

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Tatjana Ž. Krstić Simić

**UTICAJ KOMPLEKSNOSTI  
SAOBRAĆAJA NA MANEVARSKIM  
POVRŠINAMA NA ODRŽIVI RAZVOJ  
AERODROMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Tatjana Ž. Krstić Simić

**INFLUENCE OF AIRFIELD TRAFFIC  
COMPLEXITY ON SUSTAINABLE  
AIRPORT DEVELOPMENT**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

**Mentor:**

*Prof. dr Obrad Babić*, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

**Članovi Komisije:**

*Prof. dr Obrad Babić*, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

*Dr Milan Janić*, viši istraživač, Institut za Transport, Tehnički univerzitet u Delftu,  
Holandija; naučni savetnik, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

*Prof. dr Milica Kalić*, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

**Datum odbrane:**

---

Ovo istraživanje podržano je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz naučno-istraživački projekat Instituta Saobraćajnog fakulteta: *“Podrška održivom razvoju sistema vazdušnog saobraćaja Republike Srbije”* (broj TR36033), 2011-2015.

---

*Želim da se zahvalim svom mentoru, prof. dr Obradu Babiću, na ogromnoj podršci koju mi je pružio tokom izrade doktorske disertacije. Takođe, zahvaljujem se članovima komisije na korisnim savetima i sugestijama, koji su svakako doprineli kvalitetu ovog rada.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima, koji su me uvek pravilno usmeravali i podržavali u svim životnim odlukama.*

*Veliku zahvalnost dugujem i svojoj porodici na podršci i razumevanju tokom prethodnih godina.*

## **Uticaj kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama na održivi razvoj aerodroma**

### **Rezime:**

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem na postojećim i/ili planiranim resursima aerodroma (poletno-sletnim, rulnim stazama, putanjama za prilaz, sletanje i odlet vazduhoplova), od strane kontrole letenja, na kompleksnost saobraćaja na aerodromu, kao i ocena uticaja kompleksnosti saobraćaja na mere performansi obavljanja saobraćaja na aerodromima, kao pokazatelja održivog razvoja aerodroma. Naime, za datu (trenutnu ili planiranu) saobraćajnu potražnju i konfiguraciju manevarskih površina aerodroma, primena različitih mera upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja može dovesti do generisanja saobraćajnih situacija različite kompleksnosti na aerodromu, što dalje može uticati na efikasnost funkcionisanja aerodroma, a time i na održivi razvoj aerodroma.

Cilj istraživanja u disertaciji bio je da se ustanovi da li postoji i (ukoliko postoji) kakva je međusobna zavisnost između dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja, a u svrhu ocene održivog razvoja aerodroma. Takođe, cilj je bio i da se ustanovi da li se na osnovu promene dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, koja nastaje kao rezultat primene različitih načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, promene intenziteta saobraćaja i/ili promene u aerodromskoj infrastrukturi (npr. izgradnja nove poletno-sletne i/ili rulnih staza), može oceniti i promena u efikasnosti obavljanja saobraćaja (sa aspekta odabranih mera neefikasnosti). Pored analize zavisnosti između dinamičke kompleksnosti i pojedinih mera neefikasnosti, analizirana je i međusobna zavisnost između samih mera neefikasnosti.

U disertaciji je predložena metodologija za ocenu uticaja kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma na efikasnost obavljanja saobraćaja, a u svrhu

ocene održivog razvoja aerodroma. U okviru predložene metodologije su analizirani koncept i mera kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama i u neposrednoj okolini aerodroma (nazvana Dinamička kompleksnost). Kompleksnost je posmatrana kao mera kvantiteta i kvaliteta međusobnih interakcija vazduhoplova na manevarskim površinama i u neposrednoj okolini aerodroma, pod određenim uslovima. Kako bi se bolje razumeli uticaji različitih ATM strateških i taktičkih mera na performanse sistema, definisano je i analizirano nekoliko mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja, i to: vremenska neefikasnost, neefikasnost potrošnje goriva i emisije gasova i troškovna neefikasnost.

Primena predložene metodologije ilustrovana je na primeru hipotetičkog aerodroma za dve konfiguracije manevarskih površina (trenutnu i planiranu), za različite saobraćajne potražnje i taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja. Simulacija saobraćaja u sprovedenim eksperimentima izvršena je korišćenjem simulacionog modela SIMMOD.

Uporednom analizom dobijenih rezultata utvrđeno je da, generalno posmatrano, između promena vrednosti dinamičke kompleksnosti i mera neefikasnosti, nastalih usled promene taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja (taktičke mere) i promena u infrastrukturi (strateške mere), ne postoji jednoznačna (na način definisan u disertaciji) međusobna zavisnost.

Jedan od glavnih naučnih doprinosa ove doktorske disertacije je u uvođenju u razmatranje uticaja dinamičke kompleksnosti saobraćaja, kao potencijalnog generatora zagušenja saobraćaja na aerodromima, na održivi razvoj aerodroma, kao i u analizi međusobne zavisnosti između kompleksnosti saobraćajne situacije na aerodromu i analiziranih pokazatelja efikasnosti aerodroma.

Istraživanje predstavljeno u ovoj disertaciji, kao i eventualna buduća istraživanja u ovoj oblasti mogu predstavljati polaznu osnovu za razvoj alata za podršku u odlučivanju, kako kontrolorima letenja tako i planerima i projektantima aerodroma, koji bi im omogućio procenu uticaja primene određenih taktičkih i/ili strateških mera na

kompleksnost saobraćaja i efikasnost funkcionisanja aerodroma, a u svrhu ocene održivog razvoja aerodroma.

**Ključne reči:** Upravljanje vazдушnim saobraćajem; Aerodromi; Kompleksnost saobraćaja; Održivi razvoj; Efikasnost

**Naučna oblast:** Saobraćajno inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Aerodromi i bezbednost vazdušne plovidbe

**UDK:**



## **Influence of Airfield Traffic Complexity on Sustainable Airport Development**

### **Abstract:**

This thesis deals with influence of different traffic and airport resources (runways, taxiways, arrival and departure routes) management, by air traffic control, onto airport traffic complexity; additionally, the thesis evaluates traffic complexity influence on airport traffic performance measures, as indicators of sustainable airport development. Namely, for a given (current or planned) traffic demand and airport airfield configuration, different air traffic management measures could result in different airport traffic complexity, influencing different airport efficiency and consequently affecting sustainable airport development.

The objective of this thesis is to present the research on the relationship (if any) between airport traffic dynamic complexity and traffic inefficiency measures, in order to evaluate sustainable development of an airport. Another aim is to establish whether changes in the airport traffic dynamic complexity (resulting from various traffic management tactics applied by air traffic control, traffic intensity changes and/or airport infrastructure changes - such as construction of a new RWY and /or taxiway) may be used as a basis to evaluate changes in traffic inefficiencies (in terms of selected measures of inefficiency). In addition to dependencies between dynamic complexity and inefficiency measures, interdependence between the individual measures of inefficiency is also analyzed.

The thesis proposes a methodology for evaluation of airport airfield traffic complexity influence on airport traffic efficiency in order to evaluate sustainable airport development. The proposed methodology analyzes the concept and measure of airport traffic complexity – called Dynamic Complexity, at airport airfields and in the airport vicinity. Complexity is observed as a measure of quantity and quality of traffic interactions on an airport and in the airport vicinity, under certain circumstances. In addition, so as to provide better understanding about the impacts of different ATM strategic and tactical measures tactics on the airport system performances, several flight

inefficiency metrics are defined and analyzed, and these are: Time, Fuel, Emission and Cost Inefficiency.

Application of the proposed methodology is illustrated with a hypothetical airport, for different airport airfield configurations (current and planned), for different traffic demands and tactics applied by air traffic control. Simulation of the given traffic was performed using SIMMOD simulation model.

A comparative analysis of the results obtained shows that, generally speaking, there is no unambiguous (as defined in the dissertation) interdependence between the changes in the values of dynamic complexity and inefficiency measures caused by changes in traffic management tactics applied by air traffic control (tactical measures) and changes in infrastructure (strategic measures).

One of the main contributions of this thesis is the fact that it starts considering the impact that dynamic traffic complexity, as a potential generator of traffic congestion at airports, has over sustainable airport development. Analysis of interdependence between complexity of traffic situation at the airport and airport efficiency indicators represents another contribution of this research.

The research presented in this thesis, as well as possible future research in this field, may serve as a starting point for development of a decision support tool, for both air traffic controllers and airport planners and designers; such a tool would allow of assessing the impact exerted by applying certain tactical and/or strategic measures on traffic complexity and the airport operation efficiency, with a view to evaluating the sustainable airport development.

**Keywords:** Air Traffic Management; Airport; Traffic Complexity; Sustainable development; Efficiency

**Scientific field:** Transport and Traffic Engineering

**Specific scientific field:** Airports and Air Traffic Safety

**UDK:**

## SADRŽAJ

Spisak tabela .....	viii
Spisak slika .....	ix
Spisak skraćenica .....	xi
1. UVOD .....	1
2. SISTEM VAZDUŠNOG SAOBRAĆAJA .....	6
2.1 Kontrola letenja i upravljanje saobraćajem na aerodromima .....	7
2.1.1 Taktike kontrole letenja – pregled literature .....	8
2.2 Pregled istraživanja iz oblasti kompleksnosti saobraćaja u sistemu kontrole letenja .....	11
2.2.1 Kompleksnost saobraćaja u sektorima oblasne kontrole letenja...	11
2.2.2 Kompleksnost saobraćaja na aerodromima i u okolini aerodroma	15
2.3 Pregled istraživanja iz oblasti održivog razvoja vazdušnog saobraćaja	16
2.3.1 Definicije održivosti, održivog razvoja i održivog transporta .....	16
2.3.2 Koncept i problemi održivog razvoja vazdušnog saobraćaja .....	19
2.3.3 Koncept i problemi održivog razvoja aerodroma .....	22
2.4 Rezime postojećih istraživanja vs. planirano istraživanje u disertaciji..	26
3. ISTRAŽIVANJE UTICAJA KOMPLEKSNOŠTI SAOBRAĆAJA NA MANEVARSKIM POVRŠINAMA NA ODRŽIVI RAZVOJ AERODROMA .....	27
3.1 Pretpostavke i početni uslovi za razvoj metodologije .....	27
3.2 Struktura metodologije .....	28
3.2.1 Definisavanje koncepta i mere kompleksnosti saobraćaja na aerodromu .....	28
3.2.2 Definisavanje koncepta i indikatora održivosti: mere neefikasnosti .....	33

4.	PRIMENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE .....	45
4.1	Pretpostavke za primenu metodologije .....	45
4.2	Ulazni podaci .....	47
4.2.1	Konfiguracije aerodroma .....	47
4.2.2	Taktike upravljanja saobraćajem u eksperimentima .....	48
4.2.3	Stuktura i karakteristike saobraćaja .....	50
4.2.4	Faktori i težine faktora kompleksnosti .....	52
4.2.5	Vrednosti indikatora neefikasnosti .....	53
4.3	Razmatrani eksperimenti i karakteristike .....	54
4.4	Rezultati i diskusija .....	56
4.4.1	Taktičke ATM mere (ATC taktike) – Eksperiment A .....	56
4.4.2	Strateške i taktičke ATM mere - Eksperiment B .....	69
4.4.3	Izvedeni zaključci za Eksperimente A i B .....	87
5.	ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA .....	89
	Literatura .....	94
	Prilog I - Faktori kompleksnosti saobraćaja u kontroli letenja .....	104
	Prilog II - Održivost sistema vazdušnog saobraćaja .....	108
	Biografija .....	134

## Spisak tabela

Tabela 3.1 Troškovi emisije vazduhoplova (Euro/kg) .....	41
Tabela 3.2 Troškovi buke (Euro/minut) .....	42
Tabela 4.1 Razdvajanje vazduhoplova u prilazu u NM .....	51
Tabela 4.2 Zauzetost PSS nakon sletanja (u sekundama) .....	51
Tabela 4.3 Analizirani eksperimenti i scenariji .....	54
Tabela 4.4 Kašnjenja vazduhoplova - Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	57
Tabela 4.5 Kašnjenja vazduhoplova - Scenariji 2B, 3 i 4 .....	70

## Spisak slika

Slika 2.1.	Četiri osnovna elementa održivosti transportnog sistema .....	17
Slika 2.2.	Vizuelizacija predloženog alata za ocenu održivosti .....	19
Slika 4.1.	Aerodrom sa jednom PSS i rulnom stazom paralelnom sa PSS .....	47
Slika 4.2.	Aerodrom sa dve PSS i rulnom stazom paralelnom sa PSS .....	47
Slika 4.3.	Prosečna dužina reda u poletanju – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	57
Slika 4.4.	Vrednosti DC(t) – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	58
Slika 4.5.	Vrednosti DC i neefikasnosti – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	59
Slika 4.6.	Vrednosti DC i neefikasnosti sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	60
Slika 4.7.	Vrednosti DC i neefikasnosti za poletanja sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	61
Slika 4.8.	Vrednosti DC i neefikasnosti za sletanja sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	61
Slika 4.9.	Promena TI vs. promena DC – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	64
Slika 4.10.	Promena FI (EI).vs. promena DC – Scenario 1 vs. Scenario 2 .....	64
Slika 4.11.	Promena CI vs. promena DC – Scenario 1 vs Scenario 2 .....	65
Slika 4.12.	Potrošeno gorivo i emisija gasova - različite ATC taktike .....	66
Slika 4.13.	Emisija gasova - različite ATC taktike .....	66
Slika 4.14.	Prosečna dužina reda u poletanju – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	71
Slika 4.15.	Vrednosti DC(t) - Scenariji 2B, 3 i 4 .....	72
Slika 4.16.	Vrednosti DC i neefikasnosti – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	74
Slika 4.17.	Vrednosti DC i neefikasnosti: Poletanja vs. sletanja – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	75

Slika 4.18. Vrednosti mera neefikasnosti sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	78
Slika 4.19. Vrednosti neefikasnosti za poletanja sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	79
Slika 4.20. Vrednosti neefikasnosti za sletanja sa detaljnim prikazom <i>EI</i> – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	80
Slika 4.21. Promena TI vs. promena DC – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	82
Slika 4.22. Promena FI (EI) vs. promena DC– Scenariji 2B, 3 i 4 .....	83
Slika 4.23. Promena CI vs. promena DC – Scenariji 2B, 3 i 4 .....	83
Slika 4.24. Potrošeno gorivo i emisija gasova – različite konfiguracije aerodroma i ATC taktike .....	84
Slika 4.25. Emisija gasova - različite konfiguracije aerodroma i ATC taktike .....	84

## Spisak skraćenica

- ACARE - *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe* - Evropsko savetodavno veće za vazduhoplovna istraživanja
- AEM - *Advanced Emission Model* - Napredni model za određivanje emisije gasova (Eurocontrol)
- A/D - *Arrival / Departure* – Taktika: sletanje / poletanje
- AP - *Arrivals priority* – Taktika: prioritet vazduhoplova u sletanju
- ATFM - *Air Traffic Flow Management* - Upravljanje tokovima vazdušnog saobraćaja
- ATM - *Air Traffic Management* - Upravljanje vazdušnim saobraćajem
- BADA - *Base of Aircraft Data* - Baza podataka o vazduhoplovima (Eurocontrol)
- CI - *Cost Inefficiency* - „Troškovna” neefikasnost
- DC - *Dynamic Complexity* - Dinamička kompleksnost
- DD - *Dynamic Density* - Dinamička gustina
- EEA - *European Environmental Agency* - Evropska agencija za zaštitu životne sredine
- EI - *Emission Inefficiency* - Neefikasnost emisije gasova
- FAA - *Federal Aviation Administration* - Federalna vazduhoplovna administracija (SAD)
- FAF - *Final Approach Fix* - Fiks zavšnog prilaženja
- FCFS - *First Come First Served* – Taktika: Prvi došao prvi opslužen
- FDR - *Flight Data Recorder* - Snimanje podataka o letovima
- FI - *Fuel Inefficiency* - Neefikasnost potrošnje goriva
- FL - *Flight Level* - Nivo leta



- GHG - *Greenhouse gases* - Gasovi sa efektom staklene bašte
- ICAO - *International Civil Aviation Organization* - Međunarodna organizacija za civilno vazduhoplovstvo
- IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* - Međudržavni panel o klimatskim promenama
- LTO - *Landing and Take-off* - Sletanja i poletanja
- MSP - *Multi-sector planner* - Multi-sektor planer
- PSS - Poletno-sletna staza
- SIMMOD - *Simulation Model* - Simulacioni model aerodoma i vazdušnog prostora (FAA)
- SMAN - *Surface Manager* - Alat za podršku u upravljanju saobraćajem na zemlji
- TFM - *Traffic Flow Management* - Upravljanje tokovima saobraćaja
- TI - *Time Inefficiency* - Vremenska neefikasnost
- WLU - *Workload unit* - Jedinica radnog opterećenja (broj operacija, putnika, i/ili robe)

## 1. UVOD

Civilni vazdušni saobraćaj predstavlja jedan od razvijenijih sektora svetske ekonomije. U nekoliko poslednjih decenija, obim vazdušnog saobraćaja je značajno porastao, i očekuje se da se takav trend nastavi. Za Evropu se u 2035. godini očekuje obim saobraćaja od 14,4 miliona operacija, što je 1,5 puta više od obima u 2012. godini. Ovaj obim saobraćaja predstavlja tzv. „najverovatniji“ scenario EUROCONTROL-ovih (Evropska organizacija za bezbednost vazdušne plovidbe) eksperata za prognoze (Eurocontrol, 2013).

Tako veliki porast saobraćaja svakako ima pozitivne, ali i negativne efekte na društvo i životnu sredinu. Pozitivni efekti se prvenstveno odnose na dodatnu zaposlenost unutar datog sektora, kao i u „vezanim“ sektorima, na razvoj industrije i turizma, što dalje dodatno podstiče lokalnu i globalnu ekonomiju, i samim tim doprinosi generalnom napretku. Negativni efekti uključuju kako direktne tako i indirektne negativne uticaje na društvo i životnu sredinu. Direktni uticaji obuhvataju buku u okolini aerodroma, zagađenje vazduha na aerodromima kao i globalno zagađenje, zagušenja i kašnjenja, generisanje otpada, incidente i udese u vazdušnom saobraćaju, kontaminaciju izvora vode za piće i zemljišta itd. Indirektni uticaji i eventualni štetni uticaji na čovekovu okolinu uključuju one koji nastaju proizvodnjom resursa za infrastrukturu vazdušnog saobraćaja i usluge, kao i one od recikliranja određenih komponenata sistema (Janić, 2010).

Kao i u ostalim granama industrije, tako se i u vazdušnom saobraćaju, a u cilju „kontrolisanja“ negativnih uticaja, uvodi pojam održivosti i održivog razvoja. Koncept održivosti i održivog razvoja se prvenstveno odnosio na dugoročnu brigu o okruženju, kao što su trošenje prirodnih resursa i ekološka degradacija (uključujući klimatske promene), ali je kasnije ovaj koncept proširen i na druga pitanja. Poslednje definicije održivosti uključuju tri glavne kategorije pitanja održivog razvoja: ekonomska, društvena i ekološka tj. pitanja životne sredine. Takođe, razmatra se i efikasnost funkcionisanja određenog sistema.

Navedene činjenice o porastu vazdušnog saobraćaja, negativnim uticajima tog rasta i potrebe kontrolisanja datih uticaja, svakako čine veoma aktuelnom i značajnom svaku vrstu analize u cilju smanjenja negativnih uticaja i doprinosa održivosti sistema vazdušnog saobraćaja.

Jedan od mogućih pristupa je analiza upravljanja postojećim resursima, u smislu boljeg iskorišćenja istih, sa ciljem smanjenja negativnog uticaja na životnu sredinu. Razlozi za takav pristup su mnogobrojni. Na primer, vazdušni saobraćaj je odgovoran za 12,8% od ukupne emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG – *Greenhouse gases*) koju u Evropi generiše saobraćaj (saobraćaj ukupno generiše oko 25% emisije gasova u Evropi) (European Commission, 2014). Takođe, u Evropi vazdušni saobraćaj generiše 3,5% celokupne emisije CO<sub>2</sub>, i ova emisija je u stalnom porastu, pri čemu je 0,2% emisije (celokupne) generisano usled neefikasnosti upravljanja vazdušnim saobraćajem od strane kontrole letenja (Eurocontrol Experimental Centre, 2014). Procenjuje se da će do 2050. godine emisija CO<sub>2</sub> koju generiše vazdušni saobraćaj porasti za 3 do 4 puta u odnosu na nivo iz 2000. godine (Lee, et al, 2010).

Glavni istraživački projekti iz oblasti upravljanja vazdušnim saobraćajem (ATM - *Air Traffic Management*) u Evropi - *Single European Sky ATM Research* (SESAR, 2012), i u SAD - *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), postavili su niz ciljeva vezanih za uticaj vazdušnog saobraćaja na životnu sredinu, a koji se odnose na buku, kvalitet vazduha i klimatske promene, i oba projekta prepoznaju poboljšanje u ATM-u kao najvažnije elemente u ispunjenju postavljenih ciljeva (npr. smanjenje ATM emitovanog CO<sub>2</sub> od strane vazduhoplova za (prosečno) 10% po letu). Takođe, u izveštaju Međudržavnog panela o klimatskim promenama – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) procenjeno je da poboljšanja u ATM-u mogu pomoći u poboljšaju celokupne efikasnosti potrošnje goriva za 6-12% (Reynolds, 2009). Ryerson et al. (2011) su u svom istraživanju pokazali da postoji mogućnost smanjenja potrošnje goriva kroz poboljšanje operativnih performansi, s obzirom da su one odgovorne za oko 10% potrošenog goriva tokom leta.

Evropski projekat *Clean Sky* ima za cilj da identifikuje, razvije i oceni nove tehnologije, kao neophodan korak ka ostvarenju ekoloških ciljeva koje je postavilo Evropsko savetodavno veće za vazduhoplovna istraživanja - ACARE (*Advisory Council for Aeronautics Research in Europe*) za 2020. godinu, a to su: smanjenje potrošnje goriva i emisije CO<sub>2</sub> za 50% (40% kroz nove tehnologije i 10% kroz ATM), smanjenje NO<sub>x</sub> emisije za 80% i smanjenje buke za 50%, sve u poređenju sa nivoima iz 2000. godine (Clean Sky, 2014).

Usled porasta obima vazdušnog saobraćaja, broj letova značajno se povećao, kašnjenja su takođe porasla, kao i potrošnja goriva i emisija gasova, u svim fazama leta. Uzimajući u obzir navedene činjenice, kao i činjenicu da su aerodromi, od strane SESAR-a, prepoznati kao uska grla u sistemu vazdušnog saobraćaja, za istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji odabran je aerodrom tj. saobraćaj u sletanju i poletanju, sa detaljnom analizom kretanja vazduhoplova po manevarskim površinama aerodroma: poletno-sletnim i rulnim stazama.

Za aerodrome sa velikom potražnjom tokom vršnih sati, kašnjenja u sletanju, vremena taksiranja u dolasku i odlasku, kao i kašnjenja u poletanju rastu, što uzrokuje dodatnu, nepotrebnu potrošnju goriva i emisiju gasova. Do 2035. godine, kašnjenja na aerodromu će porasti sa 1 min/letu (u 2012. god) na 5-6 minuta/letu, pretvarajući ga tako od ne tako značajnog kašnjenja u stalnog, glavnog doprinosioca kašnjenju (Eurocontrol, 2013). Kako bi se to izbeglo, aerodromi se moraju ili proširiti, ili (s obzirom da proširenje nije moguće u velikom broju slučajeva) koristiti postojeće resurse što efikasnije.

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem na postojećim i/ili planiranim resursima aerodroma (poletno-sletnim, rulnim stazama, putanjama za prilaz, sletanje i odlet vazduhoplova), od strane kontrole letenja, na kompleksnost saobraćaja na aerodromu, kao i ocena uticaja kompleksnosti saobraćaja na efikasnost obavljanja saobraćaja na aerodromima. Naime, za datu (trenutnu ili planiranu) saobraćajnu potražnju i konfiguraciju manevarskih površina aerodroma, primena različitih mera upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja može dovesti do generisanja saobraćajnih situacija različite kompleksnosti na

aerodromu, što dalje može uticati na efikasnost funkcionisanja aerodroma, a time i na održivi razvoj aerodroma.

Cilj istraživanja u disertaciji je da se ustanovi da li postoji i (ukoliko postoji) kakva je međusobna zavisnost između dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja, a u svrhu ocene održivog razvoja aerodroma. Naime, cilj je da se ustanovi da li se na osnovu promene dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, koja nastaje kao rezultat primene različitih načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, promene intenziteta saobraćaja i/ili promene u aerodromskoj infrastrukturi (npr. izgradnja nove poletno-sletne staze i/ili rulnih staza), može oceniti i promena u efikasnosti obavljanja saobraćaja (sa aspekta odabranih mera neefikasnosti). Pored analize zavisnosti između dinamičke kompleksnosti i pojedinih mera neefikasnosti, jedan od ciljeva je i da se ustanovi da li postoji i (ukoliko postoji) kakva je međusobna zavisnost između samih mera neefikasnosti.

Nakon uvodnog poglavlja, disertacija je organizovana kroz sledeća poglavlja:

Poglavlje 2 - Pregled istraživanja iz oblasti koje se odnose na istraživanje predloženo u disertaciji i to: 1. Kontrola letenja i upravljanje saobraćajem na aerodromima (opis podсистема sistema kontrole letenja nadležnog za regulisanje i kontrolu saobraćaja na aerodromima; pregled literature iz oblasti upravljanja vazдушnim saobraćajem na aerodromima); 2. Kompleksnost saobraćaja u sistemu kontrole letenja; 3. Održivi razvoj vazдушnog saobraćaja (definicije održivosti i održivog razvoja generalno, održivosti i održivog razvoja vazдушnog saobraćaja i aerodroma, kao i prikaz indikatora za monitorisanje, analizu i ocenu održivosti saobraćaja i aerodroma).

Poglavlje 3 - Dat je predlog metodologije za ocenu uticaja kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama na održivi razvoj aerodroma: pretpostavke i početni uslovi za razvoj metodologije, struktura metodologije, definisani su koncept i mere kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, a zatim i koncept i indikatori održivosti: mere neefikasnosti.

