2941	2376	24	2.3	1.7	6895	7088	7185	5.0	5.1	5.5	29281	28672	32052	21.0	22.3	27.1	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
137	2922	2965	2394	24	2.4	1.8	6945	7139	7239	5.0	5.1	5.4	29492	28887	32321	21.1	21.5	26.9	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
138	2946	2989	2412	2.3	2.4	1.8	6996	7190	7292	5.1	5.1	5.3	29707	29101	32593	21.4	21.4	27.2	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
139	2969	3013	2430	24	2.4	1.8	7046	7241	7347	5.0	5.1	5.5	29917	29307	32875	21.0	20.6	28.2	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
140	2993	3036	2448	2.3	2.4	1.8	7097	7292	7401	5.1	5.1	5.4	30126	29517	33159	20.9	21.0	28.4	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
141	3016	3060	2465	24	2.4	1.8	7148	7344	7453	5.1	5.2	5.3	30336	29737	33460	21.0	22.0	30.1	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
142	3039	3084	2483	2.3	2.4	1.8	7198	7396	7513	5.0	5.1	5.9	30547	29945	33789	21.1	20.8	27.6	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
143	3063	3107	2501	2.3	2.4	1.8	7248	7446	7569	5.0	5.1	5.6	30762	30155	34071	21.5	21.0	27.5	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
144	3087	3131	2518	2.5	2.4	1.8	7298	7497	7623	5.1	5.1	5.4	30974	30366	34325	21.2	21.1	26.4	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
145	3110	3154	2536	2.3	2.3	1.8	7349	7548	7678	5.0	5.1	5.5	31186	30571	34546	21.2	20.5	27.1	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
146	3133	3178	2554	2.3	2.4	1.8	7399	7600	7733	5.0	5.1	5.5	31397	30778	34820	21.1	20.6	27.4	10097	221	2002.5	16.9	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
147	3157	3202	2571	24	2.4	1.8	7451	7651	7788	5.2	5.1	5.5	31610	30983	35101	21.2	20.5	28.1	10097	221	2002.5	16.7	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
148	3181	3225	2589	24	2.4	1.8	7501	7702	7842	5.0	5.1	5.4	31821	31189	35389	21.2	20.6	28.9	10097	221	2002.5	16.7	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
149	3204	3249	2607	2.3	2.4	1.8	7553	7752	7896	5.2	5.1	5.4	32033	31394	35679	21.2	20.6	29.0	10097	221	2002.5	16.7	17.7	32.2	21.2	16.2	17.7
150	3228	3273	2624	2.3	2.4	1.7	7604	7803	7952	5.1	5.1	5.7	32244	31601	35962	21.1	20.7	28.3	10097	221	2001.6	16.7	17.4	32.2	21.2	16.2	17.7
151	3251	3296	2642	24	2.4	1.8	7657	7854	8011	5.3	5.1	5.9	32454	31809	36259	21.0	20.8	29.6	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	21.2	16.2	17.7
152	3274	3321	2660	2.3	2.4	1.8	7710	7911	8068	5.4	5.7	5.7	32667	32020	36529	20.7	21.1	27.0	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	21.2	16.2	17.7
153	3297	3345	2677	2.3	2.4	1.8	7764	7966	8122	5.3	5.5	5.4	32874	32234	36792	21.3	21.4	26.3	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	21.2	16.2	17.7
154	3321	3370	2695	24	2.5	1.8	7818	8018	8175	5.4	5.2	5.3	33086	32452	37065	21.2	21.8	27.3	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	20.9	16.2	17.7
155	3345	3395	2713	2.3	2.6	1.8	7873	8070	8228	5.5	5.2	5.3	33292	32661	37337	20.6	20.8	27.3	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	20.6	16.2	17.7
156	3368	3420	2730	2.3	2.5	1.8	7926	8122	8280	5.4	5.1	5.2	33512	32883	37614	21.0	22.2	27.7	10097	215	2001.6	16.7	17.4	32.2	20.6	16.2	17.7
157	3392	3445	2751	24	2.4	2.0	7985	8173	8332	5.9	5.2	5.2	33728	33088	3787												