Poglavlje 4 – Prikazana je primena predložene metodologije. Prvo su date pretpostavke za primenu metodologije i definisani su ulazni podaci (konfiguracije aerodroma, taktike upravljanja saobraćajem u eksperimentima, struktura i karakteristike saobraćaja, faktori i težine faktora kompleksnosti, vrednosti indikatora neefikasnosti), a zatim su prikazani i diskutovani rezultati dobijeni simulacijom (korišćenjem simulacionog modela SIMMOD) za dva sprovedena eksperimenta: Eksperiment A - Taktičke ATM mere i Eksperiment B - Strateške i taktičke ATM mere.

Poglavlje 5 – U poslednjem poglavlju izložena su zaključna razmatranja i dati pravci daljeg istraživanja.

## 2. SISTEM VAZDUŠNOG SAOBRAĆAJA

Vazdušni saobraćaj predstavlja letenje vazduhoplova kroz vazdušni prostor od polaznog do odredišnog aerodroma i kretanje vazduhoplova po manevarskim površinama aerodroma. Vazdušni saobraćaj jedne države ili regiona može se posmatrati kao složen sistem koji se sastoji od nekoliko podсистema (Babić i Netjasov, 2011):

- ◆ vazduhoplovni prevozioci,
- ◆ aerodromi (vazduhoplovna pristaništa) i
- ◆ kontrola letenja.

Svaki od ovih podсистema može se posmatrati kao poseban sistem, uzimajući u obzir veze sa ostalim delovima sistema vazdušnog saobraćaja i okruženjem.

Način upravljanja (postojećim ili planiranim) saobraćajem i resursima (infrastrukturuom), od strane kontrole letenja, može značajno uticati na performanse sistema vazdušnog saobraćaja, sa manjim ili većim uticajem na pojedine učesnike u saobraćaju i zainteresovane strane (putnici, operateri, proizvođači, članovi lokalne zajednice, lokalne i centralne vlasti, razne vazduhoplovne organizacije, javnost). Naime, za datu (trenutnu ili planiranu) saobraćajnu potražnju, različite mere upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja mogu rezultirati različitom kompleksnošću saobraćajne situacije, koja dalje može uticati na performanse aerodroma, a samim tim i na održivost aerodroma.

Kao što je već rečeno, predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem i postojećim resursima aerodroma, od strane kontrole letenja i planera aerodroma, na stepen održivosti saobraćaja, dok je cilj istraživanja analiza međusobne zavisnosti između promene kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i promena određenih indikatora održivosti saobraćaja na aerodromu, nastalih primenom različitih taktika upravljanja od strane kontrole letenja.

Uzimajući u obzir predmet i cilj istraživanja u ovoj disertaciji, u daljem tekstu ovog poglavlja biće dat pregled istraživanja iz oblasti koje se odnose na istraživanje predloženo u disertaciji:

1. Kontrola letenja i upravljanje saobraćajem na aerodromima;
2. Kompleksnost saobraćaja u sistemu kontrole letenja;
3. Održivi razvoj vazdušnog saobraćaja.

## **2.1 Kontrola letenja i upravljanje saobraćajem na aerodromima**

Osnovni zadatak kontrole letenja je da omogući bezbedno, redovno i efikasno odvijanje vazdušnog saobraćaja u oblasti svoje nadležnosti.

Organizacija saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma: poletno-sletnim (PSS) i rulnim stazama, kao i na platformama nalazi se u nadležnosti aerodromske kontrole letenja. Osnovne funkcije aerodromske kontrole letenja su da omogući bezbedno i efikasno kontrolisanje vazduhoplova u završnoj fazi prilaza i početnoj fazi odleta, kao i kontrolisanje kretanja vazduhoplova po poletno-sletnim i rulnim stazama i platformama (nakon sletanja i pre poletanja).

Za postojeću infrastrukturu aerodroma (*airside*), različiti saobraćajni zahtevi i meteorološki uslovi zahtevaju različite operativne koncepte iskorišćenja date infrastrukture, tj. korišćenje različitih procedura (taktika) pri opsluzi saobraćaja na aerodromu i u vazdušnom prostoru u njegovoj neposrednoj okolini.

Primena različitih procedura dovodi do nastajanja različitih saobraćajnih situacija kako u vazduhu, tako i na zemlji. Naime, promena procedura dovodi do promena PSS u upotrebi, što dalje dovodi do promena u saobraćajnoj „strukturi” na poletno-sletnim stazama: promena redosleda operacija – poletanja i sletanja, redosleda operacija po tipovima vazduhoplova i sl. Odabrani način iskorišćenja PSS dalje ima uticaj na saobraćajnu situaciju na rulnim stazama i platformama. Navedene karakteristike saobraćaja, uzimajući u obzir i konfiguraciju PSS (broj i dužine, međusobni položaj) dovode do nastanka saobraćajne situacije određene kompleksnosti. Kompleksnost



situacije ima određeni uticaj na kontrolora letenja, na njegovo radno opterećenje i na njegove odluke, koje mogu dovesti do povećanja ili smanjenja već postojeće kompleksnosti (u uslovima kada je saobraćajna potražnja značajna za posmatranu infrastrukturu aerodroma). U zavisnosti od nivoa kompleksnosti i odluka kontrolora letenja, biće generisana i eventualna kašnjenja vazduhoplova, što sve zajedno može uticati na performanse i kapacitet samog aerodroma u određenom vremenskom periodu.

Kompleksnošću saobraćaja može se upravljati na strateškom, (pre) taktičkom i operativnom nivou. Na svakom od ovih nivoa, upravljanje kompleksnošću može imati prostornu prirodu, kao što je struktura i/ili „dodela” određenog vazdušnog prostora ili sistema manevarskih površina, ali takođe i vremenski bazirana rešenja (redovi letenja, dodela slotova, upravljanje tokovima itd). Da bi se procenio efekat određenih mera upravljanja na kompleksnost saobraćaja, neophodno je definisati odgovarajuću meru kompleksnosti.

Pregled literature iz oblasti kompleksnosti saobraćaja u vazdušnom saobraćaju prikazan je u Poglavlju 2.2, dok je prikaz koncepta i mere kompleksnosti, koja će biti korišćena u ovoj disertaciji, dat u Poglavlju 3.2.1.

### **2.1.1 Taktike kontrole letenja – pregled literature**

Kao što je već rečeno, jedan od glavnih ciljeva kontrole letenja je da bezbedno, redovno i efikasno upravlja saobraćajem. Određeni postupci upravljanja od strane kontrole letenja mogu značajno uticati na performanse sistema. Na primer, različite taktike kontrole letenja koje se primenjuju za dodeljivanja PSS vazduhoplovima i sekvenciranje vazduhoplova u sletanju i u poletanju, kao i prilikom dodeljivanja rute taksiranja po manevarskim površinama aerodroma, mogu uticati kako na kompleksnost saobraćajne situacije, tako i na performanse celokupnog sistema.

Problemi dodeljivanja PSS (*runway assignment*), određivanja redosleda vazduhoplova u sekvenci (*sequencing problem*) i vremenskog raspoređivanja vazduhoplova (*scheduling*

*problem*) u sletanju i poletanju su veoma često analizirani u brojnim istraživanjima, kao npr. u radovima Anagnostakis et al, 2001, Anagnostakis i Clarke, 2003, Saffarzadeh et al, 2008, Brentnall i Cheng, 2009, Deau et al, 2009, Rathinam et al, 2009, Kim et al, 2010, Balakrishnan i Chandran, 2007, 2010, D'Ariano et al, 2010, Bennell et al, 2011, Montoya et al, 2011. Generalni zaključak, na osnovu navedenih radova, je da je taktika FCFS (*First Come First Served* - „Prvi došao prvi opslužen”) dosta robustna, i da samo sofisticirani algoritmi mogu dati značajno bolja rešenja, bez uzimanja u obzir troškova kašnjenja vazduhoplova usled promene njihove pozicije u sekvenci u odnosu na početnu, dobijenu primenom FCFS pravila.

U literaturi su analizirane različite taktike iskorišćenja postojeće infrastrukture na određenom aerodromu, npr:

- ◆ Na aerodromima sa više od jedne PSS, neke od staza mogu se koristiti samo za poletanja, a druge za sletanja, ili se staze mogu koristiti za mešovite operacije;
- ◆ FCFS tj. taktika „Prvi došao prvi opslužen” gde vazduhoplovi zauzimaju PSS u sekvenci prema vremenu zahteva za zauzimanjem PSS ispostavljenom od strane pilota;
- ◆ Sletanja imaju prioritet nad poletanjima; Vazduhoplovi u poletanju mogu dobiti odobrenje za izlazak na PSS i poletanje jedino kada ima dovoljno prostora između dva sletanja;
- ◆ Taktika kada se svaka dva sletanja moraju (dodatno) razdvojiti tako da se omogući dovoljno vremena da se obavi bar jedno poletanje između dva sletanja (naravno, u slučajevima kada ima vazduhoplova koji čekaju u redu za poletanje);
- ◆ Određeni optimizacioni modeli se takođe mogu primenjivati kako bi se odredila optimalna sekvenca vazduhoplova (ili sekvenca bliska optimalnoj), a u odnosu na definisane funkcije cilja itd.

Prilikom primene bilo koje od gore pomenutih taktika upravljanja obično se mora uzeti u obzir i veliki broj različitih ograničenja, kao što su: slotovi dodeljeni poletanjima i sletanjima, povezani letovi itd.

Tokom taksiranja do gejtta nakon sletanja i od gejtta do pozicije za čekanje na poletanje,

vazduhoplovima mogu biti dodeljene različite rute taksiranja. Odluka o tome koja će ruta biti dodeljena vazduhoplovu (tzv. problem kretanja po zemlji - *ground movement problem*) može zavisiti od postojećih pravila određenog aerodroma, broja i rasporeda rulnih staza, iskustva kontrolora letenja, alata za podršku u odlučivanju (npr. *Surface Manager* – SMAN) itd. Problemom kretanja po zemlji bavio se veliki broj autora: Tošić, 1991, Atkins et al, 2004, Garcia et al, 2005, Wood et al, 2009, Jung et al, 2010, Lesire, 2010, Atkin et al, 2010, 2011, Chen et al, 2011, Liu and Hansen, 2013, Sandberg et al, 2013 itd.

Kretanje vazduhoplova po zemlji može se smatrati za jednu od najvažnijih operacija na određenom aerodromu, pošto povezuje nekoliko „problema”: problem sekvenciranja vazduhoplova u sletanju i/ili poletanju za određenu PSS, zatim dodeljivanja rute taksiranja (nakon sletanja do parking pozicije i od parking pozicije do pozicije za čekanje na poletanje za vazduhoplove u odlasku) i problem dodeljivanja gejtova (Atkin et al, 2011).

Atkin et al. (2010) daju sveobuhvatan pregled istraživanja vezanih za problem kretanja po zemlji. Problem kretanja vazduhoplova po zemlji može se razmatrati sa različitih aspekata, u zavisnosti od ciljeva aerodroma. U svom istraživanju Ravizza et al. (2012) sumirali su različita ograničenja i funkcije cilja koje su do sada korišćene prilikom istraživanja: minimiziranje ukupnog vremena taksiranja ili višekriterijumski pristupi, kao što su linearne težinske funkcije za istovremeno razmatranje ukupnog vremena taksiranja, kašnjenja sletanja i poletanja, broj obavljenih sletanja i poletanja, najduže vreme kretanja po zemlji i broj intervencija kontrolora letenja itd. Takođe, ukazali su na relativno slabu pokrivenost ove oblasti istraživanja sa aspekta ekoloških pitanja. Naime, glavni fokus je bio na smanjenju ukupnog vremena taksiranja, uz pretpostavku da kraće vreme taksiranja podrazumeva i bolju efikasnost operacija na aerodromu i manju potrošnju goriva. Međutim, takva korelacija ne mora važiti u svim situacijama usled specifičnog odnosa između potrošnje goriva i odgovarajućih profila brzina (npr. „*smooth*“ profili brzina vs. nepotrebna potrošnja goriva usled ubrzanja i usporenja). Takođe, analiziran je i *trade-off* između ukupnog vremena taksiranja i potrošnje goriva

prilikom rešavanja problema pronalaženja ruta bez konflikata za vazduhoplove na manevarskim površinama aerodroma.

Problem potrošnje goriva i emisije gasova na aerodromima (koji ima značajno mesto u ovoj disertaciji) je blisko povezan sa problemima kretanja vazduhoplova na zemlji. Neke od studija koje se bave problemom kretanja vazduhoplova na zemlji sa aspekta potrošnje goriva i emisije gasova su: Levine i Gao, 2007, Ohsfeldt et al, 2007, Lee i Balakrishnan, 2008, Simaiakis i Balakrishnan, 2009, Deonandan i Balakrishnan, 2010, Jung et al, 2011, Nikoleris et al, 2011, Ravizza et al, 2012, Khadilkar i Balakrishnan, 2012.

Pregledom literature iz oblasti upravljanja saobraćajem na aerodromu nisu pronađeni radovi koji se bave uticajem načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja na kompleksnost saobraćaja na aerodromu.

Taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, koje će biti razmatrane u ovom istraživanju, prikazane su u Poglavlju 4.2.2.

## **2.2 Pregled istraživanja iz oblasti kompleksnosti saobraćaja u sistemu kontrole letenja**

### **2.2.1 Kompleksnost saobraćaja u sektorima oblasne kontrole letenja**

Pregledom literature iz oblasti kompleksnosti vazdušnog saobraćaja u sektorima oblasne kontrole letenja može se zaključiti da se veliki broj studija bavi odnosom između kompleksnosti saobraćaja i radnog opterećenja kontrolora letenja. Generalno, koncept kompleksnosti je uveden kao težina saobraćajne situacije, tj. kao mogući uticaj postojeće ili očekivane saobraćajne situacije na radno opterećenje kontrolora letenja.

Mogford et al. (1995) bili su jedni od prvih autora koji su se bavili kompleksnošću saobraćaja i njenom uticaju na radno opterećenje kontrolora letenja. U radu je dat

pregled faktora kompleksnosti korišćenih do tada u kontroli letenja, kao i metode njihovog merenja (Prilog I, Tabela I.1).

Pawlak et al. (1996a, 1996b), Pawlak i Brinton (1996) i Pawlak (1996) razmatrali su kompleksnost kroz analizu kognitivnih aktivnosti kontrolora letenja, za razliku od dotadašnjih studija u kojima je kompleksnost uglavnom razmatrana kroz „fizičko“ radno opterećenja kontrolora. Definisana je mera kompleksnosti bazirana na samoj saobraćajnoj situaciji. Identifikovani su mnogobrojni faktori za koje se smatra da utiču na kompleksnost. Sprovedeno istraživanje je pokazalo da znanje kontrolora o namerama vazduhoplova, gustina vazduhoplova u sektoru i uticaj vremena (meteorološki uslovi) značajno utiču na subjektivni osećaj kontrolora letenja o kompleksnosti saobraćajne situacije.

Novi koncept nazvan „Dinamička gustina“ (*Dynamic Density* - DD) uveden je u radu Laudeman et al. (1998a); DD uključuje gustinu saobraćaja, različite faktore kompleksnosti i namere kontrolora letenja. Nakon uvođenja koncepta DD (u prethodno navedenom radu), u velikom broju istraživanja razmatrana su pitanja njenog modeliranja i primene: Laudeman et al. (1998b) prikazali su primenu merenja kompleksnosti, npr. u uslovima podeljene odgovornosti između pilota i kontrolora, sa aspekta bezbednog razdvajanja vazduhoplova; Sridhar et al. (1998) analizirali su DD, sa ciljem utvrđivanja mogućnosti da se data mera koristi u planerske svrhe; Kopardekar i Magyarits (2003) prikazali su rezultate istraživanja, vezanog za DD, kao alata za predikciju kompleksnosti sektora. Predložen je veliki broj promenljivih za koje se smatralo da utiču na kompleksnost saobraćaja. DD je definisana kao funkcija promenljivih koje su najbolje odražavale procenjeno stanje kompleksnosti (na osnovu sprovedenog istraživanja) i to: monitorisanje, detekcija konflikata, vazduhoplovi u sektoru, komunikacija i koordinacija, „mešavina” vazduhoplova (sletanja, poletanja, preleti), raspoloživo vreme za rešavanje konflikta, monitorisanje vertikalnog razdvajanja, monitorisanje horizontalnog razdvajanja, monitorisanje horizontalnog razdvajanja vazduhoplova koji se nalaze na rastojanju bliskom minimalnom propisanom razdvajanju, dolasci, predaja vazduhoplova narednom sektoru, raspoloživi uređaji i geometrija sektora. Rezultati su pokazali da DD bolje odražava kompleksnost u sektoru

od samog broja vazduhoplova. Masalonis et al. (2003) bavili su se modeliranjem DD u svrhu podrške u odlučivanju Odeljenju za upravljanje tokovima saobraćaja – TFM (*Traffic Flow Management*), kako bi na strateškom nivou sprečili nastanak preopterećenja u bilo kom delu sistema. Zaključeno je da mere blizine vazduhoplova, gustine saobraćaja i strukture vazdušnog prostora mogu biti korisne za podršku u odlučivanju, u realnom vremenu. Vogel et al. (2013) u svojoj studiji bavili su se analizom uvođenja DD u operativno ATFM (*Air Traffic Flow Management*) okruženje, kroz analizu prediktivnih mogućnosti mera kompleksnosti vezano za radno opterećenje kontrolora letenja i nivo bezbednosti.

Analiza uticaja kompleksnosti na nivo pružene usluge od strane kontrole letenja prikazana je u radu Chaboud et al. (2000). Generatori radnog opterećenja kontrolora letenja svrstani su u tri osnovne grupe: rutinski poslovi, monitorisanje pri penjanju i poniranjima i monitorisanje konflikata. Takođe, uočeno je i da radno opterećenje zavisi od trajanja zadataka i frekvencije pojave zadataka.

Delahaye i Puechmorel (2000) i Histon et al. (2001) ističu značaj geometrije vazdušnog prostora i zaključuju da će mera kompleksnosti naći široku primenu u upravljanju vazdušnim saobraćajem, npr. u dizajnu vazdušnog prostora, dodeli slotova, u upravljanju tokovima i razvoju novih koncepata upravljanja (kao što je *free flight*).

Schaefer (2001) koristi kompleksnost vazdušnog saobraćaja kao ključni koncept za tzv. „Multi-sektor planer” (MSP – *Multi-sector planner*), čija je suština da uravnoteži saobraćaj tokom vremena i između određenih sektora, a sve u cilju izbegavanja nastanka preterano zahtevne situacije za kontrolora letenja. Za razliku od radnog opterećenja kontrolora letenja koje je teško definisati, a još teže izmeriti, kompleksnost saobraćaja je ograničena na karakteristike same saobraćajne situacije.

Delahaye et al. (2003) predstavili su novu meru kompleksnosti vazdušnog saobraćaja, baziranu na nelinearnim dinamičkim sistemima. Cilj je bio da se pronađu indikatori koji bi ukazivali na uzroke nastanka određene kompleksnosti saobraćajne situacije, kroz analizu nivoa neuređenosti saobraćaja u vazdušnom prostoru.

Gianazza (2007, 2008) i Majumdar i Ochieng (2007) u svojim istraživanjima primenili su meru kompleksnosti saobraćaja za problem dizajniranja vazdušnog prostora.

Idris et al. (2007, 2009) analizirali su kako prenos odgovornosti za razdvajanje vazduhoplova na pilota (*self-separation operations*) utiče na povećanje kompleksnosti saobraćaja. Autori predlažu uvođenje mera za donošenje odluka u cilju očuvanja fleksibilnosti putanja vazduhoplova. Definisana je fleksibilnost putanje, u smislu robustnosti i adaptibilnosti na poremećaje. Razvijen je metod procene predložene mere, koji kao rezultat daje mapu fleksibilnosti za prostor mogućih putanja, a koja bi mogla biti korišćena od strane planera putanja vazduhoplova u realnom vremenu.

U svom istraživanju Kopardekar et al. (2009) bavili su se faktorima kompleksnosti koji utiču na radno opterećenje kontrolora letenja u uslovima visokog nivoa automatizacije, kada kontrolor ima podršku naprednih alata za detekciju i rešavanje konflikata. Rezultati su pokazali da nekoliko odabranih promenljivih mogu predstavljati relevantne mere kompleksnosti, u situacijama sa većim gustinama saobraćaja, i to: horizontalna blizina, gustina saobraćaja, kritični indeks razdvajanja (mera blizine vazduhoplova koji se nalaze u konfliktu) i broj stepeni slobode vazduhoplova.

Novi metod za procenu „srednjoročne“ kompleksnosti u 3D vazdušnom prostoru, na osnovu informacija o namerama vazduhoplova i trenutnom stanju (kompleksnosti) predložen je u radu Prandini et al. (2009). Doprinos predloženog pristupa je to što se, pri određivanju kompleksnosti, uzima u obzir neizvesnost buduće pozicije vazduhoplova koja se određuje u trenutku određivanja kompleksnosti. Rezultujuća mapa kompleksnosti primenjuje se za definisanje optimalne putanje za nove vazduhoplove koji se pojavljuju u sistemu.

Fokus istraživanja Djokić et al. (2010) je ispitivanje međusobnog odnosa između kompleksnosti, mera aktivnosti kontrolora i subjektivno ocenjenog radnog opterećenja, dobijenih pri *real-time* simulaciji. Definisan je početni niz od 24 faktora kompleksnosti, zatim je izvršena analiza i dobijen je novi set od 8 komponenata. Utvrđena korelacija odabranih faktora sa subjektivnom ocenom radnog opterećenja kontrolora letenja

ukazala je da radno opterećenje ne zavisi samo od kompleksnosti saobraćaja, već i od ukupnog vremena provedenog na radio-vezi, kao i prosečnog trajanja komunikacije kontrolor letenja – pilot i kontrolor letenja – kontrolor letenja.

Za fleksibilnije saobraćajne tokove, kakve predviđaju NextGen i SESAR, tradicionalna procena kapaciteta, bazirana na radnom opterećenju kontrolora letenja, ima određena ograničenja (Yifei et al, 2011). Sa druge strane, metode procene kompleksnosti, sa mikroskopskim pristupom, pokazale su svoje prednosti. Pri analizi kompleksnosti, trebali bi se uzeti u obzir sledeći aspekti: prvo, kompleksnost vazdušnog saobraćaja je objektivni koncept (ne varira u zavisnosti od kontrolorove sposobnosti ili radnog opterećenja, tj. više je orijentisana na događaje a ne na ljudski faktor); drugo, kompleksnost vazdušnog saobraćaja je *multi-level* koncept koji uključuje dva aspekta: strukturalna kompleksnost i kompleksnost protoka saobraćaja; treće, kompleksnost vazdušnog saobraćaja je vremenski zavisna, dinamički koncept. Predložen je metod analize kompleksnosti saobraćaja mapiranjem, koji daje prikaz trenutne kompleksnosti, kao i vremenskog razvoja (mape) kompleksnosti.

### **2.2.2 Kompleksnost saobraćaja na aerodromima i u okolini aerodroma**

Pregled literature pokazao je da ima relativno malo istraživanja koja se bave kompleksnošću vazdušnog saobraćaja u terminalnom vazdušnom prostoru (Tošić i Netjasov, 2003, Netjasov et al., 2009, 2011, Vogel et al., 2013), kao i kompleksnošću saobraćaja na manevarskim površinama i u neposrednoj okolini aerodroma (Koros et al., 2003, 2006, Krstić, 2004, Krstić Simić i Tošić, 2010, Krstić Simić et al., 2011, Krstić Simić et al., 2014, Krstić Simić i Babić, 2015).

Tošić i Netjasov (2003) i Netjasov et al. (2009, 2011) predlažu definiciju kompleksnosti vazdušnog saobraćaja, kao i poželjne karakteristike koje data mera treba da poseduje. Kompleksnost je definisana kao mera intenziteta saobraćaja (kvantitet) i karakteristika međusobnih interakcija između vazduhoplova (kvalitet), koji se nalaze u nadležnosti jednog kontrolora letenja. Predložena su dva modela za određivanje vrednosti navedenih komponenti kompleksnosti. Prvi se bazira na „jednostavnim statistikama” i



drugi, nešto složeniji, u kome se u obzir uzima i veza između pojedinačnih letova, bilo da se nalaze na istoj, ili na različitim putanjama.

Vogel et al. (2013) analizirali su prediktivne mogućnosti mere kompleksnosti za dva aspekta: radno opterećenje kontrolora letenja i nivo bezbednosti (rizik udesa).

U studiji Koros et al. (2003), koja se bavi kompleksnošću saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma, fokus je stavljen na faktore kompleksnosti i kako oni doprinose performansama rada i načinu rada kontrolora letenja, i izvorima informacija koje kontrolor koristi kako bi se „izborio” sa kompleksnošću unutar aerodromske kontrole letenja. Rezultati su pokazali da se relativni doprinos svakog od faktora kompleksnosti razlikuje od aerodroma do aerodroma. Ipak, veliki obim saobraćaja i zagušenje na frekvenciji su faktori koji su u svim razmatranim slučajevima ocenjeni kao najznačajniji.

Koncept i mera kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama i u neposrednoj okolini aerodroma, koji su predloženi i korišćeni u radovima Krstić, 2004, Krstić Simić i Tošić, 2010, Krstić Simić et al, 2011, 2014, uz određene manje izmene korišćeni su i u radu Krstić Simić i Babić, 2015, kao i u ovoj disertaciji. Prikaz pomenutog koncepta i mere kompleksnosti dat je u Poglavlju 3.2.1, u okviru predložene metodologije za ocenu uticaja kompleksnosti na održivi razvoj aerodroma.