Табела 55. Резултати валидације модела - Sc4

Итер.	Укупно време	Време по итер.	Оцена OF	Итер.	Укупно време	Време по итер.	Оцена OF	Итер.	Укупно време	Време по итер.	Оцена OF
1.	42.2	42.2	2745.2	69.	2824.6	41.8	38.8	137.	5595.1	40.1	38.8
2.	84.9	42.7	2742.5	70.	2865.4	40.7	38.8	138.	5635.6	40.5	38.8
3.	127.4	42.5	2736.3	71.	2907.4	42.0	38.8	139.	5676.6	41.1	38.8
4.	171.4	44.0	2735.4	72.	2949.6	42.2	38.8	140.	5717.8	41.1	38.8
5.	218.3	46.9	2733.6	73.	2990.8	41.2	38.8	141.	5759.4	41.6	38.8
6.	262.7	44.4	50.5	74.	3033.0	42.2	38.8	142.	5799.4	40.0	38.8
7.	306.1	43.4	46.7	75.	3072.9	39.9	38.8	143.	5842.0	42.6	38.8
8.	349.2	43.2	46.7	76.	3113.4	40.5	38.8	144.	5881.8	39.8	38.8
9.	392.4	43.2	46.7	77.	3153.9	40.4	38.8	145.	5924.3	42.4	38.8
10.	435.6	43.2	46.7	78.	3196.7	42.8	38.8	146.	5968.5	44.2	38.8
11.	479.0	43.4	46.7	79.	3237.3	40.6	38.8	147.	6011.4	42.9	38.8
12.	523.2	44.2	46.2	80.	3277.2	39.9	38.8	148.	6054.8	43.4	38.8
13.	565.7	42.5	46.2	81.	3317.9	40.7	38.8	149.	6096.9	42.1	38.8
14.	608.6	42.9	44.4	82.	3359.4	41.5	38.8	150.	6139.4	42.5	38.8
15.	654.1	45.4	43.2	83.	3402.3	42.9	38.8	151.	6181.9	42.5	38.8
16.	696.7	42.6	42.2	84.	3444.6	42.3	38.8	152.	6224.8	42.9	38.8
17.	738.6	41.9	40.8	85.	3485.8	41.2	38.8	153.	6266.1	41.3	38.8
18.	779.6	41.0	40.8	86.	3526.4	40.6	38.8	154.	6307.9	41.9	38.8
19.	821.7	42.1	40.8	87.	3567.1	40.7	38.8	155.	6349.1	41.2	38.8
20.	861.9	40.2	40.3	88.	3608.1	41.0	38.8	156.	6390.5	41.4	38.8
21.	901.5	39.6	40.3	89.	3647.9	39.8	38.8	157.	6432.1	41.6	38.8
22.	941.8	40.2	40.3	90.	3688.2	40.3	38.8	158.	6472.4	40.3	38.8
23.	982.1	40.3	40.3	91.	3728.8	40.6	38.8	159.	6513.1	40.8	38.8
24.	1022.4	40.2	40.3	92.	3769.6	40.8	38.8	160.	6554.5	41.4	38.8
25.	1061.9	39.6	40.3	93.	3810.5	40.9	38.8	161.	6596.6	42.1	38.8
26.	1103.3	41.4	40.3	94.	3850.9	40.4	38.8	162.	6636.4	39.8	38.8
27.	1143.7	40.4	40.2	95.	3891.2	40.2	38.8	163.	6676.6	40.2	38.8
28.	1183.2	39.5	40.2	96.	3932.5	41.4	38.8	164.	6717.4	40.8	38.8
29.	1224.1	40.8	40.2	97.	3971.5	38.9	38.8	165.	6757.6	40.2	38.8
30.	1264.0	39.9	40.2	98.	4011.8	40.4	38.8	166.	6798.4	40.8	38.8
31.	1304.1	40.1	40.2	99.	4052.3	40.4	38.8	167.	6840.0	41.6	38.8
32.	1343.4	39.3	40.2	100.	4093.5	41.2	38.8	168.	6881.6	41.6	38.8
33.	1382.1	38.7	40.2	101.	4133.3	39.8	38.8	169.	6922.9	41.3	38.8
34.	1422.4	40.3	40.2	102.	4173.3	40.1	38.8	170.	6963.6	40.7	38.8
35.	1460.9	38.5	40.2	103.	4214.5	41.1	38.8	171.	7003.7	40.1	38.8
36.	1499.8	38.9	40.2	104.	4255.2	40.7	38.8	172.	7044.4	40.8	38.8
37.	1540.0	40.3	40.2	105.	4296.2	41.0	38.8	173.	7085.8	41.3	38.8
38.	1580.1	40.0	40.2	106.	4335.5	39.3	38.8	174.	7125.2	39.4	38.8
39.	1620.4	40.3	40.2	107.	4375.9	40.4	38.8	175.	7168.7	43.6	38.8
40.	1660.0	39.7	40.2	108.	4417.1	41.2	38.8	176.	7209.8	41.1	38.8
41.	1700.0	40.0	40.2	109.	4457.9	40.8	38.8	177.	7251.1	41.3	38.8
42.	1740.0	40.0	39.7	110.	4498.1	40.3	38.8	178.	7292.9	41.8	38.8
43.	1780.3	40.3	39.4	111.	4538.9	40.8	38.8	179.	7335.3	42.5	38.8
44.	1818.9	38.6	39.4	112.	4578.5	39.6	38.8	180.	7376.5	41.1	38.8
45.	1858.1	39.2	39.4	113.	4616.7	38.1	38.8	181.	7417.5	41.1	38.8
46.	1897.5	39.4	39.4	114.	4657.0	40.3	38.8	182.	7457.1	39.6	38.8
47.	1937.2	39.6	39.4	115.	4697.2	40.2	38.8	183.	7497.8	40.7	38.8
48.	1977.5	40.3	39.4	116.	4737.4	40.2	38.8	184.	7538.8	41.0	38.8
49.	2018.5	41.0	39.2	117.	4778.6	41.2	38.8	185.	7579.2	40.4	38.8
50.	2058.7	40.2	38.9	118.	4818.8	40.2	38.8	186.	7619.8	40.6	38.8
51.	2098.3	39.7	38.9	119.	4859.6	40.8	38.8	187.	7660.7	40.8	38.8
52.	2137.9	39.5	38.9	120.	4901.0	41.4	38.8	188.	7701.6	41.0	38.8
53.	2178.2	40.3	38.8	121.	4941.8	40.8	38.8	189.	7742.3	40.6	38.8
54.	2218.5	40.3	38.8	122.	4982.5	40.7	38.8	190.	7783.6	41.4	38.8
55.	2258.8	40.3	38.8	123.	5024.9	42.4	38.8	191.	7823.7	40.1	38.8
56.	2299.0	40.2	38.8	124.	5066.3	41.5	38.8	192.	7864.4	40.7	38.8
57.	2339.3	40.3	38.8	125.	5108.2	41.9	38.8	193.	7905.3	40.9	38.8
58.	2379.9	40.7	38.8	126.	5149.4	41.1	38.8	194.	7944.5	39.2	38.8
59.	2419.7	39.8	38.8	127.	5189.1	39.7	38.8	195.	7985.4	40.9	38.8
60.	2460.1	40.4	38.8	128.	5229.5	40.4	38.8	196.	8026.2	40.8	38.8
61.	2500.9	40.8	38.8	129.	5269.3	39.9	38.8	197.	8067.5	41.3	38.8
62.	2540.8	39.9	38.8	130.	5309.4	40.1	38.8	198.	8107.9	40.4	38.8
63.	2580.7	40.0	38.8	131.	5350.4	41.0	38.8	199.	8149.0	41.1	38.8
64.	2621.3	40.6	38.8	132.	5390.8	40.4	38.8	200.	8189.7	40.7	38.8
65.	2662.3	40.9	38.8	133.	5432.1	41.3	38.8				
66.	2701.1	38.8	38.8	134.	5473.0	41.0	38.8				
67.	2741.8	40.7	38.8	135.	5513.6	40.6	38.8				
68.	2782.8	41.0	38.8	136.	5554.9	41.3	38.8				