## **2.3 Pregled istraživanja iz oblasti održivog razvoja vazdušnog saobraćaja**

### **2.3.1 Definicije održivosti, održivog razvoja i održivog transporta**

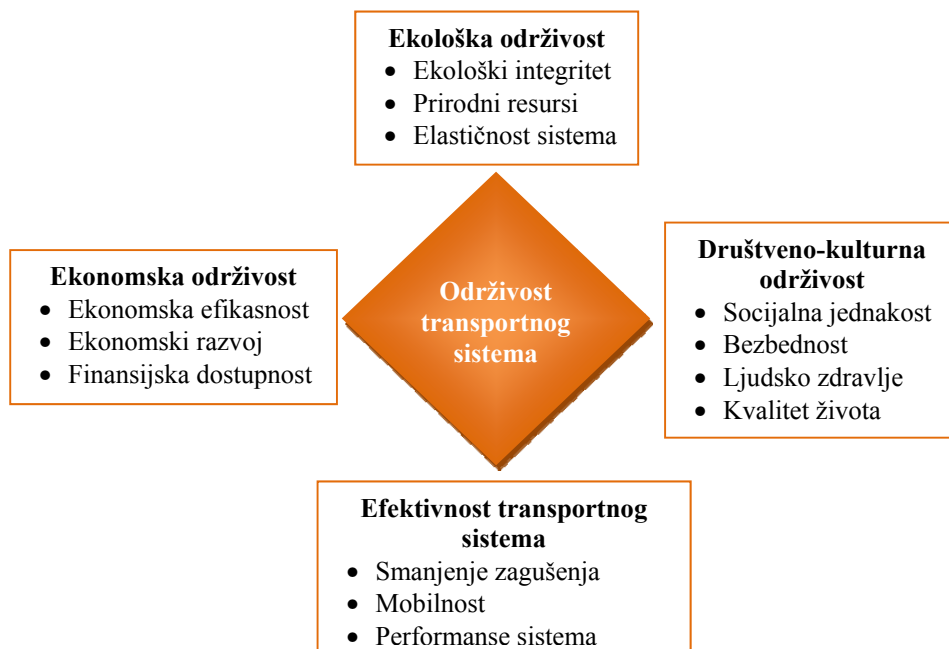
U literaturi se mogu naći različite definicije održivosti i održivog razvoja. Ipak, najčešće korišćena definicija održivog razvoja je definicija norveškog premijera Brundtland iz 1987. godine, i ona predstavlja osnovu većine definicija održivosti u različitim oblastima (Jeon, et al, 2013):

*„Sustainable Development is a development that meets the needs of the present generation, without compromising the ability of future generations to meet their needs.”*

ili u prevodu:

*„Održivi razvoj je takav razvoj koji izlazi u susret potrebama sadašnje generacije, bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje sopstvene potrebe”.*

Iako još uvek ne postoji univerzalna definicija održivosti transportnog sistema, sve definicije obuhvataju mere efektivnosti sistema, kao i uticaj sistema na ekonomski razvoj, ekološki integritet i društveni kvalitet života. Na slici 2.1 su prikazana četiri osnovna elementa koji bi trebali biti uključeni u karakteristike održivog transportnog sistema.



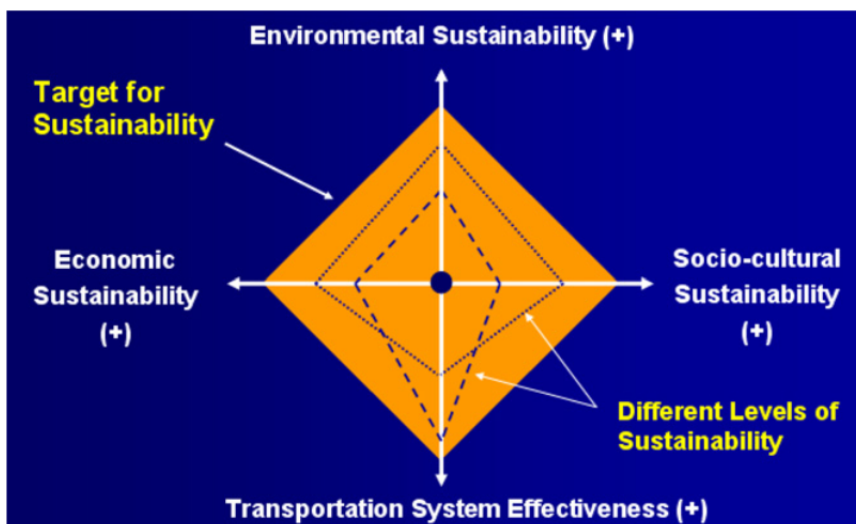
Slika 2.1. Četiri osnovna elementa održivosti transportnog sistema (izvor: Jeon et al, 2013)

Veliki broj autora ističe potrebu uključivanja pitanja održivosti transportnog sistema na planerskom nivou, kako bi se prilikom donošenja dugoročnih odluka sagledali uticaji datih odluka na održivost. Pregled literature takođe je pokazao da, iako među istraživačima koji se bave ovom oblašću postoje slični stavovi, standardni okviri za procenu održivosti nisu uspostavljeni. Indikatori održivosti transporta mogu se klasifikovati u četiri kategorije (koje odgovaraju osnovnim elementima održivosti): indikatori povezani sa efektivnošću transportnog sistema, ekonomski indikatori, ekološki i indikatori povezani sa društveno-kulturnim pitanjima i pitanjima jednakosti. Trenutno, u pitanjima održivosti u planiranju saobraćaja akcenat je uglavnom na efektivnosti transportnog sistema i odgovarajućim uticajima na životnu sredinu (uglavnom na kvalitet vazduha), dok se manji značaj daje ekonomskim i društvenim uticajima.

Pregled analitičkih metoda za procenu održivosti pokazao je da nema standardnih metoda, ali nekoliko značajnih elemenata svakako treba razmotriti u razvoju metodologije za procenu održivosti (Jeon et al, 2013):

1. Većina modela je bazirana na multidimenzionalnim aspektima ekonomskih, ekoloških i društvenih uticaja, ukazujući na to da metod treba da razmotri najmanje ove tri dimenzije, kao kriterijume za donošenje odluka;
2. Analiza orijentisana ka održivosti treba da uključi i interakcije unutar sistema tj. ne samo uticaj pojedinih faktora na održivost, već i međusobni uticaj između pojedinačnih faktora.

Predloženi su višedimenzionalni indeksi održivosti, koji ne samo da identifikuju glavne alternative, već i procenjuju *trade-off* između potencijalnih alternativa u transportnom planiranju. Ova analiza koristi se kao osnova za vizuelizaciju uticaja alternativnih planova na glavne dimenzije održivog transportnog sistema (kao što su efektivnost sistema, ekološka, ekonomska i društveno-kulturalna održivost) - Slika 2.2. Grafik prikazan na slici može se koristiti kao praktičan alat za podršku u odlučivanju, prilikom poređenja alternativa u višekriterijumskom okruženju (Jeon et al, 2013).



Slika 2.2. Vizuelizacija predloženog alata za ocenu održivosti (izvor: Jeon et al, 2013)

Planiranje bi trebalo da se bazira na indikatorima - standardizovanim informacijama pogodnim za analizu. Određeni indikatori pomažu u sagledavanju uticaja individualnih, kratkoročnih odluka na dugoročne, strateške ciljeve. Indikatori moraju biti pažljivo odabrani, kako bi prikazali različite uticaje i perspektive, a koje je pri tome moguće prikupiti i analizirati (Transportation Research Board, 2009). Indikatori bi trebali biti razumljivi za široku javnost i korisni za donosiocje odluka. Jedinice u kojima se izražava određeni indikator - referentne jedinice (koje se nazivaju i pokazatelji odnosa) su merne jedinice normalizovane tako da se olakša poređenje, npr. po godini, po glavi, po milji, po putovanju, po vozilu/godišnje.

### 2.3.2 Koncept i problemi održivog razvoja vazdušnog saobraćaja

Kao i u ostalim granama industrije, tako se i u vazdušnom saobraćaju, a u cilju „kontrolisanja“ negativnih uticaja vazdušnog saobraćaja na društvo i životnu sredinu, uvodi pojam održivosti i održivog razvoja.

U radu Janić (1999) dat je pregled mogućih uticaja civilnog vazduhoplovstva na okruženje:

- ◆ Prvo, može izložiti stanovništvo koje živi, radi ili se rekreira u blizini aerodroma buci, zagađenju vazduha i riziku od smrti ili povreda prilikom avionskih nesreća;
- ◆ Drugo, može direktno izložiti neke ljude riziku od smrti ili povreda usled avionskih nesreća, u slučaju kada su ti ljudi korisnici vazduhoplovnih usluga. Nesreće se mogu dogoditi na samom aerodromu ili tokom leta;
- ◆ Treće, može uzrokovati „patnju“ ljudi usled globalne emisije, koja doprinosi kiselim kišama (uglavnom izazvane emisijom NO<sub>x</sub>), globalnog zagrevanja (uglavnom izazvano emisijom CO<sub>2</sub>) i oštećenja ozonskog omotača (uglavnom izazvano emisijom CFC – hlorofluorouglenika iz klimatizacije vazduhoplova);
- ◆ Četvrto, kao i kod ostalih transportnih vidova, do zagušenja i kašnjenja može doći kad god potražnja za uslugom prevazilazi raspoložive kapacitete vazduhoplovne infrastrukture.

Uticaji civilnog vazduhoplovstva na životnu sredinu generišu troškove oba učesnika: korisnika i operatera (interne/privatne troškove) i društva u celini (eksterni troškovi). U pojedinim istraživanjima analizirani su dati troškovi. Na primer, Levison et al. (1998) sproveli su istraživanje u kome su poređeni eksterni troškovi putovanja avionom i autoputem između gradova.

ICAO (*International Civil Aviation Organization* – Međunarodna organizacija za civilno vazduhoplovstvo) je pokušala da koordiniše rad na „ekološkim problemima“ civilnog vazduhoplovstva na globalnom nivou. U radu Janić (1999) data je detaljna analiza svih potencijalnih problema navedenih od strane ICAO. Pregled potencijalnih problema i njihova analiza prikazani su u Prilogu II.1. Izvršene analize su pokazale da se civilno vazduhoplovstvo razvija u pravcu održivosti.

Švedska konsalting grupa INFRAS je 2000. godine objavila studiju *Sustainable Aviation*, gde opisuje održivi razvoj sa već poznatih aspekata: društvenog, ekološkog i ekonomskog (Haan, 2007). INFRAS koristi indikatore za društveni aspekt (*People*), ekološki (*Planet*) i ekonomski aspekt (*Profit*). Isti pristup je korišćen i od strane Evropske agencije za zaštitu životne sredine – EEA (*European Environmental Agency*). U Prilogu II.2 prikazani su predloženi indikatori (Tabela II.2), zatim indikatori

pregrupisani tako da donosioci odluka dobiju potrebne informacije o svim aspektima održivog razvoja u vazduhoplovstvu (Tabela II.3), kao i (za svaku grupu indikatora) ciljevi, odabrani pokazatelji vrednosti određenog indikatora i jedinice mera (Tabela II.4).

U radu Janić (2002) predstavljena je metodologija za procenu održivosti sistema vazdušnog saobraćaja. Ocena održivosti predstavlja važan i veoma složen istraživački, operativni i politički zadatak. Metodologija je zasnovana na sistemu indikatora održivosti definisanih za operativnu, ekonomsku, društvenu i ekološku dimenziju performansi sistema. Mere su definisane za svaki indikator, kako bi se izrazili efekti na sistem (dobiti) i uticaji (troškovi) za određenog učesnika, kao što su korisnici sistema – putnici, operateri, proizvođači, članovi lokalne zajednice, lokalne i centralne vlasti, razne vazduhoplovne organizacije, javnost (Prilog II.3, Tabele II.5. do II.11). Indikatori mogu da mere performanse sistema u apsolutnom i relativnom smislu. Takođe, mogu da ocene održivost sistema kao celine, ili održivost pojedinačnih delova sistema, na globalnom, regionalnom ili lokalnom nivou.

U radu Janić (2004) prikazana je primena metodologije za procenu održivosti sistema vazdušnog saobraćaja, predložene u radu Janić (2002). Procenjena je vrednost 26 indikatora. Većina analiziranih slučajeva (usled dostupnih podataka) se odnosi na američku, i nekoliko na evropsku vazduhoplovnu industriju. Generalno, na osnovu analiziranih slučajeva, zaključeno je da je vazduhoplovni transportni sistem, uz nekoliko izuzetaka, pokazao održivim (pod određenim uslovima, tokom posmatranog perioda).

U radu Celikel et al. (2005) definisani su indikatori ekološkog, ekonomskog i društvenog uticaja, sa aspekta različitih kategorija zainteresovanih strana: vazduhoplovne industrije, pružaoca usluga kontrole letanja, aerodroma (civilini i vojni), kao i sa aspekta putnika, a sve bazirano na / ili izračunato iz javno dostupnih podataka. Pokazano je da je održivost teško izraziti broječanim vrednostima, kako zbog subjektivne prirode izbora indikatora, tako i usled relativne pouzdanosti i dostupnosti korišćenih podataka. Odabrani indikatori za svakog od učesnika, domen i kvalitativna procena

uočenih trendova, kao i nivo pouzdanosti prikazani su tabelarno (Prilog II.4, Tabela II.12).

### **2.3.3 Koncept i problemi održivog razvoja aerodroma**

U današnje vreme kada raste pažnja usmerena ka problemima globalnog zagrevanja i efekta staklene bašte usled emisije gasova, sistem vazdušnog saobraćaja je sve više pod pritiskom da funkcioniše „po principima održivosti“. Aerodromi, kao važan deo tog sistema, nalaze se pod istim pritiskom. To je dovelo do potrebe da planeri aerodroma rade na različitim dizajnama aerodromske infrastrukture i različitim operativnim rešenjima kako bi se definisao „održiviji“ aerodrom (Oortmerssen, 2008).

Kao što je već napomenuto, da bi se određena infrastrukturna i operativna rešenja, vezana za funkcionisanje aerodroma, mogla oceniti sa aspekta održivosti, potrebno je definisati određene indikatore i mere performansi sistema.

Pregledom literature može se uočiti da se relativno mali broj istraživanja bavio definisanjem osnove za sistemsko monitorisanje, analizu i procenu održivog razvoja aerodroma. „Nedostatak“ istraživanja u datoj oblasti posebno se odnosi na razvoj određenih indikatora ili drugih alata pogodnih za kvantifikaciju održivog razvoja aerodroma. Kao što je već napomenuto u prethodnom poglavlju, u radu Janić (2002) prikazano je istraživanje razvoja metodologije za procenu održivosti sistema vazdušnog saobraćaja, koji se sastoji od aerodroma, kontrole letenja i vazduhoplovnih prevoznika.

Rad Janić (2010) predstavlja nastavak gore pomenutog istraživanja, ali ovaj put akcent je na proceni održivosti aerodroma. To zahteva modifikovanje pristupa, uključujući definisanje i detaljnu analizu efekata-doprinosa, uticaja-troškova, i načina njihove kvantifikacije za nadgledanje, analizu i procenu srednjoročnog i dugoročnog održivog razvoja aerodroma.

Generalno, bavljenje održivošću aerodroma je prilično složen zadatak, iz sledećih razloga (Janić, 2010):

- ◆ Multidimensionalnost performansi, koja podrazumeva razmatranje aerodroma kao sistem sa brojnim međusobno zavisnim i različitim komponentama, učesnicima, efektima-doprinosima i uticajima-troškovima;
- ◆ Kompleksnost uspostavljanja ciljeva održivosti prema gore pomenutim zavisnostima;
- ◆ Kompleksnost procene doprinosa određene politike mera i novih tehnologija održivom razvoju datog aerodroma.

Glavni principi za postizanje održivog razvoja datog aerodroma podrazumevaju ili kontinualno umanjeње negativnih uticaja ili *trade-off* između određenih pozitivnih efekata i negativnih uticaja. Oba principa mogu se primeniti u sledeće dve strategije (Janić, 2010):

Ograničavanje rasta aerodroma - strategija koja se zasniva na ograničavanju povećanja kapaciteta infrastrukture datog aerodroma, kako bi se ograničio negativan uticaj u smislu buke u okruženju i korišćenju zemljišta, i lokalnom i globalnom zagađenju vazduha. Aerodrom funkcioniše sa postojećim kapacitetom, pri čemu je u stanju da se prilagodi trenutnom i eventualno blago povećanom obimu potražnje, korišćenjem raspoloživih kapaciteta efikasnije i efektivnije.

Upravljanje održivim rastom - strategija koja deluje kao najracionalnija za većinu aerodroma i ona podrazumeva upravljanje srednjoročnog i dugoročnog rasta datog aerodroma, na odgovarajući način. To podrazumeva da se u uslovima rasta saobraćaja ukupni efekti-doprinosi održavaju ili čak povećavaju, dok ukupni eksterni negativni uticaji stagniraju i/ili opadaju.

U istom radu predložen je sistem indikatora za monitorisanje, analizu i procenu održivog razvoja datog aerodroma. Predloženi sistem je baziran na konceptu održivog razvoja aerodroma, definisanih efekata-doprinosi i uticaja-troškova, i specifičnih pokazatelja i mera za kvantifikaciju određenih efekata i uticaja.

Efekti-doprinosi. Dosadašnja iskustva su pokazala da većina aerodroma značajno doprinosi lokalnoj ekonomiji, uglavnom kroz direktno i indirektno zapošljavanje. Ovi



efekti su uglavnom u pozitivnoj korelaciji sa veličinom aerodroma i sa opsluženim saobraćajem tokom određenog vremenskog perioda.

*Uticaji-troškovi.* Negativni uticaji operacija datog aerodroma obično uključuju buku u okruženju, zagađenje vazduha, zagušenje i kašnjenja, zauzimanje zemljišta i generisanje otpada. Zagađenje vazduha se može posmatrati i na lokalnom i na globalnom nivou. Svaki od uticaja se razmatra kroz njegov primarni izvor i prirodu uticaja, a date su i moguće olakšavajuće mere.

Glavni cilj pri razvoju sistema indikatora je omogućiti relativno efikasnu i efektivnu procenu o postignutom nivou održivosti datog aerodroma, identifikovati faktore koji najviše utiču, kao i doprinos određenih učesnika.

Predloženi sistem indikatora je razvijen uz sledeće pretpostavke (Janić, 2010):

- ◆ Sistem mora da reflektuje preference određenih učesnika koji mogu biti uključeni u održivi razvoj aerodroma;
- ◆ Sistem se sastoji od pet podsistema koji odgovaraju različitim aspektima performansi sistema, kao što su operativni, ekonomski, društveni, ekološki i institucionalni aspekt;
- ◆ Mere određenih indikatora kvantitativno izražavaju efekte-doprinos i uticaje-troškove operacija aerodroma, bilo u apsolutnom ili relativnom monetarnom ili nemonetarnom smislu, obično kao funkcija obima aerodromskog izlaza;
- ◆ Ukoliko je „ciljna“ vrednost određenog indikatora utvrđena, biće korišćena kao referenca za poređenje trenutnog sa željenim razvojem, kao i za procenu trenutnog nivoa održivosti; i
- ◆ Indikatori i njihove određene mere mogu biti bitno zavisne jedna od drugih.

Predloženi sistem indikatora sadrži 12 indikatora: 4 za operativne performanse, 2 za ekonomske, 1 za društvene i 5 za ekološke performanse (opis predloženih indikatora prikazan je u Prilogu II.5). Indikatori mogu biti kvantifikovani za individualni aerodrom ili za niz aerodroma koji se nalaze u blizini i opslužuju određeni region.

Primena opisanog sistema indikatora prikazana je na dva primera. U tu svrhu, pored već definisanih koncepata „maksimalnog“ i „praktičnog“ kapaciteta, definisan je i koncept „ekološkog“ kapaciteta, kao maksimalni broj operacija, putnika, i/ili robe (tj. WLU – *workload unit*) opsluženih na datom aerodromu tokom posmatranog vremenskog perioda u uslovima postojanja stalne potražnje za uslugom i određene ekološke kvote.

#### Operativni kapacitet vs prag buke (kvota)

Aerodromski „ekološki“ kapacitet sa aspekta buke može se definisati kao maksimalni broj operacija, koji se može opslužiti tokom posmatranog vremenskog perioda u uslovima postojanja stalne potražnje za uslugom, a koji generiše ukupnu energiju zvuka unutar propisanih granica, tj. propisane kvote za buku. Kvota se može dati posebno za dolaske i poletanja (Janić, 2010).

#### Operativni kapacitet vs prag zagađenja (kvota)

Ekološki kapacitet aerodroma, sa aspekta datog praga zagađenja vazduha (kvote), može se izraziti kao maksimalni broj operacija i/ili WLU opsluženih tokom datog vremenskog perioda, u uslovima stalne potražnje za uslugom, čije ukupno zagađenje vazduha ostaje unutar zadate kvote (Janić, 2010).

Ovaj kapacitet se može posmatrati i kompleksnije. Na primer, određene aktivnosti, potrošnja energije i odgovarajuće zagađenje vazduha mogu biti posebno analizirani (kvantifikovani) za vazдушnu i zemaljsku stranu aerodroma. Za vazдушnu stranu, ovaj kapacitet se može izraziti kroz „broj operacija u određenom vremenskom periodu  $T^c$ “ ili kao „broj LTO (*landing/take-off*) ciklusa u određenom vremenskom periodu  $T^c$ “. Sa zemaljske strane, ovaj kapacitet se može izraziti kao „obim WLU u vremenskom periodu  $T^c$ “.

Svrha studije Lourenco i Pires (2005) bila je da se obezbedi planerski alat za proces donošenja odluka prilikom procene različitih aerodromskih projekata. Razvijen je model višekriterijumskog odlučivanja baziran na višedimenzionalnim indikatorima, koji su

grupisani po četiri kriterijuma: ekonomski, društveni, ekološki i transportno-infrastrukturni. Pored kvantitativnih analiza indikatora, koje bi se dobile odgovarajućim empirijskim istraživanjima, model predstavlja i kvalitativni pristup sa upotrebom težinskih kriterijuma, procenjenim od strane eksperata. Izbor između različitih projekata omogućen je kroz rezultujući indikator - tzv. unapređeni indeks održivosti (*The Enhanced Sustainability Index*). Klasifikacija indikatora održivosti prikazana je u Prilogu II.6, Tabela II.13.

## **2.4 Rezime postojećih istraživanja vs. planirano istraživanje u disertaciji**

Pregledom istraživanja iz oblasti kompleksnosti saobraćaja, uočeno je da se veoma mali broj autora bavio kompleksnošću saobraćaja na aerodromima i da još uvek nije uspostavljena standardna definicija i standardni način određivanja kompleksnosti saobraćaja na aerodromima. Takođe, nisu pronađena istraživanja koja se bave analizom kompleksnosti saobraćaja na aerodromu kao potencijalnom faktoru uticaja na održivost saobraćaja na određenom aerodromu.

Na osnovu pregleda istraživanja iz oblasti održivosti vazdušnog saobraćaja i aerodroma, može se zaključiti da još uvek ne postoji standardni niz indikatora za ocenu održivosti i održivog razvoja. Generalno, indikatori održivosti i održivog razvoja obuhvataju mere efektivnosti sistema, kao i mere uticaja sistema na ekonomski razvoj, ekološki integritet, i društveni kvalitet života.

Imajući u vidu napred izneto, jedna od glavnih razlika istraživanja sprovedenog u ovoj doktorskoj disertaciji, u odnosu na dosadašnja, ogledaće se u istraživanju uticaja kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma na održivi razvoj aerodroma.

Koncept i mera kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma, kao i indikatori održivog razvoja aerodroma koji su predloženi u ovom radu, prikazani su u Poglavlju 3, u okviru predložene metodologije za ocenu uticaja kompleksnosti na održivi razvoj aerodroma.

### **3. ISTRAŽIVANJE UTICAJA KOMPLEKSNOSTI SAOBRAĆAJA NA MANEVARSKIM POVRŠINAMA NA ODRŽIVI RAZVOJ AERODROMA**

U skladu sa predmetom i ciljem istraživanja u ovoj disertaciji, predložena je metodologija za analizu uticaja kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama na održivi razvoj aerodroma. Predložena metodologija razvijena je sa ciljem da se utvrdi da li postoji međusobna zavisnost između promene kompleksnosti saobraćaja na aerodromima (nastale usled primene različitih načina upravljanja saobraćajem, promene intenziteta saobraćaja i/ili promene u aerodromskoj infrastrukturi) i promena indikatora koji se u najvećoj meri odnose na operativne i ekološke performanse aerodroma, što ima poseban značaj prilikom ocene raspoloživih i/ili planiranih resursa aerodroma sa aspekta održivog razvoja.

#### **3.1 Pretpostavke i početni uslovi za razvoj metodologije**

Osnovna pretpostavka od koje se krenulo pri razvoju metodologije je da ona treba biti generalno primenljiva, tj. nezavisna od specifičnih karakteristika određenog aerodroma. Takođe, izbor indikatora za ocenu održivog razvoja aerodroma koji će se razmatrati, kao i pokazatelja kompleksnosti saobraćaja, treba biti u skladu sa osnovnom pretpostavkom. Samim tim, neki od indikatora za ocenu održivog razvoja aerodroma koji se mogu naći u literaturi, a koji se odnose na konkretni aerodrom (kao što su npr. profitabilnost, produktivost rada, broj stanovnika izložen buci itd.), neće biti razmatrani u ovoj disertaciji. U disertaciji biće razmatrani indikatori koji se prvenstveno odnose na operativne i ekološke performanse aerodroma, a u manjoj meri i na društveni aspekt održivosti. Takođe, razmatrani indikatori za ocenu održivog razvoja aerodroma treba da budu definisani tako da ih je moguće i međusobno porediti i ispitati međusobnu zavisnost između pojedinih indikatora, što se u referentnoj literaturi navodi kao značajno pri razvoju određene metodologije za ocenu održivosti.

Metodologija je definisana za sledeće početne uslove:

- ◆ konfiguracija manevarskih površina aerodroma i platformi, kao i konfiguracija vazdušnog prostora, koji obuhvata putanje vazduhoplova u fazama prilaza i sletanja, kao i tokom poletanja i početne faze penjanja nakon poletanja, su poznati,
- ◆ obim i struktura saobraćaja za posmatrani vremenski interval – broj poletanja i sletanja i njihova raspodela tokom posmatranog vremenskog intervala su poznati,
- ◆ odnos udela pojedinih tipova vazduhoplova u posmatranom saobraćaju su poznati,
- ◆ potrošnja goriva i emisija određenih gasova koje generišu određeni tipovi vazduhoplova po posmatranim fazama leta su poznati i
- ◆ troškovi emisije određenih gasova i buke su poznati.

### 3.2 Struktura metodologije

Predložena metodologija sastoji se iz sledećih koraka:

**Korak 1:** Definisanje koncepta i mere kompleksnosti saobraćaja na aerodromu;

**Korak 2:** Definisanje koncepta i indikatora održivosti: mere neefikasnosti;

**Korak 3:** Definisanje eksperimenata;

**Korak 4:** Sprovođenje eksperimenata;

**Korak 5:** Analiza rezultata: Utvrđivanje veze između kompleksnosti saobraćaja i održivog razvoja aerodroma.

U narednim poglavljima biće detaljno prikazani koraci predložene metodologije.