ПРИЛОГ 8 – База препрека

Извод из списка препрека коришћених у оквиру нумеричког примера (дефинисаних у односу на THR 36) дат је у наредној табели.

Табела 56. База препрека

Р. бр.	X (m)	Y (m)	ELEV (m)	Ознака	Тип	Р. бр.	X (m)	Y (m)	ELEV (m)	Ознака	Тип	Р. бр.	X (m)	Y (m)	ELEV (m)	Ознака	Тип
1.	-17838	19477	1834	SPOT_ELEV_1834	Terrain	59.	-14188	-13815	306	SPOT_ELEV_306	Terrain	117.	-15906	11256	582	SPOT_ELEV_582	Terrain
2.	-18363	19780	1778	SPOT_ELEV_1778	Terrain	60.	-14443	-13108	145	SPOT_ELEV_145	Terrain	118.	-17404	13423	862	SPOT_ELEV_862	Terrain
3.	-18467	20721	1873	SPOT_ELEV_1873	Terrain	61.	-13980	-11572	70	SPOT_ELEV_70	Terrain	119.	-16475	13032	757	SPOT_ELEV_757	Terrain
4.	-18184	22758	1289	SPOT_ELEV_1289	Terrain	62.	-14818	-12265	66	SPOT_ELEV_66	Terrain	120.	-17012	12676	765	SPOT_ELEV_765	Terrain
5.	-17812	20642	1663	SPOT_ELEV_1663	Terrain	63.	-13926	-10766	33	SPOT_ELEV_33	Terrain	121.	-17560	12588	775	SPOT_ELEV_775	Terrain
6.	-17426	21988	1375	SPOT_ELEV_1375	Terrain	64.	-14579	-10301	302	SPOT_ELEV_302	Terrain	122.	-16372	12325	664	SPOT_ELEV_664	Terrain
7.	-17715	23801	1557	SPOT_ELEV_1557	Terrain	65.	-15234	-11227	204	SPOT_ELEV_204	Terrain	123.	-17799	14162	896	SPOT_ELEV_896	Terrain
8.	-16777	19343	1407	SPOT_ELEV_1407	Terrain	66.	-14360	-9190	34	SPOT_ELEV_34	Terrain	124.	-16888	14498	854	SPOT_ELEV_854	Terrain
9.	-16097	20551	1438	SPOT_ELEV_1438	Terrain	67.	-14695	-9102	53	SPOT_ELEV_53	Terrain	125.	-17103	15553	915	SPOT_ELEV_915	Terrain
10.	-16859	20825	1336	SPOT_ELEV_1336	Terrain	68.	-15289	-9705	95	SPOT_ELEV_95	Terrain	126.	-16773	16158	1072	SPOT_ELEV_1072	Terrain
11.	-16680	21803	1366	SPOT_ELEV_1366	Terrain	69.	-14222	-8201	33	SPOT_ELEV_33	Terrain	127.	-17799	15804	1000	SPOT_ELEV_1000	Terrain
12.	-16279	22826	1422	SPOT_ELEV_1422	Terrain	70.	-14878	-7826	34	SPOT_ELEV_34	Terrain	128.	-16301	15313	937	SPOT_ELEV_937	Terrain
13.	-16865	22955	1443	SPOT_ELEV_1443	Terrain	71.	-15528	-8026	90	SPOT_ELEV_90	Terrain	129.	-17717	14992	920	SPOT_ELEV_920	Terrain
14.	-15506	19667	1483	SPOT_ELEV_1483	Terrain	72.	-15721	-8482	96	SPOT_ELEV_96	Terrain	130.	-16351	17508	1207	SPOT_ELEV_1207	Terrain
15.	-15692	21103	1358	SPOT_ELEV_1358	Terrain	73.	-14555	-5694	142	SPOT_ELEV_142	Terrain	131.	-16709	16701	1146	SPOT_ELEV_1146	Terrain