#### 3.2.1 Definisanje koncepta i mere kompleksnosti saobraćaja na aerodromu

Kompleksnost saobraćaja predstavlja jedan od važnih faktora koji utiče na donošenje odluka i radno opterećenje kontrolora letenja. Svaki let prolazi kroz različite faze leta na samom aerodromu i u njegovoj neposrednoj okolini: dolazak, prilaz i sletanje,

taksiranje, poletanje, pri čemu može doći do velikog broja različitih tipova međusobnih interakcija vazduhoplova. Pored toga, manevarske površine aerodroma i rulne staze na platformama mogu predstavljati složenu mrežu velikog broja mogućih putanja kretanja vazduhoplova. Pri tome, putanje pojedinih vazduhoplova se mogu ukrštati, konvergirati i divergirati. Funkcionisanje tako složenog, dinamičkog sistema, nije jednostavno razumeti u potpunosti. Pod „razumevanjem” funkcionisanja sistema, podrazumeva se sposobnost sagledavanja interakcija koje postoje između pojedinih entiteta sistema, kao i sagledavanje reakcije sistema na promene određenih parametara sistema, između ostalog i na kompleksnost celokupne saobraćajne situacije na manevarskim površinama aerodroma (Krstić, 2004).

Kao što je već rečeno, na smanjenje kompleksnosti može se uticati primenom različitih mera upravljanja na strateškom, (pre) taktičkom i operativnom nivou. Kako bi se procenio efekat određenih mera neophodno je definisati odgovarajuću meru kompleksnosti.

Mera kompleksnosti saobraćaja treba da obuhvati celokupni saobraćaj u sistemu koji se posmatra. Sistem analiziran u ovom istraživanju obuhvata manevarske površine aerodroma kao i vazdušni prostor u neposrednoj okolini aerodroma. U ovom slučaju smatraće se da se vazduhoplov nalazi u sistemu:

1. vazduhoplov u sletanju: od momenta pojave u tački zavšnog prilaznja (u daljem tekstu tačka FAF – *Final Approach Fix*), do momenta dolaska na pristanišnu platformu,
2. vazduhoplov u poletanju: od momenta zahteva za *push-back* ili startovanje motora, do određenog vremena nakon započinjanja poletanja (ovo vreme zavisi od tipa vazduhoplova koji poleće).

Koncept i mera kompleksnosti saobraćaja na aerodromu korišćeni u ovoj disertaciji, predloženi su u radovima Krstić (2004) i Krstić Simić i Tošić (2010). Kompleksnost je razmatrana kao kvantitet i kvalitet interakcija vazduhoplova na manevarskim

površinama aerodoma i u neposrednoj okolini aerodoma, pod određenim uslovima. Najveći izazov bio je izbor pravih parametara koji bi verno predstavili kompleksnost saobraćajne situacije na aerodromu i njegovoj neposrednoj okolini. Naime, izabrani parametri trebalo bi da obuhvate sve značajne međusobne interakcije vazduhoplova (interakcije sa značajnim uticajem na kompleksnost saobraćaja, a samim tim i na radno opterećenje kontrolora letenja). Takođe, izabrani parametri treba da budu merljivi.

U navedenim radovima (Krstić, 2004 i Krstić Simić i Tošić, 2010) uveden je pojam Dinamičke kompleksnosti –  $DC$  kao mera kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i definisan je kao linearna kombinacija gustine saobraćaja i predloženih faktora kompleksnosti saobraćaja. Dinamička kompleksnost u ovoj disertaciji definisana je na sličan način kao i u navedenim radovima, uz određene izmene\*, i određuje se na sledeći način:

$$DC(t) = \alpha TD(t) + \beta_1 N_h(t) + \beta_2 N_{t/l}(t) + \beta_3 N_{sv}(t) + \beta_4 N_m(t) + \beta_5 N_c(t) + \gamma_1 N_{REND}(t) + \gamma_2 N_{RMID}(t) + \gamma_3 N_{RXR}(t) \quad (1)$$

gde su:

- ♦  $\alpha, \beta_1 \dots \beta_5$  i  $\gamma_1 \dots \gamma_3$  - težine (značaj) gustine saobraćaja i predloženih faktora kompleksnosti saobraćaja,
- ♦  $TD$  - gustina saobraćaja, koja predstavlja ukupan broj vazduhoplova koji se u posmatranom trenutku nalaze unutar sistema, ne računajući vazduhoplove koji čekaju na granicama sistema (usled dodeljenih kašnjenja). Pri tome, pretpostavljeno je da vazduhoplovi u sletanja u tačku FAF dolaze već dovoljno razdvojeni, tako da u samoj tački FAF i od tačke FAF do praga PSS praktično nema kašnjenja. Naime, u praksi vazduhoplove u sletanju, u većini slučajeva, razdvaja kontrolor prilazne

---

\* Izmene se odnose na način određivanja gustine saobraćaja ( $TD$ ) i faktora - broj parova naizmeničnih operacija poletanja/sletanja ( $N_{t/l}$ ), u uvođenju novog faktora - saobraćaj u čekanju ( $N_h$ ) i koeficijentata  $\alpha, \beta_1 \dots \beta_5$ , koji predstavljaju težine (značaj) gustine saobraćaja i predloženih faktora kompleksnosti saobraćaja.

kontrole letenja i tako razdvojene predaje ih aerodromskoj kontroli letenja. Za vazduhoplove u poletanju smatra se da su unutar sistema od momenta kretanja sa gejtta.

- ◆  $N_h$  - saobraćaj u čekanju (*holding traffic*) tj. broj vazduhoplova u poletanju koji čekaju na gejtju (parking poziciji), posmatrano od momenta zahteva za *push-back* ili startovanje motora do momenta kretanja sa gejtta.
- ◆  $N_{t/l}$  - broj parova naizmeničnih operacija poletanja/sletanja (*take-off / landing*), gde se operacije vremenski preklapaju tokom određenog vremenskog intervala dok se nalaze u sistemu (misli se na situacije kada kontrolor letenja istovremeno ima u nadležnosti vazduhoplove u poletanju i sletanju, jer je to složeniji zadatak od kontrolisanja skupa vazduhoplova, koji su pri tome svi u sletanju ili svi u poletanju),
- ◆  $N_{sv}$  - broj potencijalnih narušavanja razdvajanja (*separation violation*) na zemlji tj. broj parova vazduhoplova između kojih će biti narušeno minimalno razdvajanje bez intervencije kontrolora letenja, bilo usled sustizanja (zato što je prateći vazduhoplov brži i/ili zato što vodeći vazduhoplov stoji), ili u presečnim, zajedničkim tačkama putanja vazduhoplova, koji se kreću po manevarskim površinama aerodroma,
- ◆  $N_m$  - broj spajanja (*merging*) tj. broj parova vazduhoplova koji će u toku rulanja proći kroz istu čvor i nastaviti dalje istom putanjom - spojiće se u jedan tok (u određenom vremenskom intervalu, a koji zavisi od minimalnog razdvajanja),
- ◆  $N_c$  - broj ukrštanja (*crossing*) tj. broj parova vazduhoplova koji će tokom rulanja proći kroz isti čvor i koji će dalje nastaviti različitim putanjama (u određenom vremenskom intervalu),

i za aerodrome sa dve ili više poletno-sletne staze:



- ◆  $N_{\text{REND}}$  - broj krosiranja poletno-sletne staze, na kraju PSS, tj. broj vazduhoplova koji će tokom rulanja preseći poletno-sletnu stazu u zoni praga PSS (ukoliko to na bilo koji način može imati uticaja na ostali saobraćaj),
- ◆  $N_{\text{RMID}}$  - broj krosiranja poletno-sletne staze u središnjem delu tj. broj vazduhoplova koji će tokom rulanja preseći PSS u središnjem delu (ukoliko to na bilo koji način može imati uticaja na ostali saobraćaj) i
- ◆  $N_{\text{RXR}}$  – broj krosiranja poletno-sletne staze u tački presecanja dve PSS, od strane vazduhoplova koji poleću ili sleću na jednu od datih poletno-sletnih staza (ukoliko to na bilo koji način može imati uticaja na ostali saobraćaj).

Vreme  $t$  predstavlja momenat bilo koje od promena u sistemu, koja dovodi do promene vrednosti Dinamičke kompleksnosti, kao što su sledeće situacije:

- ◆ pojava novog vazduhoplova na ulasku u sistem ili unutar sistema i to:
  - u tački FAF – ukoliko se radi o sletanju, ili na platformi - pojava zahteva za *push-back* ili startovanje motora ili kretanje sa gejta ako je vazduhoplovu dodeljeno čekanje na gejtu,
- ◆ početak ili kraj situacije potencijalnog narušavanja razdvajanja vazduhoplova prilikom rulanja,
- ◆ dolazak vazduhoplova u tačke ukrštanja rulnih staza ili u određene tačke na rulnim stazama, ukoliko pri tome dolazi do neke od navedenih pojava spajanja ili ukrštanja putanja vazduhoplova i kada se situacija spajanja ili krosiranja završi,
- ◆ dolazak vazduhoplova u tačke međusobnog ukrštanja poletno-sletnih staza ili tačke ukrštanja rulnih staza sa poletno-sletnim stazama (ukoliko postoji više od jedne PSS na aerodromu) i kada se situacija ukrštanja završi,

- ◆ kada vazduhoplov napušta sistem, i to:
  - dolaskom na pristanišnu platformu – za vazduhoplove koji su sleteli,
  - određeno vreme nakon započinjanja poletanja – za vazduhoplove u poletanju (ovo vreme zavisi od tipa vazduhoplova koji poleće).

Formula (1) je opšta i primenljiva je za različite konfiguracije aerodroma. U istraživanjima Krstić (2004) i Krstić Simić i Tošić (2010) pokazano je da se predložena mera kompleksnosti saobraćaja (*DC*) „ponaša” na očekivan način, tj. da je dobar pokazatelj promena stanja sistema (kompleksnosti saobraćaja) koje nastaju usled promene intenziteta saobraćaja i/ili konfiguracije manevarskih površina aerodroma, pod određenim uslovima.

### **3.2.2 Definisane koncepta i indikatora održivosti: mere neefikasnosti**

U idealnom sistemu vazdušnog saobraćaja svi vazduhoplovi bi između polaznog i odredišnog aerodroma leteli optimalnim 4D putanjama (direktna ruta, najefikasniji profili visina i brzina leta sa aspekta potrošnje goriva), i taksirali bi optimalnim rutama tokom kretanja po manevrskim površinama aerodroma (najkraće rute, bez zadržavanja i kretanje optimalnim brzinama). Ovakvo letenje omogućilo bi minimalno vreme leta, najmanju potrošnju goriva i emisiju gasova, najniže nivoe generisane buke i najmanje ukupne negativne efekte na kvalitet vazduha, što bi sa aspekta održivosti vazdušnog saobraćaja bilo najprihvatljivije. Ipak, ograničenja u realnim uslovima (kao npr. minimalno razdvajanje vazduhoplova, zagušenja u vazdušnom prostoru) vode do manje efikasnih profila leta, kašnjenja vazduhoplova i taksiranja po manevarskim površinama aerodroma putanjama dužim od optimalnih i, samim tim, negativni efekti sa aspekta održivosti vazdušnog saobraćaja su veći od onih koji bi nastali u slučaju „idealnih“ letova.

Upravljanje vazdušnim saobraćajem (*Air Traffic Management* - ATM) može imati značajnu ulogu u smanjenju negativnog uticaja vazdušnog saobraćaja sa aspekta održivosti. U svrhu boljeg razumevanja uticaja ATM-a, jedan od mogućih pristupa je

kvantifikovanje ATM performansi koristeći relevantne mere neefikasnosti leta, gde je neefikasnost definisana kao bilo kakva devijacija od optimalne 4D putanje leta, u bilo kojoj fazi leta. Ovo može omogućiti uočavanje nivoa i izvora neefikasnosti posmatranog sistema, kao i prepoznavanje potencijalnih mogućnosti za poboljšanje u ATM sistemu. Mera neefikasnosti – “*Inefficiency Metric*“ pruža informaciju o razlici između stvarnih i optimalnih vrednosti analiziranih parametara i opšta forma je (Reynolds, 2009):

$$\text{Mera neefikasnosti (\%)} = ((\text{Stvarna v.} - \text{Optimalna v.}) / \text{Optimalna v.}) \times 100 \quad (2)$$

U ovom istraživanju, za ocenu uticaja načina upravljanja od strane kontrole letenja na održivost aerodroma odabrani su: vreme koje vazduhoplovi dodatno provedu u sistemu usled kašnjenja, gorivo koje potroše, količina emitovanih gasova, kao i izabrani troškovi nastali usled kašnjenja (unutar definisanih granica sistema). Mera vremenske neefikasnosti – *Time Inefficiency (TI)*, neefikasnost sa aspekta potrošnje goriva - *Fuel Inefficiency (FI)* i emisije gasova - *Emission Inefficiency (EI)*, kao i „troškovna“ neefikasnost - *Cost Inefficiency (CI)* definisane su na osnovu formule (2), pa se stvarne i optimalne vrednosti u datoj formuli odnose na stvarno i optimalno vreme provedeno u sistemu, stvarnu i optimalnu potrošnju goriva i emisiju gasova i stvarne i optimalne vrednosti razmatranih troškova. U ovom radu, optimalne vrednosti su one koje bi vazduhoplov „generisao“ kada bi kroz sistem (u okviru posmatranih granica) prošao bez kašnjenja, tj. kao kada bi bio sam u sistemu.

### ***Vremenska neefikasnost***

Vremenska neefikasnost TI (*Time Inefficiency*) leta *i* određuje se po formuli:

$$TI_i = \left( \left( \sum_j T_{ij} - \sum_j T_{opt_{ij}} \right) / \sum_j T_{opt_{ij}} \right) \times 100 \quad j = 1, \dots, m_i \quad (3)$$

gde je:

- $T_{ij}$  - vreme koje posmatrani let  $i$  provede u fazi leta  $j$ ,
- $T_{opt,ij}$  - optimalno vreme – vreme koje bi let  $i$  proveo u fazi leta  $j$  kada bi bio sam u sistemu (bez kašnjenja),
- $m_i$  - ukupan broj posmatranih faza leta za let  $i$  (svaki let u posmatranom sistemu prolazi kroz određene faze u zavisnosti od tipa operacije: sletanje ili poletanje).

Takođe, na osnovu  $T_{ij}$  i  $T_{opt,ij}$  mogu se odrediti i kašnjenja vazduhoplova, kao ukupno kašnjenje svih posmatranih vazduhoplova, prosečno kašnjenje vazduhoplova u poletanju ili sletanju itd. Svi navedeni pokazatelji vremenske neefikasnosti predstavljaju indikatore operativnih performansi aerodroma.

### ***Neefikasnost potrošnje goriva i emisije gasova***

Tokom prethodne decenije brojne studije su se bavile procenom potrošnje goriva vazduhoplova, najčešće koristeći arhivu snimljenih podataka o letovima - *Flight Data Recorder (FDR) Archives*. Što se tiče kretanja po zemlji, u ICAO-ovoj bazi podataka emisije gasova određenih tipova pogonskih grupa vazduhoplova pretpostavljena je vrednost potiska motora od 7% za taksiranje i čekanje na zemlji, pri čemu se ne daju različite vrednosti za različite faze taksiranja. Neki od autora su pokazali da je nivo od 5% do 6% dosta realniji za većinu tipova motora, dok drugi daju četiri različite vrednosti za različite faze tokom taksiranja: 4% za potisak tokom čekanja (stajanja u mestu sa startovanim motorima), 5% tokom taksiranja konstantnom brzinom ili tokom kočenja, 7% tokom „oštrijih“ zaokreta i 9% tokom ubrzanja, dok drugi koriste određeni domen potisaka za određenu fazu taksiranja, sa različitim slučajnom raspodelom vrednosti potiska unutar zadatog domena (Ravizza et al., 2012). Khadilkar i Balakrishnan (2012) pokušali su da procene potrošnju goriva koristeći linearnu regresiju, i zaključili da je ukupno vreme taksiranja ipak glavni faktor potrošnje goriva, ali da i broj ubrzanja tokom taksiranja takođe ima značajan uticaj na potrošnju.

U ovom istraživanju, korišćene su vrednosti potrošnje goriva i odgovarajuće emisije gasova (za ugljen dioksid - CO<sub>2</sub>, vodenu paru, ugljen monoksid - CO, ugljovodonike -

HC, azot okside - NO<sub>x</sub>, benzen i sumpor okside - SO<sub>x</sub>) u različitim fazama leta koje su date u ICAO-ovoj bazi podataka emisije motora vazduhoplova - *Aircraft Engine Emissions Databank* (ICAO, 2012), i u EUROCONTROL-ovoj bazi podataka koja je (u ovom slučaju) preuzeta iz modela AEM3 – *Advanced Emission Model* (bazirana na BADA bazi podataka; Eurocontrol Experimental Centre, 2009). Na osnovu navedenih izvora podataka, usvojeni su sledeći potisci motora za različite faze leta:

- ◆ Prilaz i sletanja: Mod za prilaz – potisak 30%,
- ◆ Poletanje: Mod za poletanje – potisak 100%,
- ◆ Penjanje: Mod za penjanje – potisak 85%,
- ◆ Taksiranje u dolasku/odlasku i čekanje na zemlji: Mod za taksiranje i čekanje – potisak 7%.

Dati režimi potiska motora dalje impliciraju odgovarajuću potrošnju goriva i emisiju gasova. Vrednosti potrošnje goriva i emisije gasova za vazduhoplov u dolasku tokom dodeljenog kašnjenja u vazduhu (usled smanjenja brzine, vektorisanja itd.) preuzete su iz AEM3 baze podataka – za let na nivou leta FL30 (nivo leta FL30 je odabran kao nivo koji odgovara visini od 3000ft u standardnim uslovima, do koje se uglavnom razmatraju letovi u ciklusu sletanja i poletanja tj. u LTO ciklusu).

Potrošnja goriva i emisija gasova vazduhoplova unutar posmatranih granica sistema zavisi od tipa vazduhoplova, tipa pogonske grupe vazduhoplova, faze(a) leta i vremena provedenog u određenoj fazi(ama) leta. Pomoću jednačina (4) - (11), prikazan je način određivanja potrošnje goriva i emisije gasova, kako u pojedinim fazama leta, tako i za sve posmatrane faze leta, korišćen u disertaciji.

Potrošnja goriva  $FB_{ij}$  tokom određene faze  $j$  leta  $i$  (u kilogramima), računa se po formuli:

$$FB_{ij} = T_{ij} \times N_i \times FBI_{ij} \quad (4)$$

gde je:

$T_{ij}$  - vreme koje let  $i$  provede u fazi leta  $j$  (u sekundama),

$N_i$  - broj motora vazduhoplova koji obavlja let  $i$ ,

$FBI_{ij}$  - indeks potrošnje goriva jednog motora u fazi leta  $j$  za određeni tip motora vazduhoplova na letu  $i$  (u kg/s).

Ukupno potrošeno gorivo na letu  $i$  tokom posmatranih faza leta  $j$  je:

$$TF_i = \sum_j FB_{ij} = \sum_j (T_{ij} \times N_i \times FBI_{ij}) \quad j = 1, \dots, m_i \quad (5)$$

gde je:

$m_i$  - ukupan broj posmatranih faza leta za let  $i$  (svaki let prolazi kroz određene faze u zavisnosti od tipa operacije: sletanje ili poletanje).

Prilikom određivanja „stvarnih“ vrednosti potrošenog goriva za određeni let uzimaju se u obzir sve posmatrane faze leta, uključujući i fazu čekanja u vazduhu i/ili na zemlji, dok se prilikom određivanja optimalnih vrednosti potrošenog goriva za određeni let, u obzir ne uzima gorivo potrošeno tokom čekanja, bilo u vazduhu ili na zemlji.

Ukupno potrošeno gorivo  $TF_a$  svih posmatranih letova  $i$  (za posmatrane faze leta  $j$ ) je:

$$TF_a = \sum_i TF_i \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

gde je:

$n$  - ukupan broj posmatranih letova  $i$ .

Emisija gasa  $k$  tokom faze  $j$  posmatranog leta  $i$  određuje se, u zavisnosti o kom gasu se radi, na jedan od sledećih načina:

1. Za određivanje emisije HC, CO i NO<sub>x</sub>:

$$E_{ijk} = T_{ij} \times N_i \times EI_{ijk} \quad (7)$$

gde je:

$T_{ij}$  - vreme koje posmatrani let  $i$  provede u fazi leta  $j$  (u sekundama),

$N_i$  - broj motora vazduhoplova koji obavlja let  $i$ ,

$EI_{ijk}$  - emisija gasa  $k$  od strane jednog motora tokom faze leta  $j$  za određeni tip motora vazduhoplova na letu  $i$  (u kg/s).

2. Za određivanje emisije CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>x</sub>:

$$E_{ijk} = w_k \times FB_{ij} \quad (8)$$

gde je:

$w_k$  - faktor multipliciranja potrošenog goriva u datoj fazi leta  $j$  na letu  $i$  za određeni gas  $k$ :  $w_{CO_2} = 3,149$ ;  $w_{H_2O} = 1,23$ ;  $w_{SO_x} = 0,00084$ ,

$FB_{ij}$  - potrošeno gorivo na letu  $i$  tokom određene faze leta  $j$  (u kg).

3. Za određivanje emisije benzena:

$$E_{ij \text{ benzen}} = 2,372 \times N_i \times E_{ij \text{ HC}} \quad (9)$$

gde je:

$N_i$  - broj motora vazduhoplova koji obavlja let  $i$ ,

$E_{ij \text{ HC}}$  - emisija gasa HC od strane jednog motora tokom faze leta  $j$  za određeni tip motora vazduhoplova na letu  $i$  (u kg/s).

Analogno određivanju vrednosti potrošenog goriva, prilikom određivanja „stvarne“ emisije posmatranih gasova za određeni let uzimaju se u obzir sve posmatrane faze leta, uključujući i faze čekanja (bilo u vazduhu ili na zemlji). Takođe, prilikom određivanja optimalnih vrednosti emitovanih gasova tokom određenog leta, u obzir se ne uzima emisija tokom faza čekanja.

Ukupna emisija gasova  $TE_i$  za sve posmatrane gasove  $k$  tokom faza leta  $j$  na letu  $i$  je:

$$TE_i = \sum_j \sum_k E_{ijk} \quad k = 1, \dots, l; \quad j = 1, \dots, m_i \quad (10)$$

gde je:

$l$  - ukupan broj posmatranih gasova (zagađivača),

$m_i$  - ukupan broj posmatranih faza leta za let  $i$ .

Ukupna emisija gasova  $TE_a$  svih posmatranih letova  $i$  (u okviru granica posmatranog sistema) je:

$$TE_a = \sum_i TE_i \quad i = 1, \dots, n \quad (11)$$

gde je:

$n$  - ukupan broj posmatranih letova  $i$ .

### ***Neefikasnost potrošnje goriva***

Pošto je definisan način određivanja potrošnje goriva i emisije gasova, kako u pojedinim fazama leta, tako i za sve posmatrane faze leta, neefikasnost potrošnje goriva  $FI$  (*Fuel Inefficiency*) leta  $i$  može se odrediti po sledećoj formuli:

$$FI_i = ((TF_i - TF_{opt_i}) / TF_{opt_i}) \times 100 \quad (12)$$



gde je:

$TF_i$  - ukupno potrošeno gorivo na letu  $i$  tokom posmatranih faza leta  $j$  (jednačina 5),

$TF_{opt_i}$  - količina goriva koja bi bila potrošena na letu  $i$  (tokom posmatranih faza leta  $j$ ) kada bi vazduhoplov bio sam u sistemu (bez kašnjenja).

### ***Neefikasnost emisije gasova***

Slično se i neefikasnost emisije gasova  $EI$  (*Emission Inefficiency*) leta  $i$  može odrediti po formuli:

$$EI_i = ((TE_i - TE_{opt_i}) / TE_{opt_i}) \times 100 \quad (13)$$

gde je:

$TE_i$  - ukupna emisija gasova za sve posmatrane gasove  $k$  tokom faza leta  $j$  na letu  $i$  (jednačina 10),

$TE_{opt_i}$  - količina posmatranih gasova  $k$  koja bi bila emitovana na letu  $i$  (tokom posmatranih faza leta  $j$ ), kada bi vazduhoplov bio sam u sistemu (bez kašnjenja).

Neefikasnost potrošnje goriva i neefikasnost emisije gasova predstavljaju indikatore ekoloških performansi aerodroma.

### ***Troškovna neefikasnost***

Prilikom određivanja tzv. troškovne neefikasnosti -  $CI$  (*Cost Inefficiency*) uzete su u obzir vrednosti troškova koje se odnose na emisiju određenih gasova i buku.

### **Troškovi emisije gasova**

U radu Sölveling et al. (2011) dati su troškovi emisije određenih gasova, za tri scenarija: *low*, *base* i *high*. (Tabela 3.1). U disertaciji su korišćeni troškovi dati u *base* scenariju. Kao što se može videti iz Tabele 3.1, vrednosti troškova emisije nisu date za sve gasove koji su u ovoj disertaciji razmatrani (benzen i vodena para), ali ipak za većinu gasova jesu.

Tabela 3.1. Troškovi emisije vazduhoplova (Euro/kg)

	<b><i>Low</i></b>	<b><i>Base</i></b>	<b><i>High</i></b>
<b>CO</b>	0,12037	0,154762	0,223545
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,012037	0,04127	0,072222
<b>HC</b>	2,92328	6,190476	9,457672
<b>NO<sub>x</sub></b>	4,986772	7,050265	11,86508
<b>SO<sub>2</sub></b>	2,407407	6,706349	12,38095

Troškovi emisije gasova određeni su na sledeći način:

1. Trošak emisije gasa  $k$  tokom faze  $j$  posmatranog leta  $i$  određuje se pomoću sledeće formule:

$$CE_{ijk} = ce_k \times EI_{ijk} \quad (14)$$

gde je:

$ce_k$  - trošak emisije određenog gasa (u Euro/kg; Tabela 3.1, kolona *base*),

$EI_{ijk}$  - emisija gasa  $k$  od strane jednog motora tokom faze leta  $j$  za određeni tip motora vazduhoplova na letu  $i$  (u kg/s).

2. Ukupni trošak emisije gasova  $TCE_i$  za sve posmatrane gasove  $k$  tokom faza leta  $j$  na letu  $i$  je:

$$TCE_i = \sum_j \sum_k CE_{ijk} \quad k = 1, \dots, l; j = 1, \dots, m_i \quad (15)$$

gde je:

$l$  - ukupan broj posmatranih gasova (zagađivača),

$m_i$  - ukupan broj posmatranih faza leta za let  $i$ .

### **Troškovi buke**

U radu Sölveling et al. (2011) dati su i troškovi buke za četiri klase vazduhoplova: *small*, *large*, *B757* i *heavy*, za tri scenarija: *low*, *base* i *high*. (Tabela 3.2). U disertaciji su korišćeni podaci za *large* i *heavy* vazduhoplove, za *base* scenario.

Tabela 3.2. Troškovi buke (Euro/minut)

	<b>Klasa vazduhoplova po masi (broj putnika)</b>			
	<b><i>Small (70)</i></b>	<b><i>Large (160)</i></b>	<b><i>B757 (230)</i></b>	<b><i>Heavy (270)</i></b>
<b><i>Low</i></b>	1,482	3,432	4,992	5,850
<b><i>Base</i></b>	2,184	4,914	7,098	8,346
<b><i>High</i></b>	2,808	6,396	9,204	10,764

Trošak buke  $CN_i$  posmatranog leta  $i$  određuje se pomoću sledeće formule:

$$CN_i = cn_i x \sum_j T_{ij} \quad j = 1, \dots, m_i \quad (16)$$

gde je:

$T_{ij}$  - vreme koje posmatrani vazduhoplov provede u datoj fazi  $j$  na letu  $i$ ,

$cn_i$  - trošak buke za tip (klasu) vazduhoplova na letu  $i$  (u Euro/min, Tabela 3.2, za *base* scenario),

$m_i$  - ukupan broj posmatranih faza leta za let  $i$ .

Na osnovu troškova buke i emisije gasova, određena je i troškovna neefikasnost  $CI_i$  leta  $i$ , i to na sledeći način:

$$CI_i = \frac{(TCE_i + CN_i) - (TCE_{iOPT} + CN_{iOPT})}{(TCE_{iOPT} + CN_{iOPT})} \times 100 \quad (17)$$

gde je:

$TCE_i$  - trošak emisije gasova za posmatrane faze leta  $i$

$CN_i$  - trošak generisane buke tokom posmatranih faza leta  $i$

$TCE_{iOPT}$  - trošak emisije gasova za posmatrane faze leta  $i$ , kada bi vazduhoplov bio sam u sistemu (bez kašnjenja)

$CN_{iOPT}$  - trošak generisane buke tokom posmatranih faza leta  $i$ , kada bi vazduhoplov bio sam u sistemu (bez kašnjenja).

U radu Levinson et al. (1999) prikazani su procenjeni troškovi buke, pri čemu su ovi troškovi posmatrani kao društveni troškovi (pored troškova emisije gasova i troškova zagušenja i nesreća). U radu Sölveling et al. (2011; rad iz kog su preuzeti podaci vezani za proračun troškova buke u ovoj disertaciji), prilikom određivanja troškova buke autori se pozivaju na prethodno pomenutu referencu. Takođe, u istom radu (Sölveling et al. 2011), autori zaključuju da su ekološki troškovi, uzimajući u obzir trenutnu regulativu, uglavnom društveni troškovi. Na osnovu gore navedenog, u ovoj doktorskoj disertaciji usvojeno je da se troškovi emisije gasova i buke posmatraju kao indikator koji pripadaju društvenom aspektu održivosti aerodroma.

Na osnovu napred iznetog može se zaključiti da su u predloženoj metodologiji uvedeni indikatori koji pripadaju sledećim aspektima održivosti aerodroma:

- ◆ efikasnost (operativne performanse),
- ◆ ekološki aspekt i
- ◆ društveni aspekt.

S obzirom da je metodologija definisana uz pretpostavku da treba biti generalno primenljiva, tj. nezavisna od specifičnih karakteristika određenog aerodroma, ekonomski aspekt održivosti aerodroma, koji podrazumeva razmatranje specifičnih karakteristika aerodroma, u ovoj disertaciji nije razmatran.

Metodologija je namenjena planerima aerodroma i treba da im omogući sagledavanje uticaja prognoziranog povećanja saobraćaja na taktičke i strateške planove razvoja aerodroma i ocenu kompleksnosti saobraćaja i pojedinih aspekata održivosti aerodroma.

U narednom poglavlju biće prikazana primena predložene metodologije za različite taktike upravljanja od strane kontrole letenja, za različite prognoziranje intenzitete saobraćaja i konfiguracije manevarskih površina aerodroma.

#### 4. PRIMENA PREDLOŽENE METODOLOGIJE

Kao što je već rečeno, predložena metodologija treba da omogući planerima aerodroma sagledavanje uticaja načina upravljanja saobraćajem i resursima aerodroma od strane kontrole letenja u uslovima prognozirano rastu saobraćaja na održivost aerodroma, kroz analizu uticaja na predloženu meru kompleksnosti saobraćaja i indikatore neefikasnosti sistema. U skladu sa tim, primena predložene metodologije biće ilustrovana kroz dva eksperimenta za hipotetički aerodrom:

1. Eksperiment koji ima za cilj da ilustruje primenu metodologije za sagledavanje uticaja određenih **taktičkih mera** upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja na vrednost dinamičke kompleksnosti saobraćaja, kao i na mere neefikasnosti sistema, koje se mogu primeniti na aerodromu u slučaju kada prognozirani saobraćaj (srednjoročna prognoza saobraćaja) ukazuje na obim saobraćaja koji će u sistemu dovesti do zagušenja saobraćaja, tj. do značajnih kašnjenja – u daljem tekstu **Eksperiment A**; i
2. Eksperiment koji ima za cilj da ilustruje primenu metodologije u uslovima daljeg povećanja obima saobraćaja na istom aerodromu (u odnosu na nivo saobraćaja u Eksperimentu A; dugoročna prognoza saobraćaja) kada je neophodno razmotriti primenu određenih **strateških mera** (na primer izgradnja nove PSS), kao i **taktičkih mera** upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja (koje se tada mogu primeniti) – u daljem tekstu **Eksperiment B**.

##### 4.1 Pretpostavke za primenu metodologije

Primena predložena metodologije biće prikazana kroz navedene eksperimente, pri čemu su uvedene sledeće pretpostavke:

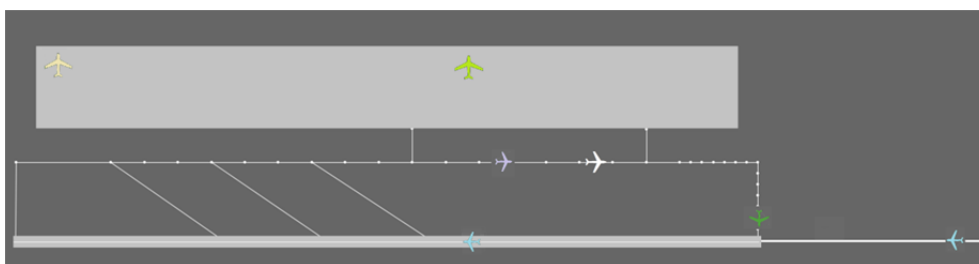
- ◆ Granice sistema koji će biti razmatran su poznate: za vazduhoplove u sletanju - od tačke FAF do pristanišne platforme; za vazduhoplove u poletanju - od pristanišne platforme do tačke do koje vazduhoplov stiže nakon određenog vremena od započinjanja poletanja (ovo vreme zavisi od tipa vazduhoplova u poletanju);
- ◆ Kao što je već navedeno u pretpostavkama za razvoj metodologije, i za primenu metodologije važi pretpostavka da su poznati: konfiguracija manevarskih površina aerodroma i platformi, kao i konfiguracija vazdušnog prostora (koji obuhvata putanje vazduhoplova u fazama prilaza i sletanja, kao i tokom poletanja i početne faze penjanja nakon poletanja), obim i struktura saobraćaja, odnos udela pojedinih tipova vazduhoplova u posmatranom saobraćaju, potrošnja goriva i emisija gasova za određene tipove vazduhoplova po posmatranim fazama leta, troškovi emisije određenih gasova i buke koje generišu određeni tipovi vazduhoplova;
- ◆ Za vrednosti brzina vazduhoplova, razdvajanja između dva sletanja, dva poletanja ili između sletanja i poletanja, razdvajanja na PSS i na zemlji tokom taksiranja je pretpostavljeno da su poznate vrednosti, odabrane iz domena tipičnih operativnih vrednosti u razmatranim scenarijima;
- ◆ Vazduhoplovi zauzimaju rulne staze i presečne tačke rulnih staza (raskrsnice), primenom pravila „Prvi došao– prvi opslužen” (FCFS);
- ◆ Kretanje vazduhoplova po platformi do/od rulne staze se ne posmatra;
- ◆ Posmatrani sistem na početku posmatranog perioda je prazan, tj. u njemu nema saobraćaja.

## 4.2 Ulazni podaci

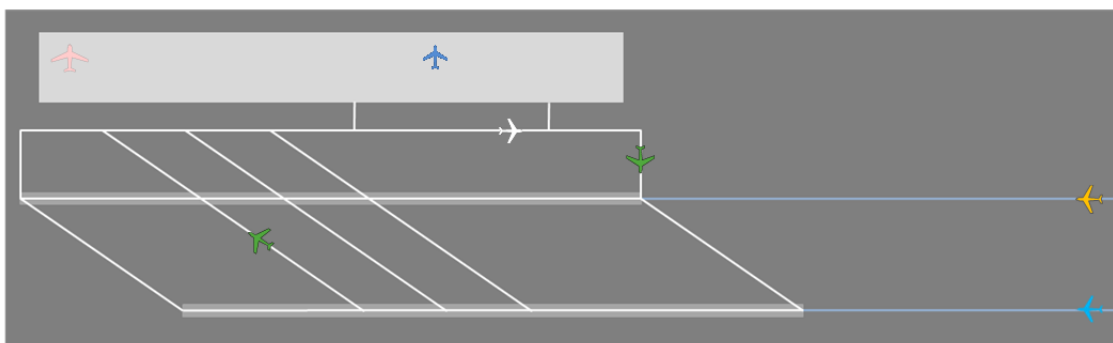
### 4.2.1 Konfiguracije aerodroma

Primenom simulacionog modela SIMMOD (Verzija 8.1), modeliran je aerodroma sa dve različite konfiguracije manevarskih površina (postojeću i planiranu), i to:

- ◆ Aerodrom sa jednom poletno-sletnom stazom (PSS) i rulnom stazom paralelnom sa PSS (Slika 4.1) - korišćen u Eksperimentu A;
- ◆ Aerodrom sa dve paralelne PSS (aerodrom korišćen u Eksperimentu A sa proširenjem infrastrukture u smislu izgradnje nove, paralelne PSS) sa rulnom stazom paralelnom sa poletno-sletnim stazama (Slika 4.2) - korišćen u Eksperimentu B. Rastojanje između poletno-sletnih staza je 3000 ft (915 m) - srednje razdvojene PSS.



Slika 4.1. Aerodrom sa jednom PSS i rulnom stazom paralelnom sa PSS



Slika 4.2. Aerodrom sa dve PSS i rulnom stazom paralelnom sa PSS

Vazduhoplovi u sletanju se u sistemu pojavljuju u tački FAF, koja se nalazi u produžetku ose PSS i to na 5 NM od praga PSS na koji se sleće.



Vazduhoplovi u poletanju se u sistemu pojavljuju u momentu kada traže dozvolu da krenu na poletanje (*push-back* ili startovanje motora). U momentu kada vazduhoplov krene da rula ka poziciji za čekanje za poletanje, smatra se da se on odmah nalazi na početku rulne staze na izlasku sa platforme, tj. ne uzima se u obzir vreme kretanja vazduhoplova po platformi od parking pozicije do izlaska na rulnu stazu (kretanje po platformi se ne razmatra);

Date konfiguracije manevarskih površina odabrane su kao konfiguracije za koje kontrola letenja ima mogućnost da organizuje obavljanje saobraćaja na više različitih načina.

#### **4.2.2 Taktike upravljanja saobraćajem u eksperimentima**

U slučaju Eksperimenta A, analizirana su dva scenarija, tj. dve taktike koje kontrola letenja može primeniti za iskorišćenje infrastrukture:

Scenario u kojem se primenjuje taktika sekvenciranja: **Sletanja imaju prioritet (Arrivals priority – AP)**, prilikom zauzimanja PSS. Sekvenca vazduhoplova u dolasku određena je na osnovu momenata kada se vazduhoplovi pojavljuju u sistemu u tački FAF (FCFS sekvenca), a sekvenca vazduhoplova u poletanju na osnovu momenata kada vazduhoplovi u poletanju stižu na poziciju za čekanje na poletanje, koja se nalazi neposredno pored praga PSS sa kojeg se započinje poletanje (takođe FCFS sekvenca). Poletanja mogu dobiti odobrenje za izlazak na PSS samo ukoliko ima dovoljno vremena (rastojanja) da vazduhoplov poleti između dva sletanja ili posle prethodnog poletanja (u daljem tekstu Scenario 1).

Scenario u kojem se primenjuje taktika sekvenciranja: **Sletanja-poletanja (Arrival-departure - A/D)**, prilikom zauzimanja PSS. Sekvence vazduhoplova u sletanju i poletanju se određuju posebno, na isti način kao u prethodnom slučaju. Sletanja se dodatno razdvajaju (ukoliko nisu dovoljno razdvojena na osnovu dodeljenih momenata pojave u sistemu), a u cilju umetanja operacije poletanja između svaka dva sletanja.

Sletanjima će na taj način biti dodeljena dodatna kašnjenja, dok će ukupna kašnjenja vazduhoplova u poletanju biti manja u odnosu na prethodnu taktiku sekvenciranja (u daljem tekstu Scenario 2).

U okviru Eksperimenta B, u slučaju aerodroma sa dve PSS razmatrana su takođe dva scenarija tj. dve taktike koje kontrola letenja može primeniti za iskorišćenje infrastrukture:

Scenario u kojem se primenjuje **odvojeni (segregated) operativni mod** – simultano obavljanje operacija na paralelnim PSS, pri čemu se jedna staza koristi isključivo za prilaz i sletanje, a druga isključivo za poletanja (u daljem tekstu Scenario 3).

Scenario u kojem se primenjuje **mešoviti (mixed) operativni mod** – simultano obavljanje operacija na paralelnim PSS, pri čemu se jedna staza koristi za oba tipa operacija (sletanje i poletanja), a druga staza isključivo za sletanja. Pri tome, uvedena je pretpostavka da se spoljašnja PSS koristi za sletanja iz grupe *large* vazduhoplova dok *heavy* vazduhoplovi sleću na unutrašnju PSS (videti u Poglavlju 4.2.3 raspodelu saobraćaja po tipu vazduhoplova). Na taj način, razdvajanje između vazduhoplova koji koriste istu PSS u sletanju je unificirano i smanjeno (u poređenju sa slučajem kada istu stazu koriste obe grupe vazduhoplova: *large* i *heavy*). Za stazu sa mešovitim operacijama korišćena je taktika „sletanja imaju prioritet” tj. AP taktika sekvenciranja, jer se zbog relativno malog broja *heavy* sletanja (25% od svih sletanja; Poglavlje 4.2.3), očekuje da samo mali broj vazduhoplova u poletanju dobije dodatno kašnjenje usled prioriteta sletanja vazduhoplova (u daljem tekstu Scenario 4).

Pošto pretpostavljeno rastojanje između poletno-sletnih staza iznosi 3000 ft (915 m) - srednje razdvojene PSS, u Scenariju 3 operacije na PSS su nezavisne, dok su u Scenariju 4 simultane operacije prilaza na obe PSS zavisne (mora se održavati dijagonalno rastojanje od najmanje 2NM između susednih prilaza: ICAO, 2004, ICAO, 2013).

### 4.2.3 Stuktura i karakteristike saobraćaja

- ◆ Intenzitet saobraćaja:

U razmatranim scenarijima, pretpostavljeno je da se vazduhoplovi pojavljuju u sistemu na slučajan način, pri čemu međuvreme nailaska između dva vazduhoplova (i za sletanja i za poletanja) ima sledeću ravnomernu raspodelu:

- od 1 do 3 minuta - R(60s, 180s) – slučaj „manjeg” intenziteta saobraćaja - intenzitet saobraćaja koji se koristi u Eksperimentu A. Ovaj intenzitet saobraćaja odgovara pretpostavljenom prognoziranom saobraćaju (određen na osnovu srednjoročne prognoze saobraćaja) i treba da ilustruje obim saobraćaja koji će dovesti do zagušenja sistema, tj. do značajnih kašnjenja vazduhoplova;

- od 0,5 do 2,5 minuta - R(30s, 150s) – slučaj „većeg” intenziteta saobraćaja, intenzitet saobraćaja koji se koristi u Eksperimentu B. Ovaj intenzitet saobraćaja odgovara pretpostavljenom prognoziranom saobraćaju (određen na osnovu dugoročne prognoze saobraćaja) i treba da ilustruje još veći obim saobraćaja u odnosu na Eksperiment A, kada je neophodno da planeri aerodroma razmotre primenu određenih strateških mera (npr. izgradnja nove PSS), kao i taktičkih mera upravljanja saobraćajem koje se tada mogu primeniti.

- ◆ Tip operacija (sletanja ili poletanja) i tip vazduhoplova:

U analiziranim eksperimentima posmatraju se dva tipa vazduhoplova: *heavy* i *large*\*. Tip operacija i tip vazduhoplova su dodeljeni prethodno generisanim vazduhoplovima na slučajan način (odnos sletanja / poletanja: 50/50% i odnos *heavy* / *large* vazduhoplovi: 25/75%).

---

\* Podela vazduhoplova po FAA-u (Horonjeff et al, 2010).

- ◆ Brzine vazduhoplova:
  - za *heavy* vazduhoplove u sletanju: 150 kt,
  - za *large* vazduhoplove u sletanju: 130 kt,
  - za oba tipa vazduhoplova brzina rulanja po rulnim stazama je 25 kt i po rulnim stazama na izlasku sa platforme 15 kt.
  
- ◆ Razdvajanje vazduhoplova u prilazu (koji sleću na istu PSS) prikazano je u Tabeli 4.1:

Tabela 4.1. Razdvajanje vazduhoplova u prilazu u NM

<b>Vodeći/prateći</b>	<i>heavy</i>	<i>large</i>
<i>heavy</i>	4	5
<i>large</i>	3	3

- ◆ Zauzetost PSS nakon sletanja vazduhoplova (u zavisnosti od tipa vazduhoplova i izlaznice na kojoj vazduhoplov napušta PSS) prikazana je u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Zauzetost PSS nakon sletanja (u sekundama)

<b>Tip a/c / izlaznica</b>	<i>Izlaznica 1</i>	<i>Izlaznica 2</i>	<i>Izlaznica 3</i>
<i>heavy</i>	-	47	60,5
<i>large</i>	41	53	-

- ◆ Poletanje se može započeti ukoliko se vazduhoplov u prilazu nalazi na više od 2NM od praga na koji sleće, prethodni vazduhoplov u sletanju je napustio PSS i prethodno poletanje je dovoljno udaljeno;
- ◆ Razdvajanje između dva vazduhoplova u poletanju je: 120s – ukoliko je vodeći vazduhoplov tipa *heavy*, odnosno 90s ukoliko je vodeći vazduhoplov tipa *large*.

#### 4.2.4 Faktori i težine faktora kompleksnosti

- ◆ Gustina saobraćaja i svi faktori kompleksnosti saobraćaja u jednačini za određivanje Dinamičke kompleksnosti (jednačina 1) imaju jednak značaj: vrednosti koeficijenata  $\alpha$ ,  $\beta_1 \dots \beta_5$  i  $\gamma_1 \dots \gamma_3$  jednake su jedinici. Uvođenje date pretpostavke imaće značajan uticaj na vrednosti  $DC$ . Naime, za pretpostavljene intenzitete saobraćaja, u sistemu će tokom posmatanog vremenskog intervala biti prisutan određeni (uglavnom relativno veliki) broj vazduhoplova (što određuje vrednost gustine saobraćaja  $TD$ ), dok će broj različitih interakcija, koje su „predstavljene” predloženim faktorima kompleksnosti, biti svakako manji, pa će vrednost  $TD$  imati najveći uticaj na vrednost  $DC$ . Stoga vrednosti  $DC$  određene na osnovu ove pretpostavke moraju biti pažljivo analizirane i interpretirane;
- ◆ Za faktor kompleksnosti saobraćaja  $N_{v/l}$  – broj parova naizmeničnih operacija poletanja/sletanja na istu PSS\*, usvojene su sledeće vrednosti:
  - $N_{v/l} = 0$  – za vremenske intervale kada kontrolor letenja u nadležnosti (tj. unutar definisanih granica sistema) istovremeno ima ili samo vazduhoplove u poletanju ili samo vazduhoplove u sletanju, ili
  - $N_{v/l}$  vrednost jednaka je broju vazduhoplova u sletanju istovremeno prisutnih u prostoru između FAF-a i izlaznice sa PSS uvećanom za 1 (za vazduhoplov koji čeka prvi u redu za poletanje) ili za 2 (ako vazduhoplov koji je započeo poletanje nije oslobodio PSS za naredno poletanje, a u redu za poletanje čeka bar jedan vazduhoplov). Pri tome, u obzir se uzima samo vazduhoplov koji stoji prvi u redu za poletanje (ukoliko ga ima u određenom trenutku), pošto kontrolor letenja treba da omogući upravo tom vazduhoplovu da poleti između dva sletanja. Sledeće poletanje kontrolor letenja će razmatrati tek pošto se obezbedi razdvajanje od prethodnog vazduhoplova u poletanju itd.

---

\* U slučaju Scenarija 4, u proračunu za  $N_{v/l}$  uzimaju se u obzir poletanja i *heavy* sletanja tj. poletanja i sletanja koja se obavljaju na unutrašjoj PSS.

#### 4.2.5 Vrednosti indikatora neefikasnosti

- ◆ Kašnjenja, potrošnja goriva i emisija gasova, kao i troškovi buke i emisije gasova vazduhoplova određivani su za sledeće faze leta: čekanje vazduhoplova u vazduhu (u fazi prilaza, pre tačke FAF)\*, prilaz, sletanje, poletanje, penjanje, taksiranje u dolasku i odlasku i čekanje na manevarskim površinama, na način opisan u Poglavlju 3.2.2;

\* U Poglavlju 3.2.1 navedeno je da se, prilikom određivanja gustine saobraćaja (TD), sletanja uzimaju u obzir od momenta pojave u tački FAF (uz pretpostavku da vazduhoplovi u sletanja u tačku FAF dolaze već dovoljno razdvojeni, tako da u samoj tački FAF i od tačke FAF do praga PSS nema kašnjenja). Međutim, prilikom određivanja mera neefikasnosti, sletanja su posmatrana od momenta generisanja (u ovom slučaju sletanja se generišu na 10NM od praga PSS na koju se sleće). Naime, kašnjenja se sletanjima u prilazu dodeljuju pre stizanja u tačku FAF (koja se nalazi na 5 NM od praga staze), ali su ona generisana usled razdvajanja vazduhoplova u prilazu i sletanju, pa se kao takva trebaju uzeti u obzir prilikom razmatranja efikasnosti funkcionisanja sistema.

- ◆ U analiziranim eksperimentima, s aspekta potrošnje goriva i emisije gasova, dva tipa vazduhoplova su razmatrana za *heavy* vazduhoplove: B747 (4 motora: tipa 3GE077) i A310 (2 motora: tipa 1GE015) – sa učešćem od oko 50/50%, i dva tipa za *large* vazduhoplove: B737-700 (2 motora: tipa 3CM031) i F100 (2 motora: tipa 3RR031) – takode sa učešćem 50/50%;

### 4.3 Razmatrani eksperimenti i karakteristike

U Tabeli 4.3 sumirani su svi eksperimenti i scenariji koji su razmatrani u ovoj disertaciji.

Tabela 4.3. Analizirani eksperimenti i scenariji

<b>Eksperiment</b>	<b>Nivo mera</b>	<b>Broj PSS</b>	<b>Dodeljivanje PSS</b>	<b>Taktika sekvenciranja</b>	<b>Intenzitet saobraćaja</b>
<b>Eksperiment A</b>	Uticao taktičkih mera	1 PSS		AP taktika sekvenciranja Scenario 1	„Manji” intenzitet saobraćaja
		1 PSS		A/D taktika sekvenciranja Scenario 2	„Manji” intenzitet saobraćaja
<b>Eksperiment B</b>	Uticao taktičkih i strateških mera	1 PSS		A/D taktika sekvenciranja Scenario 2B*	„Veći” intenzitet saobraćaja
		2 PSS	Odvojene operacije: ◆ spoljašnja PSS: sva sletanja ◆ unutrašnja PSS: sva poletanja	Scenario 3	„Veći” intenzitet saobraćaja
		2 PSS	Mešovite operacije: ◆ spoljašnja PSS: <i>large</i> sletanja ◆ unutrašnja PSS: sva poletanja i <i>heavy</i> sletanja	AP taktika sekvenciranja Scenario 4	„Veći” intenzitet saobraćaja

\* Scenario 2B – uslovi odvijanja saobraćaja su isti kao i u Scenariju 2 (Poglavlje 4.2.2), s tim što intenzitet saobraćaja odgovara „većem” intenzitetu saobraćaja.

Izvedeni su stohastički eksperimenti u simulacionom modelu SIMMOD kako bi se odredio domen vrednosti za: Dinamičku kompleksnost - *Dynamic Complexity (DC)*, kašnjenje vazduhoplova tj. vremensku neefikasnost - *Time Inefficiency (TI)*, neefikasnost potrošnje goriva - *Fuel Inefficiency (FI)*, neefikasnost emisije gasova - *Emission Inefficiency (EI)* i troškovnu neefikasnost – *Cost Inefficiency (CI)*, za date eksperimente i scenarije odvijanja saobraćaja. Proračuni su urađeni za vazduhoplove koji su ušli u sistem u intervalu od jednog sata, pod pretpostavkom da je sistem na početku posmatranog perioda bio prazan i da vazduhoplovi nastavljaju da se pojavljuju

u sistemu po istoj raspodeli, sve dok svi posmatrani vazduhoplovi (oni koji su ušli u sistem u prvom satu) ne budu opsluženi.

Vrednosti kompleksnosti saobraćaja i neefikasnosti određene su na osnovu podataka iz različitih izlaznih izveštaja simulacionog modela SIMMOD i obradom podataka u *Microsoft Excel-u*.

Pošto je svrha eksperimenata bila samo da ilustruje predloženu metodologiju za određivanje uticaja promene kompleksnosti saobraćaja na mere neefikasnosti, 6 iteracija za svaki od pomenutih scenarija u eksperimentima je simulirano i analizirano. Iteracije su generisane tako što su vazduhoplovima u sletanju i poletanju na slučajan način dodeljena kašnjenja, po ravnomernoj raspodeli od 0 do 3 minuta, u poređenju sa početno generisanim uzorkom saobraćaja.



## 4.4 Rezultati i diskusija

U ovom poglavlju prikazani su i diskutovani dobijeni rezultati, a koji se odnose na: vrednosti dinamičke kompleksnosti *DC*, kašnjenja vazduhoplova i vremenske neefikasnosti *TI*, neefikasnosti potrošnje goriva *FI*, neefikasnosti emisije gasova *EI* i troškovne neefikasnosti *CI*. Takođe, prikazana je i međuzavisnost između promene kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i promene mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja, kao i međusobni odnos između pojedinih mera neefikasnosti, za razmatrane eksperimente i scenarije odvijaja saobraćaja (Tabela 4.3), tj. za različite intenzitete saobraćaja, različite konfiguracije aerodroma (strateške mere) i različite taktičke mere upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja.