16.	-15379	22478	1456	SPOT_ELEV_1456	Terrain	74.	-15593	-5390	96	SPOT_ELEV_96	Terrain	132.	-17650	16821	1192	SPOT_ELEV_1192	Terrain
17.	-13869	19437	1260	SPOT_ELEV_1260	Terrain	75.	-15637	-6233	53	SPOT_ELEV_53	Terrain	133.	-18310	18438	1444	SPOT_ELEV_1444	Terrain
18.	-14675	19572	1652	SPOT_ELEV_1652	Terrain	76.	-14253	-4713	215	SPOT_ELEV_215	Terrain	134.	-17550	17997	1391	SPOT_ELEV_1391	Terrain
19.	-14117	20394	1206	SPOT_ELEV_1206	Terrain	77.	-16107	-4759	52	SPOT_ELEV_52	Terrain	135.	-16773	18230	1350	SPOT_ELEV_1350	Terrain
20.	-14807	20598	1401	SPOT_ELEV_1401	Terrain	78.	-15051	-4784	211	SPOT_ELEV_211	Terrain	136.	-11838	-16964	719	SPOT_ELEV_719	Terrain
21.	-14507	21469	1280	SPOT_ELEV_1280	Terrain	79.	-14724	-2718	264	SPOT_ELEV_264	Terrain	137.	-11835	-17535	774	SPOT_ELEV_774	Terrain
22.	-15048	21596	1423	SPOT_ELEV_1423	Terrain	80.	-14768	-3257	251	SPOT_ELEV_251	Terrain	138.	-11098	-17031	707	SPOT_ELEV_707	Terrain
23.	-14576	22258	1441	SPOT_ELEV_1441	Terrain	81.	-15588	-2825	49	SPOT_ELEV_49	Terrain	139.	-11361	-17939	754	SPOT_ELEV_754	Terrain
24.	-13114	19827	1058	SPOT_ELEV_1058	Terrain	82.	-15886	-3588	36	SPOT_ELEV_36	Terrain	140.	-12537	-16950	692	SPOT_ELEV_692	Terrain
25.	-13156	20470	1092	SPOT_ELEV_1092	Terrain	83.	-14806	-1505	136	SPOT_ELEV_136	Terrain	141.	-11390	-15933	628	SPOT_ELEV_628	Terrain
26.	-13841	21982	1233	SPOT_ELEV_1233	Terrain	84.	-15848	-1903	232	SPOT_ELEV_232	Terrain	142.	-12414	-15473	562	SPOT_ELEV_562	Terrain
27.	-12079	20314	1172	SPOT_ELEV_1172	Terrain	85.	-16306	-2103	250	SPOT_ELEV_250	Terrain	143.	-12308	-16177	602	SPOT_ELEV_602	Terrain
28.	-12686	21122	1233	SPOT_ELEV_1233	Terrain	86.	-14839	-103	131	SPOT_ELEV_131	Terrain	144.	-12193	-14468	468	SPOT_ELEV_468	Terrain
29.	-11472	19964	1143	SPOT_ELEV_1143	Terrain	87.	-15073	-873	114	SPOT_ELEV_114	Terrain	145.	-11357	-13643	429	SPOT_ELEV_429	Terrain
30.	-9945	19541	171	SPOT_ELEV_171	Terrain	88.	-16023	-246	139	SPOT_ELEV_139	Terrain	146.	-11846	-13787	403	SPOT_ELEV_403	Terrain
31.	-15404	20339	703	SPOT_ELEV_703	Terrain	89.	-15780	-1040	99	SPOT_ELEV_99	Terrain	147.	-13305	-13497	387	SPOT_ELEV_387	Terrain
32.	-15522	-16836	624	SPOT_ELEV_624	Terrain	90.	-14731	950	169	SPOT_ELEV_169	Terrain	148.	-12698	-13438	388	SPOT_ELEV_388	Terrain