### 4.4.1 Taktičke ATM mere (ATC taktike) – Eksperiment A

U Eksperimentu A analizirani su Scenariji 1 i 2 (Poglavljje 4.2.2), sa (pretpostavljenim) prognoziranim intenzitetom saobraćaja koji će u sistemu dovesti do zagušenja, tj. do značajnih kašnjenja vazduhoplova. Kao što je već rečeno, ovi scenariji su generisani kako bi se analizirao uticaj primene određenih taktičkih mera upravljanja prognoziranim saobraćajem od strane kontrole letenja na vrednosti *DC* i vrednosti predloženih mera neefikasnosti.

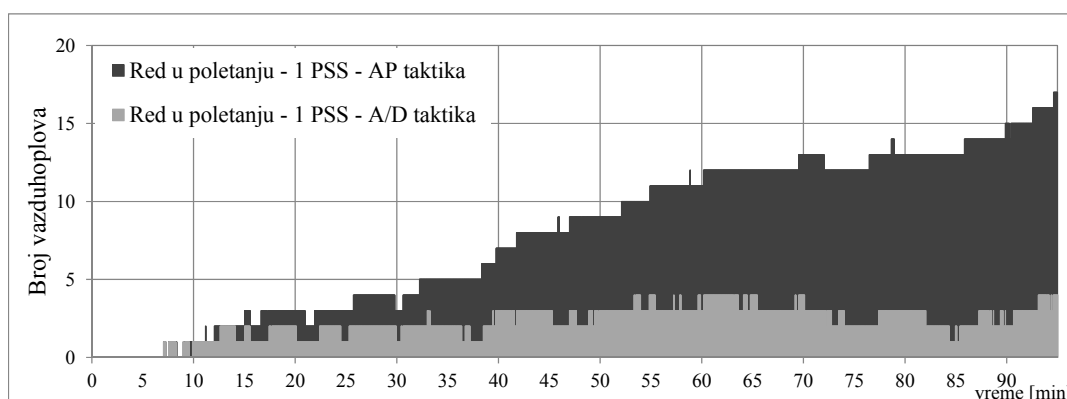
U Tabeli 4.4 prikazane su vrednosti prosečnog broja opsluženih vazduhoplova, prosečnog ukupnog kašnjenja i kašnjenja po vazduhoplovu, dobijene za dve različite taktike sekvenciranja vazduhoplova: sletanja imaju prioritet - AP (Scenario 1) i sletanja-poletanja - A/D (Scenario 2), iz 6 iteracija simulacije. Prikazane su vrednosti za sve posmatrane vazduhoplove koji su ušli u sistem u toku jednog sata, kao i vrednosti za vazduhoplove koji su opsluženi u posmatranom jednočasovnom intervalu. Na osnovu vrednosti prikazanih u Tabeli 4.4 može se videti da taktika sekvenciranja A/D daje manja prosečna kašnjenja vazduhoplova za veći protok sistema (A/D taktika: prosečno kašnjenje po opsluženom vazduhoplovu je 2,84 min i 46,83 opsluženih vazduhoplova;

AP taktika: prosečno kašnjenje po opsluženom vazduhoplovu je 4,39 min i 39,17 opsluženih vazduhoplova).

Tabela 4.4. Kašnjenja vazduhoplova - Scenario 1 vs. Scenario 2

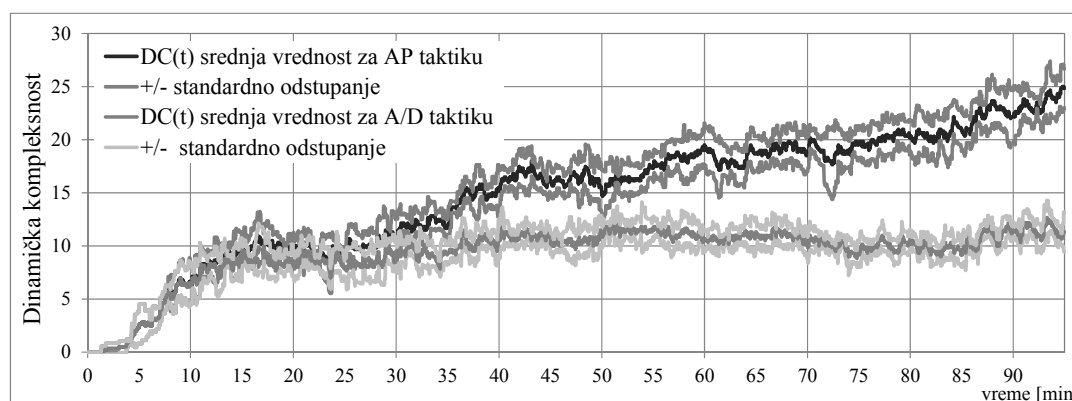
ATC taktike/ Scenario	Tip operacije	Prosečan broj opsluženih a/c u 1. satu	Prosečno ukupno kašnjenje a/c opsluženih u 1. satu	Prosečno kašnjenje po a/c opsluženom u 1. satu	Prosečan broj a/c koji su ušli u sistem u 1. satu	Prosečno ukupno kašnjenje a/c koji su ušli u sistem u 1. satu	Prosečno kašnjenje po a/c koji je ušao u sistem u 1. satu
AP Scenario 1	ukupno	39,17	172 min	4,39 min	56,33	551 min	9,78 min
	sletanja	24,33	14 min	0,58 min	28,17	17 min	0,60 min
	poletanja	14,83	158 min	10,64 min	28,17	534 min	18,96 min
A/D Scenario 2	ukupno	46,83	133 min	2,84 min	56,33	183 min	3,25 min
	sletanja	24,00	43 min	1,79 min	28,17	56 min	1,99 min
	poletanja	22,83	89 min	3,90 min	28,17	127 min	4,51 min

Na slici 4.3 prikazane su vrednosti prosečne dužine reda vazduhoplova u poletanju za oba scenarija. Sa date slike i na osnovu vrednosti iz Tabele 4.4 može se videti da sistem u slučaju primene AP taktike postaje zasićen: red u poletanju stalno raste i dostiže vrednost od čak 16 vazduhoplova, sa prosečnim kašnjenjem vazduhoplova (u poletanju) od 19 minuta, dok se u slučaju A/D taktike u redu za poletanje nalazi do 4 vazduhoplova, sa prosečnim kašnjenjem po vazduhoplovu (u poletanju) od 4,5 minuta.



Slika 4.3. Prosečna dužina reda u poletanju – Scenario 1 vs. Scenario 2

Poređenje vrednosti Dinamičke kompleksnosti ( $DC$ ) dobijenih za oba scenarija prikazano je na slici 4.4 (prosečne vrednosti  $DC \pm$  standardno odstupanje). U slučaju Scenarija 1 vrednost  $DC$  stalno raste, dok je u slučaju Scenarija 2, nakon rasta na početku posmatranog perioda (sistem je na početku posmatranog perioda prazan), vrednost  $DC$  praktično konstantna i manja u odnosu na vrednosti u Scenariju 1.

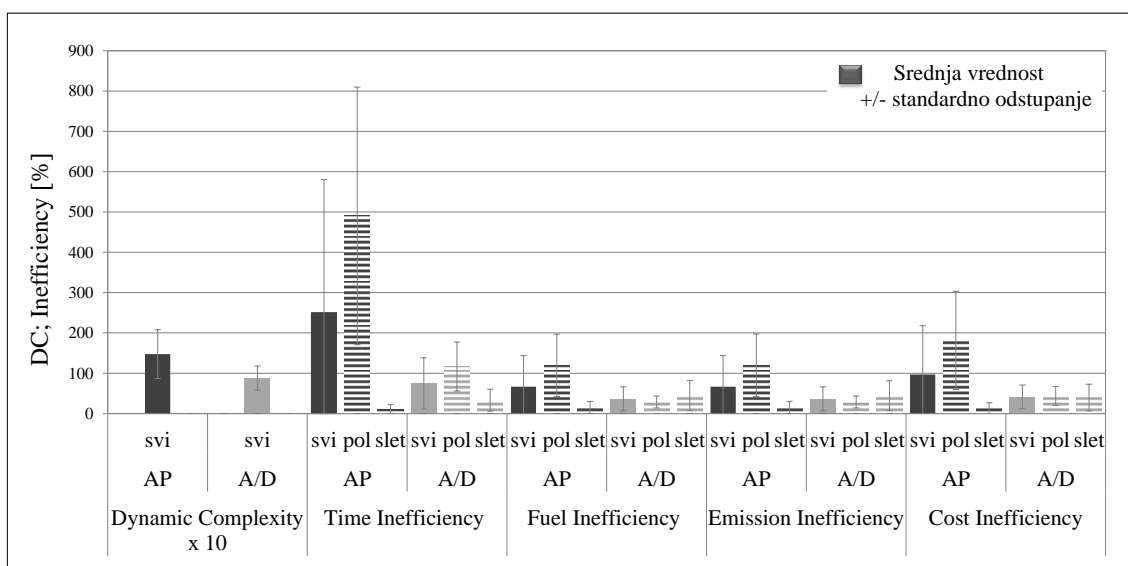


Slika 4.4. Vrednosti  $DC(t)$  – Scenario 1 vs. Scenario 2

Na slici 4.5 dat je uporedni prikaz vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti, dobijenih za Scenarije 1 i 2. Prikazane vrednosti za  $DC$  predstavljaju srednje vrednosti (i standardno odstupanje)  $DC$  tokom posmatranog vremenskog intervala, za sve iteracije određenog scenarija. Vrednosti  $DC$  su date kao apsolutne vrednosti, uvećane 10 puta kako bi se lakše poredile sa vrednostima mera neefikasnosti. Vrednosti mera neefikasnosti su određene za svaki vazduhoplov posebno, zatim su određene srednje vrednosti i standardno odstupanje za sve posmatrane vazduhoplove (koji su ušli u sistem u toku jednog sata), kao i posebno za vazduhoplove u poletanju i sletanju, a na kraju su izračunate i srednje vrednosti i standardno odstupanje za svih 6 iteracija simulacije (vrednosti su prikazane u procentima).

Sa Slike 4.5 vidi se da su razlike u kompleksnosti saobraćaja, kao i u neefikasnosti za dve prikazane taktike značajne. Naime, u Scenariju 2 (A/D taktika) u poređenju sa Scenariom 1 (AP taktika), posmatrano za sve vazduhoplove, dobijene su niže vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti -  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$  (na slici 4.5 označene sa **svi**). Takođe, za AP taktiku, vremenska neefikasnost vazduhoplova u poletanju ima visoku vrednost, koja je dosta veća od vremenske neefikasnosti vazduhoplova u sletanju, što se moglo i

očekivati (oko 98% *TI* „pripada” poletanjima, a približno 2% sletanjima). Za A/D taktiku, vremenska neefikasnost poletanja je i dalje veća od neefikasnosti sletanja, ali razlika je manja (oko 78% *TI* „pripada” poletanjima, a približno 22% sletanjima). Ovakva raspodela između vremenske neefikasnost poletanja i sletanja posledica je, u najvećoj meri, primenjene taktike upravljanja saobraćajem, ali određeni uticaj ima i ukupno vreme koje poletanja i sletanja provode u sistemu. Naime, poletanja u sistemu provedu (bez kašnjenja) od 192 s do 321 s (u zavisnosti od gejta sa kog vazduhoplov kreće), dok sletanja u sistemu provedu između 285 s i 440 s (u zavisnosti od izlaznice sa poletno-sletne staze koju koriste nakon sletanja i određižnog gejta). Samim tim, ista vrednost kašnjenja vazduhoplova daje veće vrednosti *TI* za poletanja nego za sletanja.



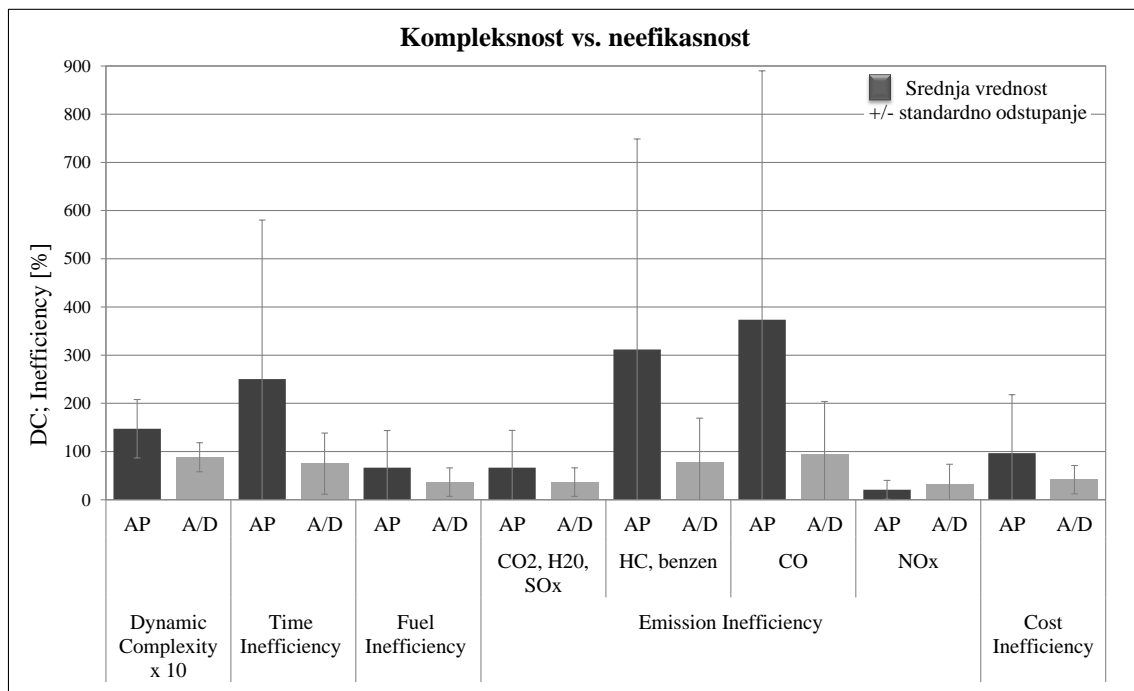
Slika 4.5. Vrednosti DC i neefikasnosti – Scenario 1 vs. Scenario 2

Doprinos ukupnoj neefikasnosti potrošnje goriva i emisije gasova (*FI* i *EI*) poletanja i sletanja je sledeći: za AP taktiku, odnos je oko 90% : 10%, dok je za A/D taktiku taj odnos 40% : 60%, što je i očekivano (sletanja su u A/D taktici neefikasnija, s obzirom na veći nivo potrošnje goriva i odgovarajuće emisije gasova u odnosu na poletanja). Međutim, ukupna *EI* prikazana na Slici 4.5 ne daje potpunu informaciju o neefikasnosti emisije. Naime, svi (razmatrani) emitovani gasovi su sabrani i *EI* je određena za ukupnu emisiju (količinu emitovanih zagađivača). Pošto CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O imaju najveći udeo u ukupnoj emisiji zagađivača, i direktno su zavisni od potrošenog goriva, dobijene vrednosti ukupne *EI* su veoma slične vrednostima *FI* (Slika 4.5) Da bi se dobila potpuna

informacija o *EI*, vrednosti *EI* prikazane su posebno za različite gasove, za sve vazduhoplove (Slika 4.6), kao i posebno za poletanja (Slika 4.7) i sletanja (Slika 4.8). U određenim slučajevima (u zavisnosti od ciljeva analiza koje se rade), samo na ovaj način se može uspostaviti „prava” međuzavisnost između *TI*, *FI* i *EI* i doneti odgovarajući zaključci.

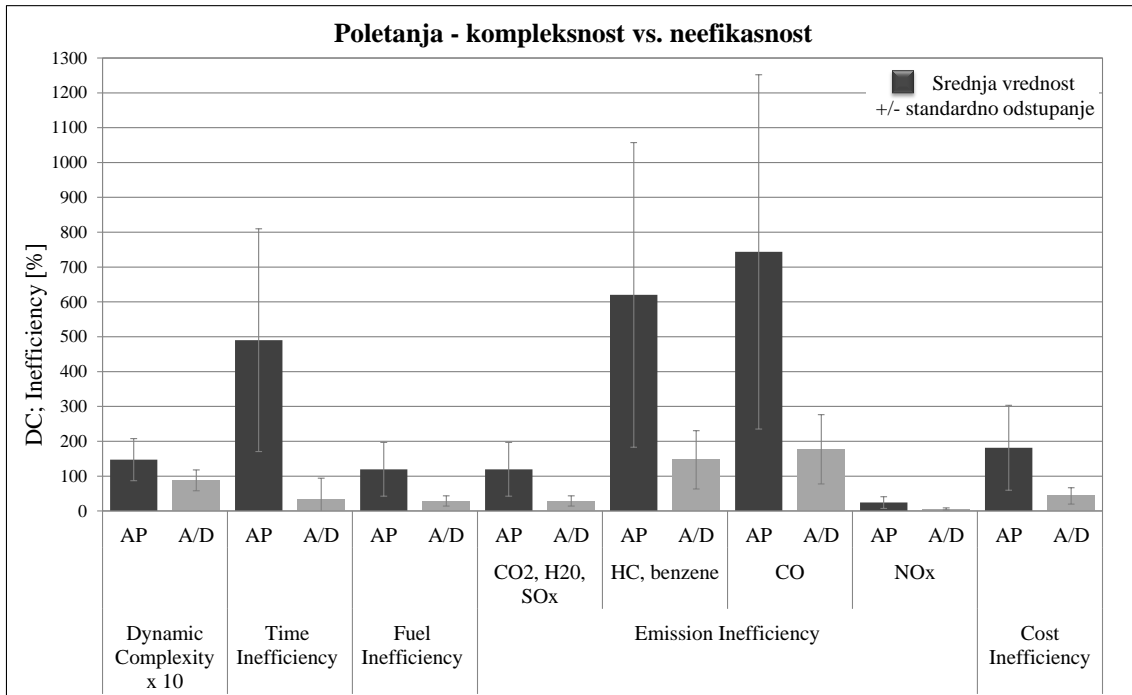
Sa slika 4.6 do 4.8 vidi se da je *FI* zavisna od *TI* (povećanje *TI* dovodi do povećanja *FI* i obrnuto) i da je *EI* na sličan način zavisna od *FI*, ali ova zavisnost nije ista za sve gasove tj:

- ♦ Neefikasnosti emisije za CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>x</sub> direktno je zavisna od *FI* (posmatrano za sve vazduhoplove zajedno, kao i posebno za poletanja i sletanja). Posmatrano za sve vazduhoplove (Slika 4.6), kao i za poletanja (Slika 4.7) neefikasnost emisije navedenih gasova je manja u slučaju primene A/D taktike, dok je za sletanja (Slika 4.8) *EI* za date gasove veća u slučaju primene iste taktike, u odnosu na vrednosti dobijene primenom AP taktike (usled povećanja kašnjenja i *FI* vazduhoplova u sletanju);

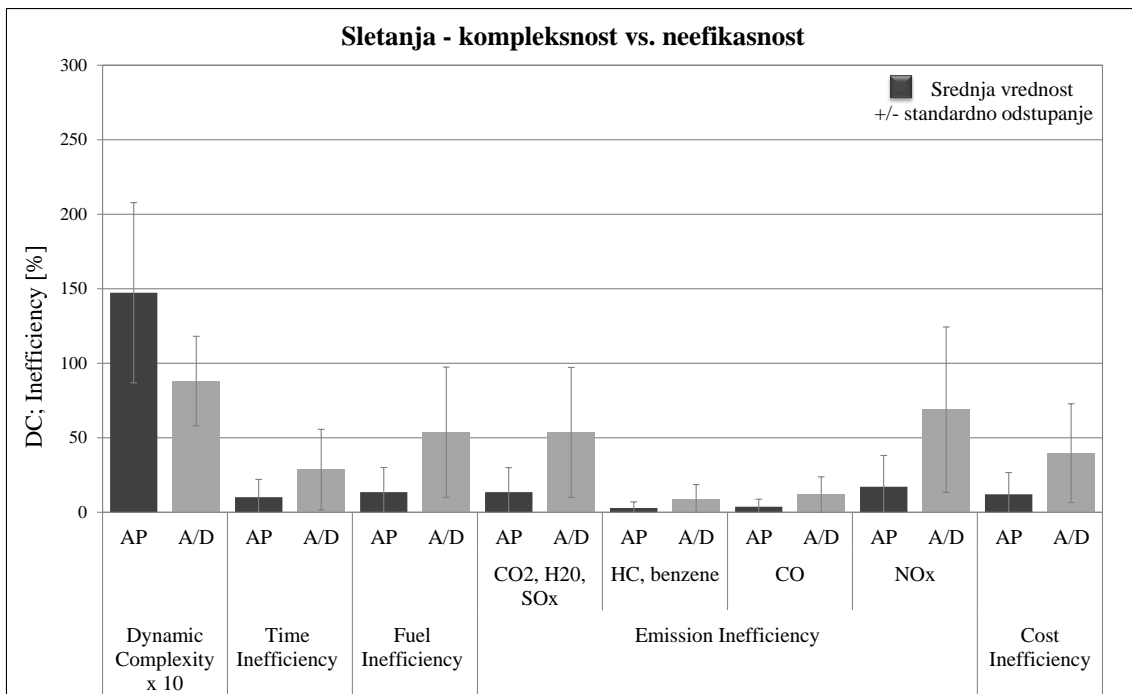


Slika 4.6. Vrednosti DC i neefikasnosti sa detaljnim prikazom *EI*

– Scenario 1 vs. Scenario 2



Slika 4.7. Vrednosti DC i neefikasnosti za poletanja sa detaljnim prikazom *EI*  
– Scenario 1 vs. Scenario 2



Slika 4.8. Vrednosti DC i neefikasnosti za sletanja sa detaljnim prikazom *EI*  
– Scenario 1 vs. Scenario 2

- ♦ Vrednosti neefikasnosti emisije HC, benzena i CO su veoma zavisne od vremena koje vazduhoplov provede u taksiranju i/ili čekanju na rulnim stazama (sa startovanim motorima) jer je emisija ovih gasova ekstremno visoka tokom navedih faza leta. U posmatranim scenarijima, kašnjenja na zemlji su uglavom generisana od strane vazduhoplova u poletanju, tako da *EI* za date gasove najviše zavisi od *TI* poletanja. Posmatrano za sve vazduhoplove i za sva poletanja, *EI* za ove gasove je značajno veća za AP taktiku (Slike 4.6 i 4.7), dok je za sletanja nešto viša za A/D taktiku (Slika 4.8);
- ♦ Vrednost neefikasnosti emisije za NO<sub>x</sub>, posmatrano za sve vazduhoplove (Slika 4.6) je nešto viša za A/D taktiku (u poređenju sa AP taktikom), značajno viša za istu taktiku ukoliko posmatramo samo sletanja (Slika 4.8), a nešto niža posmatrano za poletanja (Slika 4.7). Naime, emisija NO<sub>x</sub> je najviša tokom penjanja nakon poletanja, zatim tokom poletanja, značajno je niža tokom prilaza, sletanja i čekanja u vazduhu, a najniža je tokom taksiranja i čekanja na zemlji. S obzirom da tokom započinjanja poletanja i faze penjanja nema kašnjenja vazduhoplova, veće ukupno kašnjenje sletanja (u vazduhu) u slučaju primene A/D taktike (u odnosu na AP taktiku) uticalo je na dobijanje gore pomenutih rezultata.

Učešće troškovne neefikasnosti poletanja i sletanja u ukupnoj *CI* je slično kao i za *TI*: za AP taktiku, učešće poletanja i sletanja je oko 95% : 5%, dok je za A/D taktiku taj odnos 52% : 48%. Analizom prikazanih vrednosti na slikama 4.6 do 4.8 može se uočiti jedan od glavnih uzroka dobijanja određenih *CI* vrednosti u Scenariju 1 i Scenariju 2. Naime, usled visokih vrednosti *TI* za poletanja u slučaju primene AP taktike veoma su visoke i vrednosti *EI* za gasove čija je emisija visoka u fazama taksiranja i čekanja na rulnim stazama, pa su i troškovi emisije veći u odnosu na iste troškove za A/D taktiku. Pri tome, naročito je značajan uticaj povećanja neefikasnosti emisije HC, koji ima visoku cenu emisije (Poglavlje 3.2.2, Tabela 3.1). Pored toga, usled veće *TI* za AP taktiku i troškovi buke su veći (za istu taktiku) nego za A/D taktiku (Poglavlje 3.2.2, Tabela 3.2).

Analiza međusobne zavisnosti između „veličina“ promena vrednosti  $DC$  i vrednosti  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ , čiji prikaz sledi, izvršena je sa ciljem da se ustanovi da li se na osnovu „veličine“ promene dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, koja nastaje kao rezultat primene različitih načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja u Eksperimentu A, mogu oceniti i „veličine“ promena u efikasnosti obavljanja saobraćaja (sa aspekta odabranih mera neefikasnosti).

Na slikama 4.9 do 4.11 prikazane su promene vrednosti razmatranih mera neefikasnosti u zavisnosti od promene vrednosti  $DC$ . Promene vrednosti određenog indikatora su određene kao odnos vrednosti  $DC$ , odnosno mere neefikasnosti, dobijenih u Scenariju 1 i odgovarajućih vrednosti za Scenario 2 (na slikama označeno kao  $\Delta DC$ ,  $\Delta TI$ ,  $\Delta FI$  ( $\Delta EI$ ),  $\Delta CI$ ). Pri tome, razmatrane su promene vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti koje nastaju prilikom promene taktike upravljanja (sa taktike sekvenciranja vazduhoplova AP prelazi se na taktiku sekvenciranja A/D), za svih 6 iteracija simulacije posebno, i te promene su na datim graficima prikazane tačkama. Vrednost odnosa veća od 1 ukazuje na smanjenje vrednosti određenog indikatora promenom taktike kontrole letenja, dok vrednost manja od 1 ukazuje na povećanje vrednosti datog indikatora. „Kosa linija“ povučena na grafiku predstavlja liniju istog odnosa promene  $DC$  i određene mere neefikasnosti, za promenu taktike upravljanja od strane kontrole letenja.

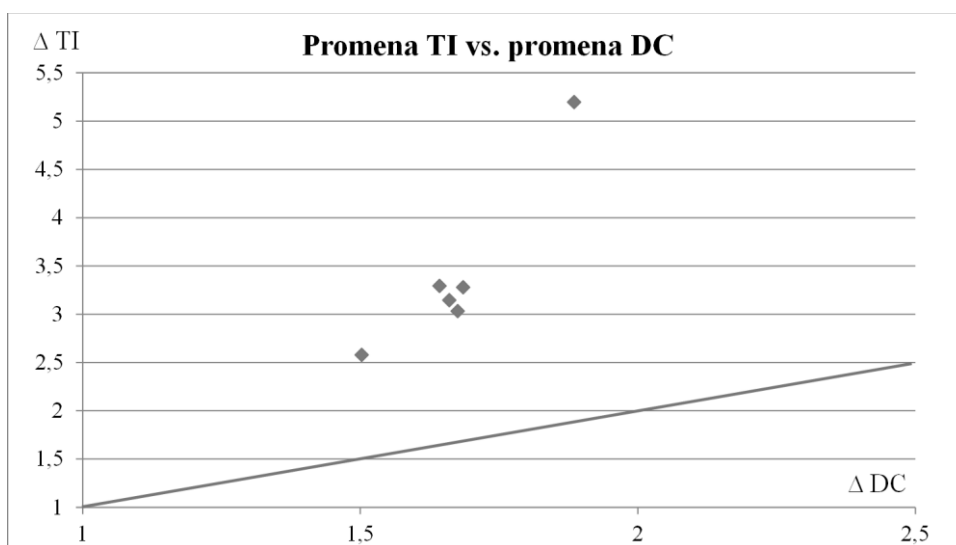
Sa slike 4.9 vidi se da promenu vrednosti  $DC$  prati promena vrednosti  $TI$ , tj. ako se prilikom promene taktike sekvenciranja vazduhoplova smanjuje  $DC$  smanjuje se i  $TI$  (sve dobijene vrednosti promena veće su od 1). Takođe se vidi da je promena  $TI$  veća od promene  $DC$ , jer su sve tačke iznad linije koja označava isti odnos vrednosti  $DC$  i  $TI$ , za dve različite taktike. Tako npr. smanjenje  $DC$  za 1,7 puta dovodi do smanjenja  $TI$  za oko 3,2 puta.

Sa slike 4.10 vidi se da promenu vrednosti  $DC$  prati promena vrednosti  $EI$  i  $FI$ , tj. ako se prilikom promene taktike sekvenciranja vazduhoplova smanjuje  $DC$  smanjuju se i  $EI$  i  $FI$ . Takođe se vidi da je promena  $FI$  i  $EI$  skoro ista ili nešto veća od promene  $DC$ , pošto su sve tačke (sem jedne) na ili iznad linije koja označava istu vrednost promene

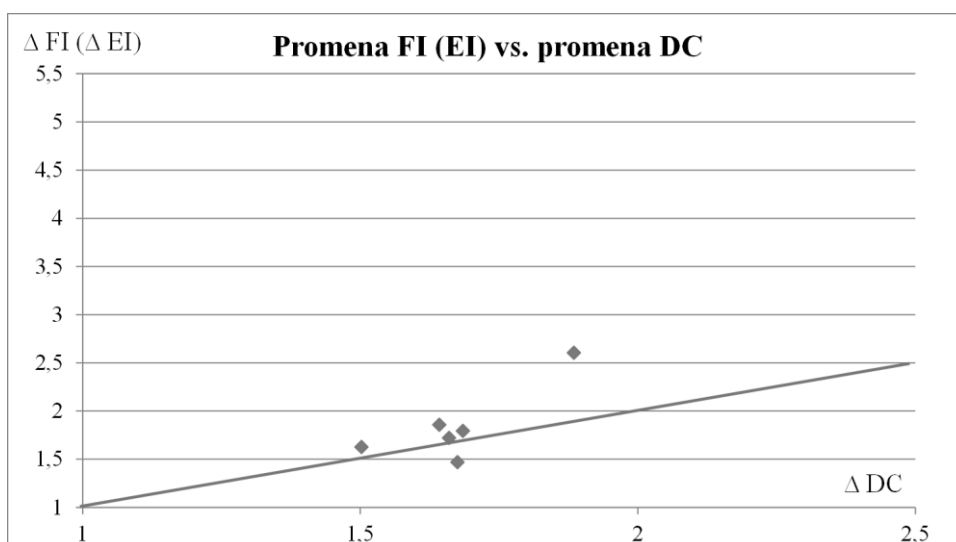


*DC* i *FI (EI)*. Tako npr. smanjenje *DC* za 1,7 puta dovodi do smanjenja *FI (EI)* za oko 1,8 puta.

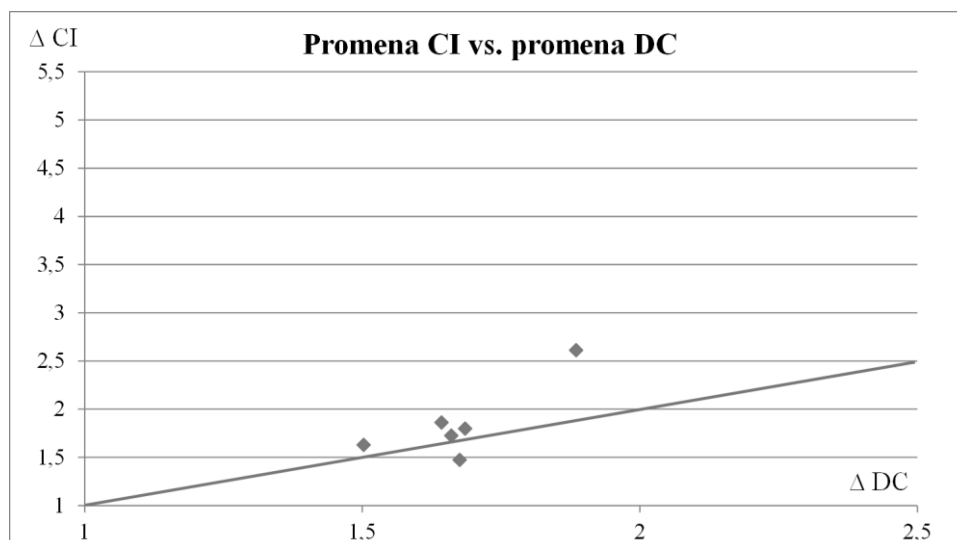
Sa slike 4.11 vidi se da promenu vrednosti *DC* prati promena vrednosti *CI*, tj. ako se prilikom promene taktike sekvenciranja vazduhoplova smanjuje *DC* smanjuje se i *CI*. Takođe se vidi da je promena *CI* skoro ista ili veća od promene *DC* jer su sve tačke (osim jedne) iznad linije koja označava istu vrednost promene *DC* i *CI*. Tako npr. smanjenje *DC* za 1,7 puta dovodi do smanjenja *CI* za oko 1,8 puta.



Slika 4.9. Promena TI vs. promena DC – Scenario 1 vs. Scenario 2



Slika 4.10. Promena FI (EI) vs. promena DC – Scenario 1 vs. Scenario 2



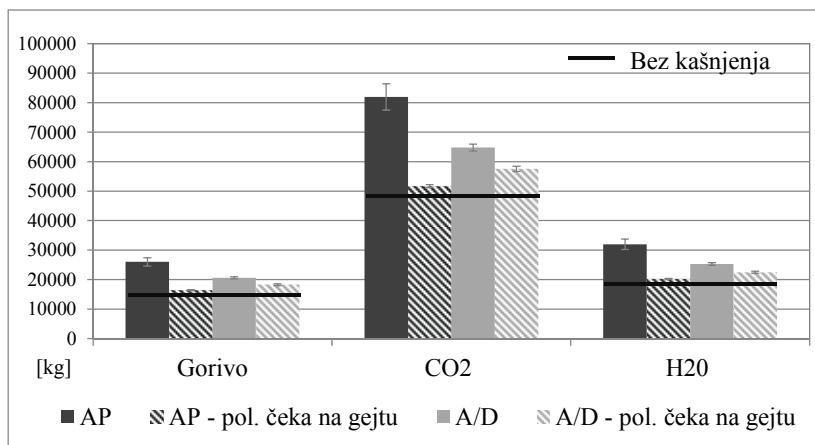
Slika 4.11. Promena CI vs. promena DC – Scenario 1 vs Scenario 2

Razmatran je i slučaj kada vazduhoplovi kojima je dodeljeno kašnjenje u poletanju čekaju na gejtju, sa ugašenim motorima. Naime, za vazduhoplove u poletanju kojima je dodeljeno određeno kašnjenje (na osnovu primenjene taktike sekvenciranja) postoji, pod određenim uslovima, mogućnost čekanja na samom gejtju (parking poziciji) sa ugašenim motorima, umesto na rulnoj stazi u redu (na poziciji za čekanje na poletanje) sa startovanim motorima. Na taj način može se smanjiti potrošnja goriva i emisija gasova. Takođe, veoma je važno naglasiti da se ova taktika može primeniti samo ukoliko vazduhoplov može dodatno da se zadrži na parking poziciji. Pošto se potreba za primenom pomenute taktike uglavnom javlja u vršnim periodima, kada je i potražnja za parking pozicijama najveća, vazduhoplovi često moraju napustiti parking poziciju unutar određenog vremenskog intervala.

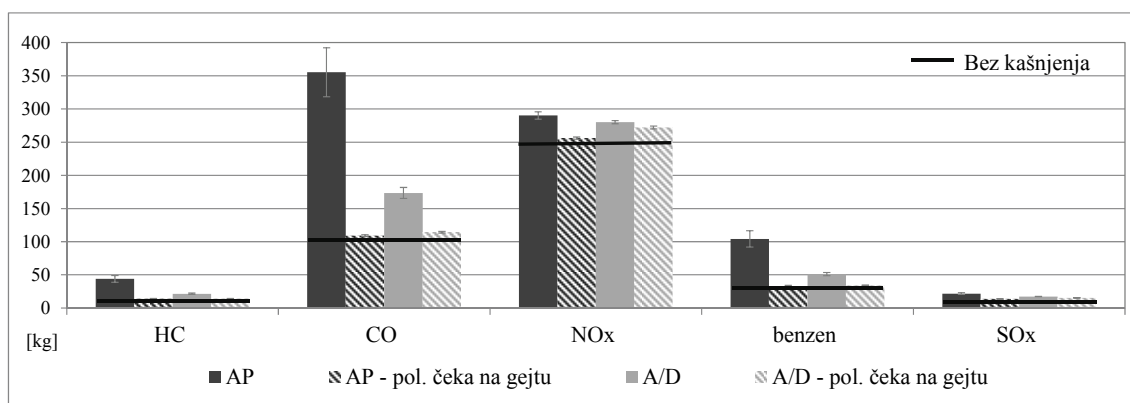
Uz pretpostavku da vazduhoplovi u poletanju mogu kašnjenje da realizuju na gejtju, izvršene su određene analize potrošnje goriva i emisije gasova i dobijeni rezultati su prikazani na slikama 4.12 i 4.13. Na datim slikama prikazani su ukupno potrošeno gorivo i emisija gasova (prosečne vrednosti  $\pm$  standardano odstupanje; vrednosti dobijene na osnovu 6 iteracija). Takođe, na ovim slikama su prikazane i vrednosti potrošnje goriva i emisije gasova koje bi se dobile kada bi vazduhoplov prošao kroz sistem bez kašnjenja (kao da je sam u sistemu; vrednosti su predstavljene horizontalnom

crnom linijom unutar stubića), kao i vrednosti (za obe ATC taktike) kada vazduhoplovi u poletanju kašnjenje realizuju na gejtju (šrafirani stubići).

Sa slika 4.12 i 4.13 može se videti da su efekti čekanja vazduhoplova u poletanju na gejtju veoma značajni u slučaju primene AP taktike sekvenciranja, sa aspekta potrošnje goriva i emisije gasova. Najznačajnije smanjenje je za emisiju CO, HC i benzena (oko 70%; usled ekstremno visokog nivoa emisije tokom taksiranja/čekanja na rulnim stazama). Takođe veoma su značajna i smanjenja ukupno potrošenog goriva i emisije CO<sub>2</sub>, vodene pare i SO<sub>x</sub> (skoro 40% smanjenja). Za A/D taktiku smanjenje ukupno potrošenog goriva i emisije određenih gasova je manje, s obzirom da su kašnjenja poletanja manja (u odnosu na AP taktiku).



Slika 4.12. Potrošeno gorivo i emisija gasova - različite ATC taktike



Slika 4.13. Emisija gasova - različite ATC taktike

Na osnovu prikazanih rezultata i izvršenih analiza u Eksperimentu A, za Scenarije 1 i 2, može se zaključiti sledeće:

- ◆ U uslovima kada postoji stalna potražnja za poletanjima i sletanjima vazduhoplova, postoji značajna razlika između performansi sistema za dve razmatrane taktike. Naime, A/D taktika, u poređenju sa AP taktikom, omogućava veću efikasnost sistema: manja kašnjenja i veći broj opsluženih vazduhoplova u jednočasovnom intervalu, manji red vazduhoplova koji čekaju na poletanje, niže vrednosti dinamičke kompleksnosti i niže prosečne vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti -  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ ;
- ◆ Između dobijenih vrednosti  $DC$  i vrednosti razmatranih mera neefikasnosti:  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$  (definisanih na način prikazan u Poglavlju 3), postoji sledeća međusobna jednoznačna\* zavisnost: manjim vrednostima  $DC$  odgovaraju i manje vrednosti mera neefikasnosti i obrnuto. Ovakva zavisnost važi ukoliko posmatramo sve vazduhoplove zajedno. Posmatrano posebno za poletanja i sletanja, kao i za  $EI$  za pojedinačne gasove, ova zavisnost nije uvek jednoznačna;
- ◆ Posmatrano za sve vazduhoplove, između promene vrednosti  $DC$  i promena vrednosti mera neefikasnosti, nastalih usled promene taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, postoji međusobna jednoznačna zavisnost, tj. smanjenje vrednosti  $DC$  dovodi i do smanjenja svih mera neefikasnosti, pri čemu su smanjenja mera neefikasnosti veća ili skoro jednaka smanjenju  $DC$ ;
- ◆ Između pojedinih mera neefikasnosti postoji međusobna zavisnost i to:
  - $FI$  direktno zavisi od  $TI$ : povećanje  $TI$  dovodi do povećanja  $FI$  i obrnuto, pri čemu je veoma značajno koliko je udeo vremenske neefikasnosti poletanja odnosno sletanja u ukupnoj vremenskoj neefikasnosti (što je veći udeo  $TI$  sletanja veća je i  $FI$ ),

---

\* Pod jednoznačnom zavisnošću podrazumeva se da su sve promene u istom „smeru“, tj. ukoliko raste (ili se smanjuje) vrednost jednog od posmatranih indikatora, rastu (odnosno smanjuju se) i vrednosti ostalih indikatora.

- Ukupna *EI* direktno zavisi od *FI*,
- *EI* za CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>x</sub> direktno je zavisna od *FI*,
- *EI* za HC, benzen i CO najviše zavisi od *TI* (naročito od *TI* generisane u taksiranju i/ili čekanju na rulnim stazama),
- *EI* za NO<sub>x</sub> najviše zavisi od *TI* sletanja, tj. od *FI* sletanja,
- *CI* direktno zavisi od *TI*,

što su i očekivani rezultati;

- ◆ Primenom taktike realizacije kašnjenja vazduhoplova u poletanju na gejtovima (sa ugašenim motorima), smanjenja potrošnje goriva i emisije gasova su veoma značajna, a naročito u slučaju Scenarija 1 tj. u slučaju primene AP taktike sekvenciranja (što se moglo i očekivati).

Na osnovu napred iznetog može se zaključiti da je u Eksperimentu A taktika A/D bolja od taktike AP, kako po pitanju vrednosti *DC* tako i po pitanju vrednosti mera neefikasnosti, a samim tim i sa aspekta odživosti aerodroma.

#### 4.4.2 Strateške i taktičke ATM mere - Eksperiment B

U Eksperimentu B analizirani su Scenariji 2B, 3 i 4 (Poglavlje 4.2.2, Poglavlje 4.3), sa prognoziranim intenzitetom saobraćaja koji će u sistemu (aerodrom sa jednom PSS) dovesti do još većih zagušenja (u odnosu na Eksperiment A; dugoročna prognoza saobraćaja u kojoj se predviđa još veći porast intenziteta saobraćaja u odnosu na intenzitet saobraćaja u Eksperimentu A). Pretpostavljeni intenzitet saobraćaja u Eksperimentu B je takav da se mogu očekivati zagušenja i u sistemu sa 2 PSS. Naime, cilj je, između ostalog, bio i da se ispituju različite interakcije vazduhoplova u uslovima stalne potražnje tj. u uslovima kada se u sistemu nalazi veliki broj vazduhoplova (zauzete PSS i određeni broj vazduhoplova koji se nalazi na rulnim stazama). Ovaj eksperiment i dati scenariji razmatrani su kako bi se analizirao uticaj primene određenih strateških mera (na primer izgradnja nove PSS), kao i taktičkih mera upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, na vrednosti *DC* i vrednosti predloženih mera neefikasnosti.

Slučaj sa dve poletno-sletne staze i taktikom kontrole letenja pri kojoj se unutrašnja PSS koristi za mešovite operacije je odabran sa idejom da se poveća protok spoljašnje PSS. Kao što je već rečeno u Poglavlju 4.2.2, uz pretpostavku da se spoljašnja PSS koristi samo za sletanja iz grupe *large* vazduhoplova (*heavy* vazduhoplovi sleću na unutrašnju PSS), razdvajanje između vazduhoplova koji koriste istu PSS u sletanju je unificirano i smanjeno (u poređenju sa slučajem kada istu stazu koriste obe grupe vazduhoplova: *large* i *heavy*). Protok unutrašnje PSS za poletanja biće nešto manji (u odnosu na taktiku: odvojene operacije poletanja i sletanja), jer je učešće *heavy* sletanja 25% u ukupnom broju sletanja. Za stazu sa mešovitim operacijama korišćena je taktika „sletanja imaju prioritet” tj. AP taktika sekvenciranja.

U Tabeli 4.5 prikazane su vrednosti prosečnog broja opsluženih vazduhoplova, prosečnog ukupnog kašnjenja i kašnjenja po vazduhoplovu, dobijene za tri pomenuta scenarija: Scenario 2B tj. slučaj aerodroma sa jednom PSS (za taktiku sekvenciranja sletanja-poletanja tj. A/D) i dva slučaja za aerodrom sa dve paralelne PSS za dve različite ATC taktike: Scenario 3 - odvojene operacije poletanja i sletanja, kada se jedna

PSS koristi isključivo za sletanja (spoljašnja PSS), a druga (unutrašnja PSS) za poletanja i Scenario 4 - mešovite operacije, kada se jedna staza koristi isključivo za sletanja (spoljašnja PSS), a druga (unutrašnja PSS) i za sletanja i za poletanja.

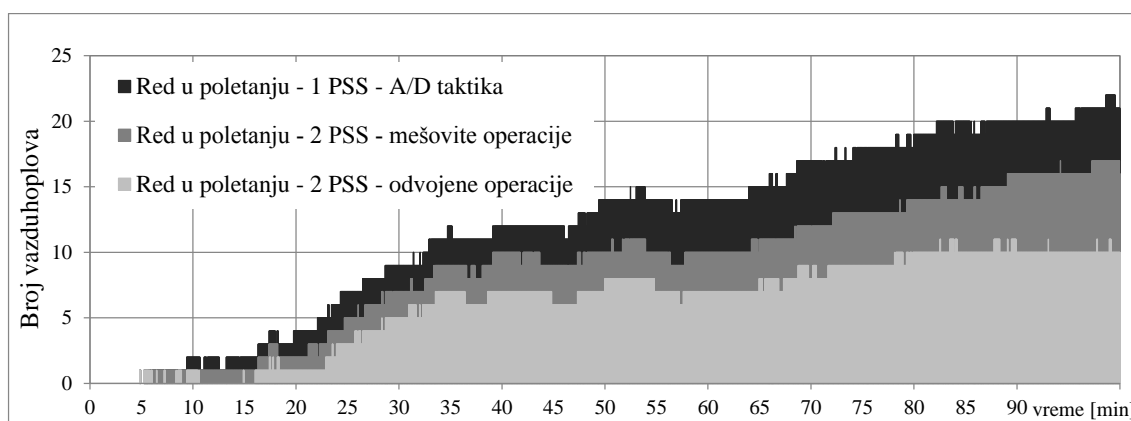
Kao i u Eksperimentu A, prikazane su vrednosti za sve posmatrane vazduhoplove koji su ušli u sistem u toku jednog sata, kao i vrednosti za vazduhoplove koji su opsluženi u posmatranom jednočasovnom intervalu. Sve vrednosti su dobijene iz 6 iteracija simulacije (po scenariju). Na osnovu vrednosti prikazanih u Tabeli 4.5 može se videti da su za Scenario 4 dobijena najmanja prosečna kašnjenja po opsluženom vazduhoplovu (4,94 min) sa sličnim „protokom” (59,17 opsluženih vazduhoplova) kao u Scenariju 3 (prosečno kašnjenje vazduhoplova je 5,13 min za 60 opsluženih vazduhoplova u jednom satu), dok je za Scenario 2B dobijeno najveće prosečno kašnjenje po opsluženom vazduhoplovu (9,5 min) za najmanje opsluženih vazduhoplova (48,33 opsluženih vazduhoplova u satu). Ukoliko se uzmu u obzir svi posmatrani vazduhoplovi (svi koji su ušli u sistem u 1. satu), kašnjenje po vazduhoplovu najveće je za Scenario 2B i iznosi 15,31 min, zatim za Scenario 4 gde su kašnjenja 6,74 min i najmanja kašnjenja po vazduhoplovu su dobijena u Scenariju 3 - 6,11 min.

Tabela 4.5. Kašnjenja vazduhoplova - Scenariji 2B, 3 i 4

Dizajn aeodroma/ ATC taktika	Tip operacije	Prosečan broj opsluženih a/c u 1. satu	Prosečno ukupno kašnjenje a/c opsluženih u 1. satu	Prosečno kašnjenje po a/c opsluženom u 1. satu	Prosečan broj a/c koji su ušli u sistem u 1. satu	Prosečno ukupno kašnjenje a/c koji su ušli u sistem u 1. satu	Prosečno kašnjenje po a/c koji je ušao u sistem u 1. satu
1 PSS A/D taktika	ukupno	48,33	459 min	9,50 min	81,50	1248 min	15,31 min
	sletanja	24,67	191 min	7,74 min	41,50	546 min	13,16 min
	poletanja	23,67	268 min	11,32 min	40,00	701 min	17,53 min
2 PSS odvojene operacije	ukupno	60,00	308 min	5,13 min	81,50	498 min	6,11 min
	sletanja	29,33	129 min	4,40 min	41,50	204 min	4,92 min
	poletanja	30,67	179 min	5,84 min	40,00	294 min	7,35 min
2 PSS mešovite operacije	ukupno	59,17	292 min	4,94 min	81,50	549 min	6,74 min
	sletanja	31,83	37 min	1,16 min	41,50	47 min	1,13 min
	poletanja	27,33	256 min	9,37 min	40,00	502 min	12,55 min

Na slici 4.14 prikazane su vrednosti prosečne dužine reda vazduhoplova u poletanju za sva tri scenarija. Na osnovu date slike i vrednosti datih u Tabeli 4.5, može se videti da:

- ◆ u slučaju aerodroma sa jednom PSS (Scenario 2B) red u poletanju stalno raste i dostiže vrednost od preko 20 vazduhoplova, sa prosečnim kašnjenjem svih opsluženih vazduhoplova (u poletanju) od 17,53 minuta;
- ◆ u slučaju aerodroma sa dve PSS i mešovitim operacijama (Scenario 4) red u poletanju takođe stalno raste i dostiže vrednost od 17 vazduhoplova, sa prosečnim kašnjenjem svih opsluženih vazduhoplova (u poletanju) od 12,55 minuta;
- ◆ u slučaju aerodroma sa dve PSS i odvojenim operacijama (Scenario 3), red za poletanje je, nakon početnog perioda, prilično „stabilan“ ali ipak sa velikim brojem vazduhoplova u redu (do 10 vazduhoplova), sa prosečnim kašnjenjem svih opsluženih vazduhoplova (u poletanju) od 7,35 minuta.

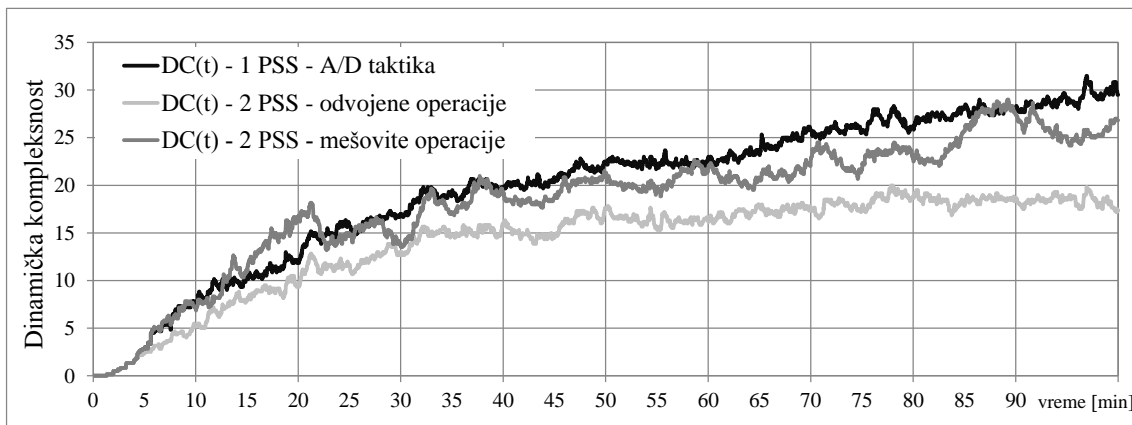


Slika 4.14. Prosečna dužina reda u poletanju – Scenariji 2B, 3 i 4

Poređenje vrednosti *DC* dobijenih za sva tri scenarija prikazano je na slici 4.15 (prikazane su samo prosečne vrednosti *DC*, bez standardnog odstupanja, kako bi razlika u vrednostima *DC* bila lakše uočljiva). U slučaju Scenarija 2B vrednost *DC* stalno raste, sa malim, postepenim promenama vrednosti tokom posmatranog vremenskog intervala. Za Scenario 4 vrednost *DC*, tokom posmatranog vremenskog intervala, takođe raste, ali su promene vrednosti *DC* veće (postoje „skokovi“, što se može objasniti primenjenom taktikom opsluge vazduhoplova: vrednost *DC* se naglo povećava odnosno smanjuje kada se pojavi zahtev za sletanje na unutrašnjoj PSS odnosno kada vazduhoplov sleti,



jer to dovodi do promene vrednosti faktora kompleksnosti  $N_{(t)}$ ). U slučaju Scenarija 3, nakon rasta na početku posmatranog perioda, vrednost  $DC$  je praktično konstantna i manja u odnosu na vrednosti u Scenarijima 2B i 4.