33.	-15619	-15088	262	SPOT_ELEV_262	Terrain	91.	-16081	1467	228	SPOT_ELEV_228	Terrain	149.	-12011	-11436	249	SPOT_ELEV_249	Terrain
34.	-15845	-13442	98	SPOT_ELEV_98	Terrain	92.	-15972	766	145	SPOT_ELEV_145	Terrain	150.	-11733	-11495	302	SPOT_ELEV_302	Terrain
35.	-15489	-14154	119	SPOT_ELEV_119	Terrain	93.	-15033	2812	275	SPOT_ELEV_275	Terrain	151.	-11916	-12577	394	SPOT_ELEV_394	Terrain
36.	-15723	-11853	74	SPOT_ELEV_74	Terrain	94.	-15484	1976	206	SPOT_ELEV_206	Terrain	152.	-13163	-12047	220	SPOT_ELEV_220	Terrain
37.	-15646	-12418	114	SPOT_ELEV_114	Terrain	95.	-15461	4193	327	SPOT_ELEV_327	Terrain	153.	-12602	-12133	242	SPOT_ELEV_242	Terrain
38.	-15955	-10732	136	SPOT_ELEV_136	Terrain	96.	-15867	3099	388	SPOT_ELEV_388	Terrain	154.	-12983	-11242	90	SPOT_ELEV_90	Terrain
39.	-16028	-10140	137	SPOT_ELEV_137	Terrain	97.	-15370	5009	381	SPOT_ELEV_381	Terrain	155.	-12852	-10334	48	SPOT_ELEV_48	Terrain
40.	-16185	-7401	74	SPOT_ELEV_74	Terrain	98.	-16839	4384	371	SPOT_ELEV_371	Terrain	156.	-12247	-9267	110	SPOT_ELEV_110	Terrain
41.	-16195	-6393	94	SPOT_ELEV_94	Terrain	99.	-16138	4636	302	SPOT_ELEV_302	Terrain	157.	-12993	-9709	159	SPOT_ELEV_159	Terrain
42.	-16527	-2845	196	SPOT_ELEV_196	Terrain	100.	-15417	6448	565	SPOT_ELEV_565	Terrain	158.	-13502	-9631	30	SPOT_ELEV_30	Terrain
43.	-16572	-1056	88	SPOT_ELEV_88	Terrain	101.	-16336	6295	550	SPOT_ELEV_550	Terrain	159.	-12311	-7954	33	SPOT_ELEV_33	Terrain
44.	-16867	1153	102	SPOT_ELEV_102	Terrain	102.	-16375	5811	437	SPOT_ELEV_437	Terrain	160.	-13408	-8207	188	SPOT_ELEV_188	Terrain
45.	-16989	3034	612	SPOT_ELEV_612	Terrain	103.	-15417	7311	637	SPOT_ELEV_637	Terrain	161.	-12948	-8469	33	SPOT_ELEV_33	Terrain
46.	-16971	3763	79	SPOT_ELEV_79	Terrain	104.	-17067	7299	511	SPOT_ELEV_511	Terrain	162.	-13541	-6811	33	SPOT_ELEV_33	Terrain
47.	-17216	5588	336	SPOT_ELEV_336	Terrain	105.	-16821	7816	450	SPOT_ELEV_450	Terrain	163.	-12320	-4959	229	SPOT_ELEV_229	Terrain
48.	-17458	8164	427	SPOT_ELEV_427	Terrain	106.	-16430	7137	395	SPOT_ELEV_395	Terrain	164.	-13803	-5376	202	SPOT_ELEV_202	Terrain
49.	-13277	-17075	780	SPOT_ELEV_780	Terrain	107.	-15534	8716	490	SPOT_ELEV_490	Terrain	165.	-13034	-5539	119	SPOT_ELEV_119	Terrain
50.	-14457	-16955	614	SPOT_ELEV_614	Terrain	108.	-16684	8630	506	SPOT_ELEV_506	Terrain	166.	-12554	-4148	258	SPOT_ELEV_258	Terrain
51.	-14477	-18045	721	SPOT_ELEV_721	Terrain	109.	-17134	9052	475	SPOT_ELEV_475	Terrain	167.	-13278	-4622	210	SPOT_ELEV_210	Terrain
52.	-13691	-17714	840	SPOT_ELEV_840	Terrain	110.	-16324	8227	522	SPOT_ELEV_522	Terrain	168.	-13841	-3946	283	SPOT_ELEV_283	Terrain
53.	-13549	-15805	610	SPOT_ELEV_610	Terrain	111.	-17396	10681	464	SPOT_ELEV_464	Terrain	169.	-14001	-3061	224	SPOT_ELEV_224	Terrain
54.	-13833	-16550	601	SPOT_ELEV_601	Terrain	112.	-16442	10123	549	SPOT_ELEV_549	Terrain	170.	-13085	-2945	153	SPOT_ELEV_153	Terrain
55.	-14893	-16606	662	SPOT_ELEV_662	Terrain	113.	-16932	9930	482	SPOT_ELEV_482	Terrain	171.	-13915	-1308	139	SPOT_ELEV_139	Terrain
56.	-13381	-14611	437	SPOT_ELEV_437	Terrain	114.	-15975	9845	578	SPOT_ELEV_578	Terrain	172.	-14112	-2162	199	SPOT_ELEV_199	Terrain
57.	-14309	-15049	484	SPOT_ELEV_484	Terrain	115.	-17232	11628	632	SPOT_ELEV_632	Terrain	173.	-12946	-105	28	SPOT_ELEV_28	Terrain
58.	-14952	-15351	506	SPOT_ELEV_506	Terrain	116.	-17153	10879	466	SPOT_ELEV_466	Terrain	174.	-14230	401	163	SPOT_ELEV_163	Terrain
3310	-5032	-1454	74	LYPG_OB2C_0007	Pole	3320	-12695	-4316	257	LYPG_OB2B_0020	Pole	3330	-14288	-3510	262	LYPG_OB2B_0010	Tree
3311	-4986	-1714	69	LYPG_OB2C_0006	Pole	3321	-12939	-4001	257	LYPG_OB2B_0019	Antenna	3331	-14478	-3460	255	LYPG_OB2B_0009	Tree
3312	-4960	-1861	72	LYPG_OB2C_0005	Pole	3322	-13279	-4025	267	LYPG_OB2B_0018	Tree	3332	-14278	-3358	252	LYPG_OB2B_0008	Tree
3313	2310	-627	55	LYPG_OB2C_0004	Liq.pole	3323	-13652	-4081	282	LYPG_OB2B_0017	Tree	3333	-14669	-3240	255	LYPG_OB2B_0007	Tree
3314	2309	-716	55	LYPG_OB2C_0003	Liq.pole	3324	-13599	-3963	286	LYPG_OB2B_0016	Tree	3334	-14607	-2994	244	LYPG_OB2B_0006	Tree
3315	2191	-710	55	LYPG_OB2C_0002	Liq.pole	3325	-13804	-3919	288	LYPG_OB2B_0015	Tree	3335	-14502	-2783	251	LYPG_OB2B_0005	Tree
3316	2198	-619	55	LYPG_OB2C_0001	Liq.pole	3326	-13902	-3914	285	LYPG_OB2B_0014	Tree	3336	-14579	-2733	257	LYPG_OB2B_0004	Tree
3317	-10817	-5534	295	LYPG_OB2B_0023	Antenna	3327	-14021	-3744	277	LYPG_OB2B_0013	Tree	3337	-14693	-2704	265	LYPG_OB2B_0003	Antenna
3318	-10880	-5867	293	LYPG_OB2B_0022	Tree	3328	-14249	-3744	269	LYPG_OB2B_0012	Tree	3338	-14726	-2574	247	LYPG_OB2B_0002	Tree
3319	-10994	-6083	280	LYPG_OB2B_0021	Tree	3329	-14370	-3700	264	LYPG_OB2B_0011	Tree	3339	-14018	-333	204	LYPG_OB2B_0001	Antenna

Биографија аутора

Велибор Андрић је рођен 11. јула 1985. године у Шапцу, Република Србија. Након завршеног осмогодишњег школовања, као носилац Вукове дипломе и ђак генерације општине Коцељева, уписује „Ваљевску гимназију“, природно-математички смер.

Као одличан ученик 2004. године школовање наставља на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на Смеру за ваздушни саобраћај и транспорт. Основне академске студије је завршио са просечном оценом 9.27. Дипломирао је 23. децембра 2009. године на Катедри за аеродроме и безбедност ваздушне пловидбе са највишом оценом, на тему „Airspace Management Improvements Initiative and Solutions“ под менторством проф. др Обрада Бабића. Дипломски рад је настао као резултат стручне праксе обављене у Европској организацији за безбедност ваздушне пловидбе (European Organisation for the Safety of Air Navigation – Eurocontrol). У току основних академских студија био је стипендиста Министарства просвете Републике Србије, као и добитник диплома „Свети Сава“ за остварен изузетан успех у трећој и петој години студија на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду.

Као носилац Стипендије Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије за младе истраживаче – докторанте, школске 2009/2010. године уписује докторске академске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду. Током 2010. године бива изабран у звање истраживач сарадник на Катедри за аеродроме и безбедност ваздушне пловидбе, где је био ангажован на више истраживачких и консултантских пројеката, и учесник домаћих и међународних конференција, семинара, радионица и летњих школа.

Другу половину 2012. и почетак 2013. године провео је на стручном усавршавању у Контроли летења Србије и Црне Горе SMATSA доо Београд, у Служби за управљање ваздушним саобраћајем. Након тога своје професионално искуство даље развија на радном месту инжењера за навигацију у авиокомпанији Air Serbia, у Служби летачко оперативног инжењеринга.

Тренутно је запослен у Контроли летења Србије и Црне Горе SMATSA доо Београд, , на пословима пројектовања и имплементације процедура за инструментално летење. Учествовао је у пројектима имплементације PBN процедура за долазак, прилаз и одлазак на аеродромима у Београду, Нишу, Краљеву и Тивту, као и изради идејног решења PBN процедура за аеродром Подгорица. Члан је Међународног удружења за пројектовање и валидација процедура летења (International Flight Procedure Design and Validation Association - IFPDVA), као и Eurocontrol радне групе за подршку имплементацији PBN процедура (PBN Implementation Support Group - PBN ISG).

У току своје академске и стручне каријере редовно је присутан на релевантним конференцијама, семинарима и окупљањима из области ваздушног саобраћаја, а такође је у својству аутора и коаутора учествовао у изради низа публикација и стручних радова.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора **Велибор Андрић**

Број индекса **ДС09Д001**

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Методологија оптимизације процедура инструменталног прилажења

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду,

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Велибор Андрић**

Број индекса **ДС09Д001**

Студијски програм **Саобраћај**

Наслов рада **Методологија оптимизације процедура инструменталног прилажења**

Ментор **проф. др Феђа Нетјасов, редовни професор**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду,

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Методологија оптимизације процедура инструменталног прилажења

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду,

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