Slika 4.15. Vrednosti  $DC(t)$  - Scenariji 2B, 3 i 4

U pojedinim vremenskim intervalima, posebno na početku posmatranog perioda, vrednosti  $DC$  su čak nešto više u slučaju aerodroma sa dve PSS i mešovitim operacijama, u poređenju sa aerodromom sa jednom PSS. Ovakvi rezultati ukazuju na to da aerodrom sa jednom PSS i aerodrom sa dve PSS sa mešovitim operacijama (pod pretpostavljenim uslovima) generišu sličnu kompleksnost saobraćaja. Glavni „uzroci“ ovakvih rezultata su uvedena pretpostavka da gustina saobraćaja ( $TD$ ) i svi ostali predloženi faktori kompleksnosti imaju istu težinu (Poglavlje 4.2.4) i način na koji je definisana  $TD$ . Naime, kao što je navedeno u Poglavlju 3.2.1,  $TD$  predstavlja ukupan broj vazduhoplova koji se u posmatranom trenutku nalaze unutar sistema, ne računajući vazduhoplove koji čekaju na granicama sistema. Samim tim, za Scenario 4 tj. u slučaju aerodroma sa dve PSS, unutar sistema (kako je u radu definisan) se može naći veći broj vazduhoplova istovremeno, u odnosu na slučaj aerodroma sa jednom PSS, pa je i vrednost  $TD$  veća za aerodrom sa 2 PSS. Takođe, moguć je veći broj različitih „vrsta“ interakcija između vazduhoplova (npr. krosiranje unutrašnje PSS, kao veoma važna interakcija, koja povećava vrednost  $DC$ ). Sletanja imaju duže rute taksiranja (sletanja provode više vremena tokom taksiranja do gejtta, i samim tim provode više vremena u sistemu nakon sletanja) u poređenju sa sletanjima u slučaju aerodroma sa jednom PSS (što takođe ima uticaja na povećanje vrednosti  $DC$ ).

Sa druge strane, dobijeni rezultati su i intuitivno logični. Naime, pošto je u slučaju aerodroma sa dve PSS i mešovitim operacijama, jedna PSS (spoljašnja) relativno jednostavna za „kontrolisanje” (kontrolor letenja opslužuje vazduhoplove u sletanju između kojih su ista zahtevana minimalna razdvajanja, što generiše manje radno opterećenje kontrolora), dok drugu (unutrašnju) PSS koriste mešovite operacije, ali sa manjim brojem naizmeničnih operacija sletanja i poletanja (za šta se pretpostavlja da generiše veće radno opterećenje kontrolora nego posebno opsluživanje operacija sletanja i poletanja). Iz napred iznetog može se zaključiti da se dobijene vrednosti *DC* u različitim scenarijima moraju pažljivo analizirati i interpretirati.

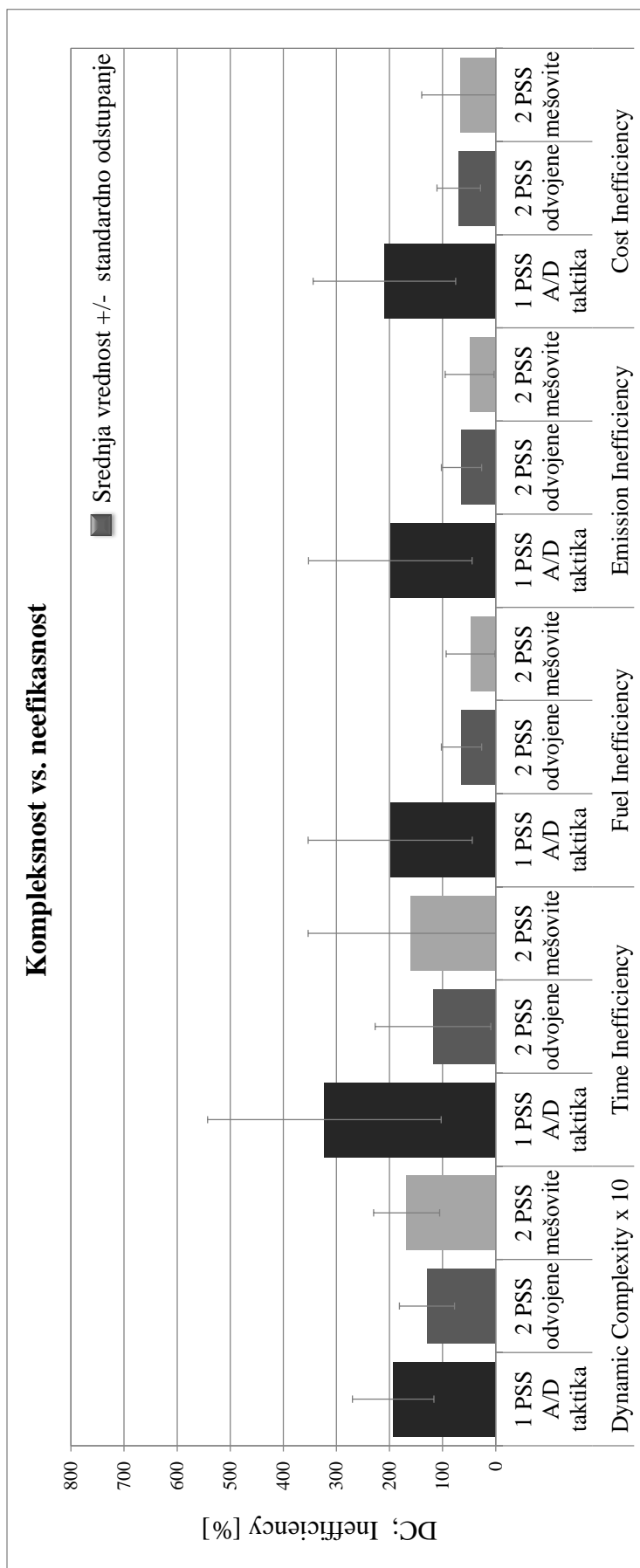
Uporedni prikaz vrednosti *DC* i mera neefikasnosti, dobijenih za Scenarije 2B, 3 i 4, dat je na slici 4.16 - za sve posmatrane vazduhoplove (sletanja i poletanja) i na slici 4.17 - za poletanja vs. sletanja. Prikazane vrednosti za *DC*, kao i vrednosti mera neefikasnosti predstavljaju srednje vrednosti (i standardno odstupanje)\* tokom posmatranog vremenskog intervala, za svih 6 iteracija simulacije određenog scenarija. Vrednosti *DC* su date kao apsolutne vrednosti, uvećane 10 puta kako bi se lakše poredile sa vrednostima mera neefikasnosti, dok su vrednosti mera neefikasnosti izražene u procentima.

Sa slika 4.16 i 4.17 može se videti da razlike u kompleksnosti saobraćaja, kao i u neefikasnosti za tri analizirana scenarija postoje, pri čemu je međusobni odnos između vrednosti pojedinih mera dobijenih za određene scenarije različit. Naime, sa slike 4.16 može se uočiti sledeće:

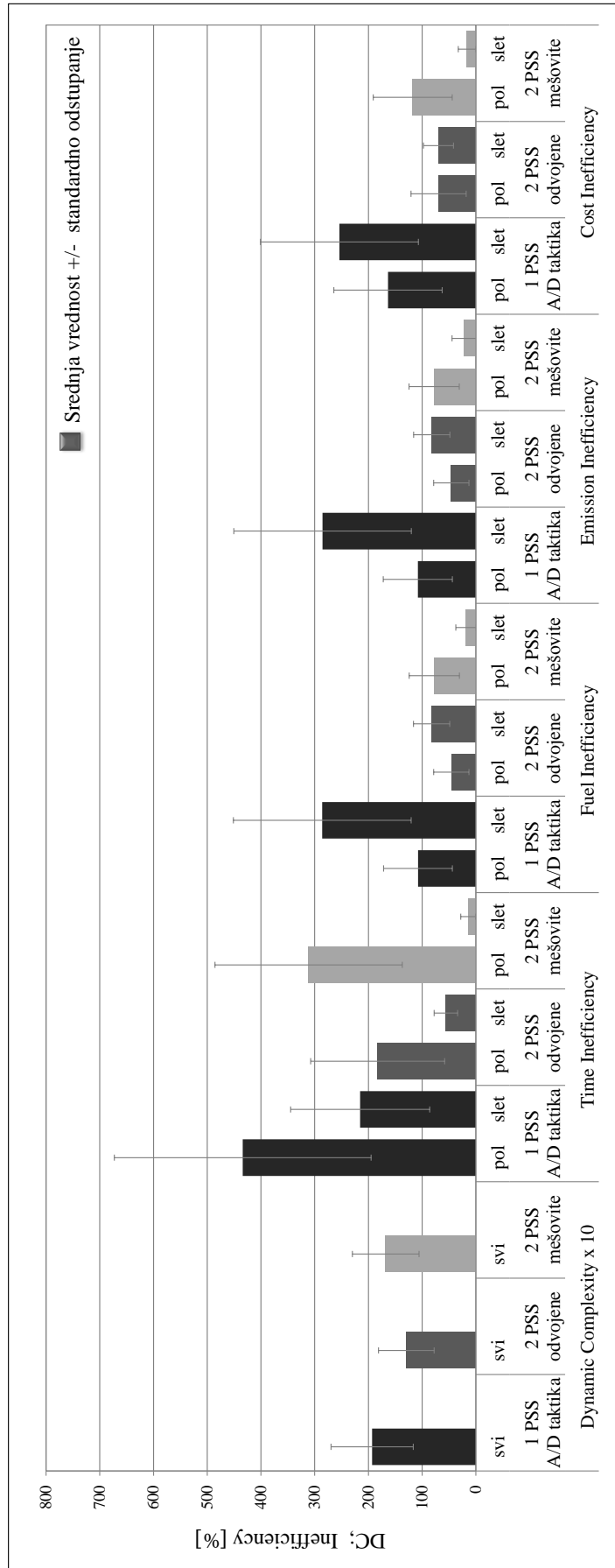
- ◆ Za Scenario 2B (1PSS) dobijene su najviše vrednosti *DC* i svih mera neefikasnosti: *TI*, *FI*, *EI* i *CI*;
- ◆ Vrednosti *DC* i *TI* su, kao što je već rečeno, najviše za Scenario 2B, nešto su niže za Scenario 4 (2 PSS, mešovite operacije) i najniže za Scenario 3 (2 PSS, odvojene operacije);

---

\* Vrednosti mera neefikasnosti su određene na isti način kao i u Eksperimentu A.



Slika 4.16. Vrednosti DC i neefikasnosti – Scenariji 2B, 3 i 4



Slika 4.17. Vrednosti DC i neefikasnosti: Poletanja vs. sletanja – Scenariji 2B, 3 i 4

- ♦ Vrednosti *FI* i *EI* su, najviše za Scenario 2B, značajno su niže za Scenario 3 i još niže za Scenario 4 (tj. najniže su u slučaju 2 PSS i mešovitim operacija, zbog najmanjeg kašnjenja sletanja);
- ♦ Vrednost *CI* je skoro jednaka za Scenarije 3 i 4,
- ♦ Sa smanjenjem *DC* smanjuje se i *TI* za sva tri scenarija i obrnuto,
- ♦ Vrednost *FI* (ili ukupne *EI*), se sa smanjenjem *DC* smanjuje (Scenario 2B vs. Scenario 3 i Scenario 2B vs. Scenario 4) ili povećava (Scenario 4 vs. Scenario 3),
- ♦ Sa smanjenjem *DC*, *CI* se smanjuje (Scenario 2B vs. Scenario 3 i Scenario 2B vs. Scenario 4) ili ostaje jednaka (Scenario 4 vs. Scenario 3).

Takođe, na osnovu uporednog prikaza vrednosti neefikasnosti za poletanja i sletanja na slici 4.17, može se zaključiti sledeće:

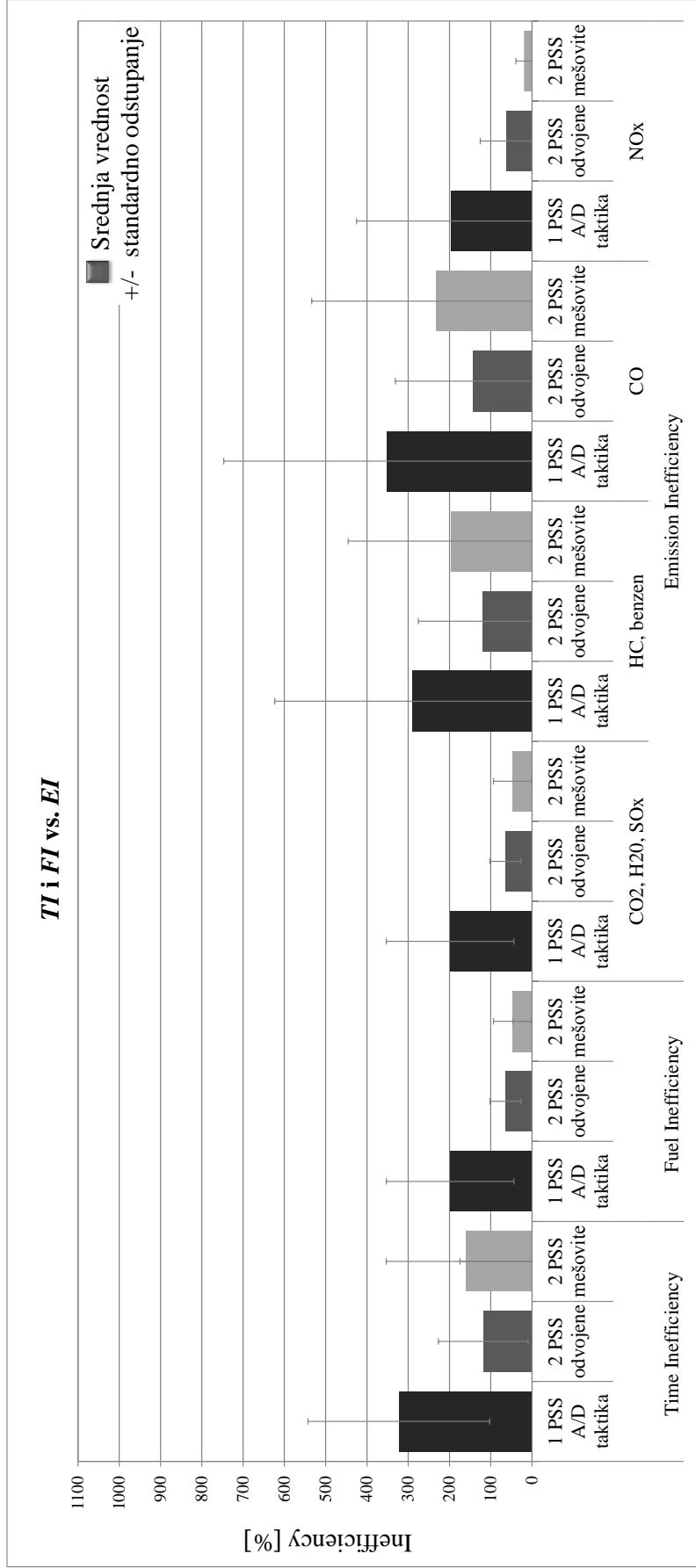
- ♦ Vremenska neefikasnost *TI* vazduhoplova u poletanju veća je od vremenske neefikasnosti vazduhoplova u sletanju za sva tri scenarija. Za Scenario 2B oko 67% *TI* „pripada” poletanjima, a približno 33% sletanjima, za Scenario 3 neefikasnost poletanja je takođe veća od neefikasnosti sletanja: skoro 77% *TI* „pripada” poletanjima, a oko 23% sletanjima, dok su za Scenario 4 kašnjenja vazduhoplova u poletanju uzrokovala oko 97% vremenske neefikasnosti, dok sletanja generišu samo 3% od ukupne vremenske neefikasnosti;
- ♦ Doprinis ukupnoj neefikasnosti potrošnje goriva i emisije gasova (*FI* i *EI*) poletanja i sletanja je sledeći: za Scenario 2B odnos je oko 27% : 73%, za Scenario 3 odnos je 36% : 64%, dok je za Scenario 4 taj odnos 81% : 19%. Ovakvo „učešće” poletanja i sletanja u neefikasnosti je i očekivano, jer su za Scenario 2B (1 PSS) i Scenario 3 kašnjenja sletanja značajna, pri čemu je i nivo potrošnje goriva i odgovarajuće emisije gasova veći u odnosu na poletanja. Za Scenario 4, *TI* poletanja je značajno veća (97%) od *TI* sletanja (3%), pa je i *FI* (odnosno *EI*) poletanja značajno veća od *FI* (*EI*) sletanja;
- ♦ Učešće troškovne neefikasnosti poletanja i sletanja u ukupnoj *CI* je sledeće: za Scenario 2B odnos je oko 39% : 61%, za Scenario 3 učešće poletanja i sletanja je skoro jednako tj. oko 50% : 50%, dok je za Scenario 4 taj odnos 89% : 11%. Može

se uočiti da je učešće troškovne neefikasnosti poletanja i sletanja u ukupnoj *CI* donekle slično učešću neefikasnosti potrošnje goriva i emisije gasova poletanja i sletanja u ukupnoj *FI* tj. *EI*.

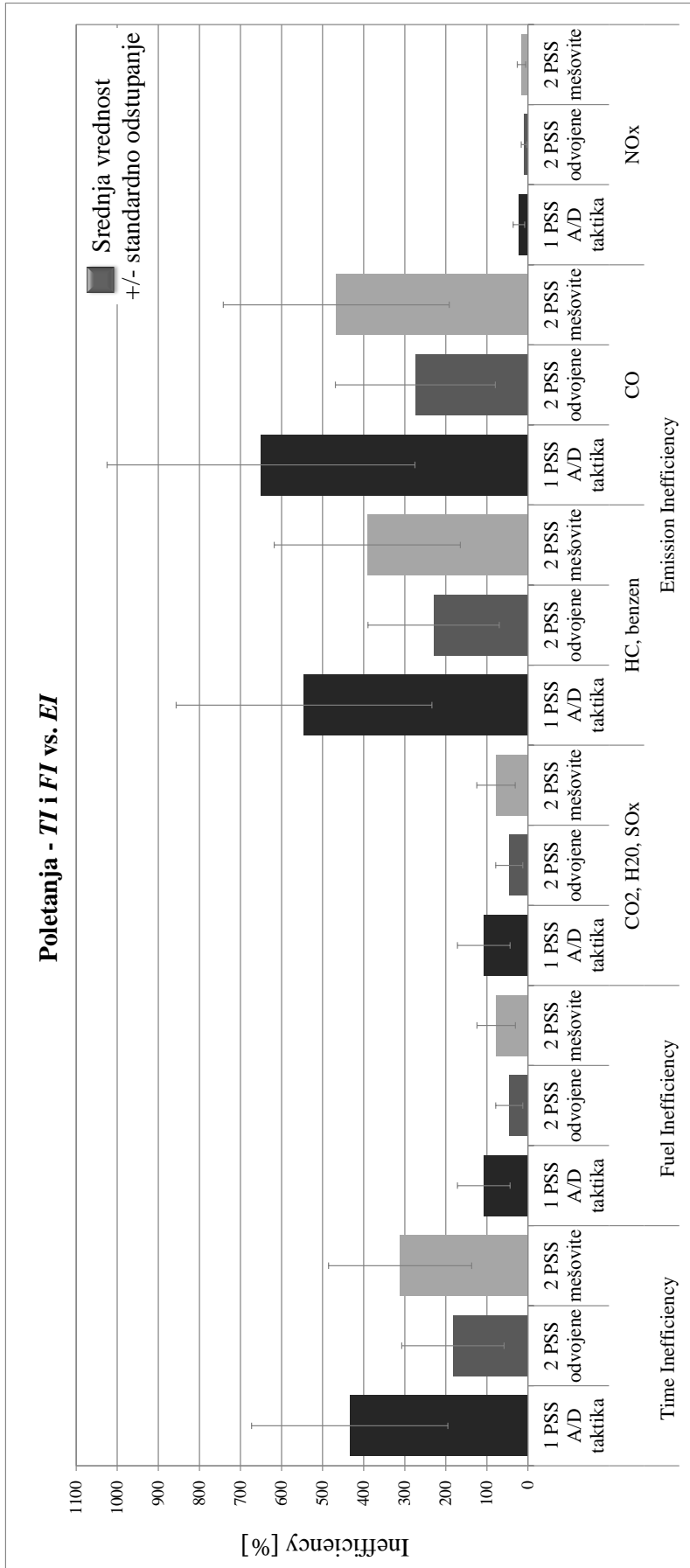
Slično kao i u Eksperimentu A, pošto ukupna *EI* ne daje potpunu informaciju o neefikasnosti emisije, vrednosti *EI* prikazane su posebno za različite gasove, za sve vazduhoplove (Slika 4.18), kao i posebno za poletanja (Slika 4.19) i sletanja (Slika 4.20).

Na osnovu slika 4.18 do 4.20 može se videti da *EI* pojedinih gasova zavisi od *TI* (smanjenje *TI* dovodi do smanjenja *EI* i obrnuto), dok *EI* ostalih gasova zavisi od *FI*, i to:

- ◆ Neefikasnosti emisije za CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>x</sub> direktno je zavisna od *FI* (posmatrano za sve vazduhoplove zajedno, kao i posebno za poletanja i sletanja). Posmatrano za sve vazduhoplove (Slika 4.18), kao i za sletanja (Slika 4.20) neefikasnost emisije navedenih gasova je najveća za Scenario 2B, značajno manja za Scenario 3 i najmanja za Scenario 4. Posmatrano za poletanja (Slika 4.19), *EI* za date gasove takođe je najveća za Scenario 2B. U slučaju Scenarija 4, *EI* ovih gasova za poletanja je veća u odnosu na vrednosti dobijene za Scenario 3 (usled većeg kašnjenja poletanja);
- ◆ Vrednosti neefikasnosti emisije HC, benzena i CO su veoma zavisne od vremena koje vazduhoplov provede u taksiranju i/ili čekanju na rulnim stazama. U posmatranim scenarijima, *EI* za date gasove najviše zavisi od *TI* poletanja. Posmatrano za sve vazduhoplove i za poletanja, *EI* ovih gasova je najveća za Scenario 2B, značajno manja za Scenario 4 i još manja (ponovo značajno) za Scenario 3, dok su za sletanja ove razlike između scenarija manje (najviše su vrednosti za Scenario 2B, nešto niže za Scenario 3 i najniže za Scenario 4);

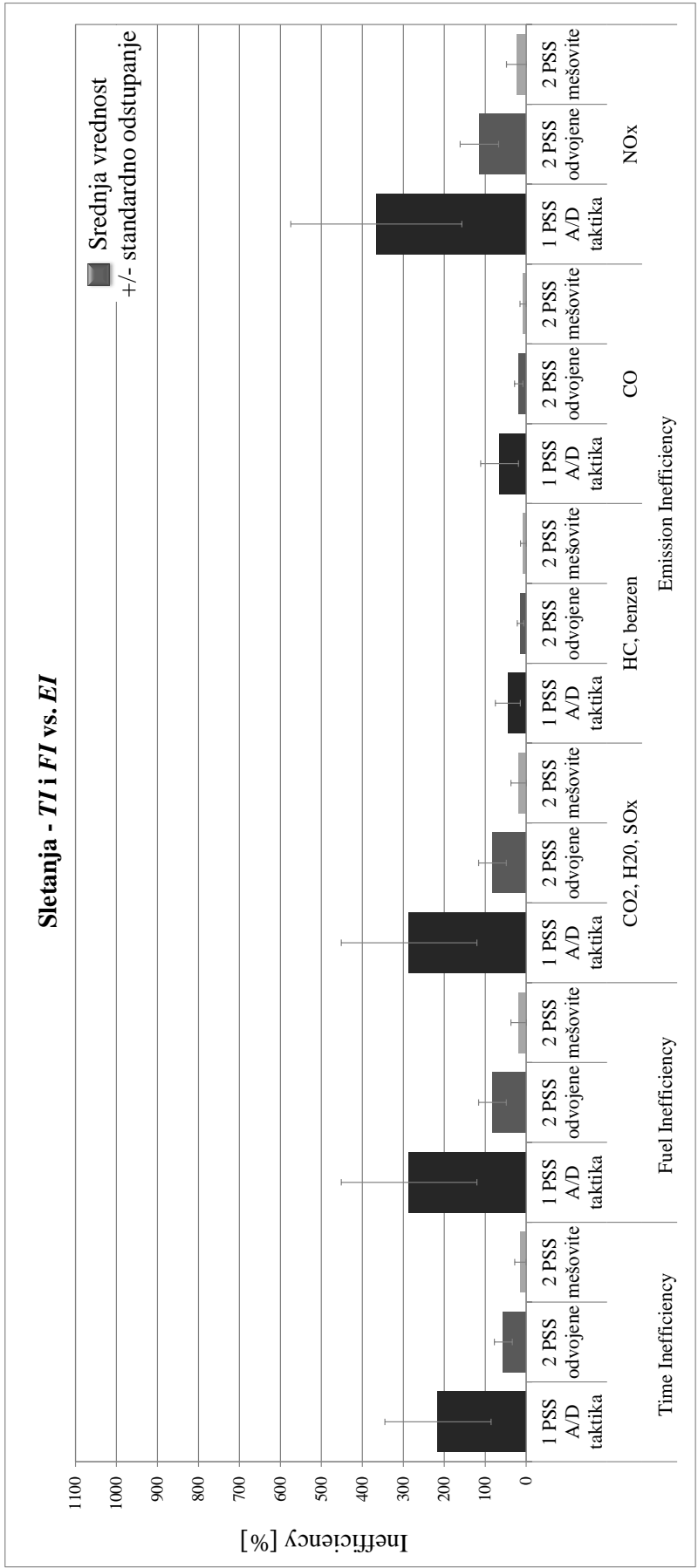


Slika 4.18. Vrednosti mera neefikasnosti sa detaljnim prikazom EI – Scenariji 2B, 3 i 4



Slika 4.19. Vrednosti neefikasnosti za poletanja sa detaljnim prikazom *EI* – Scenariji 2B, 3 i 4





Slika 4.20. Vrednosti neefikasnosti za sletanja sa detaljnim prikazom EI – Scenariji 2B, 3 i 4

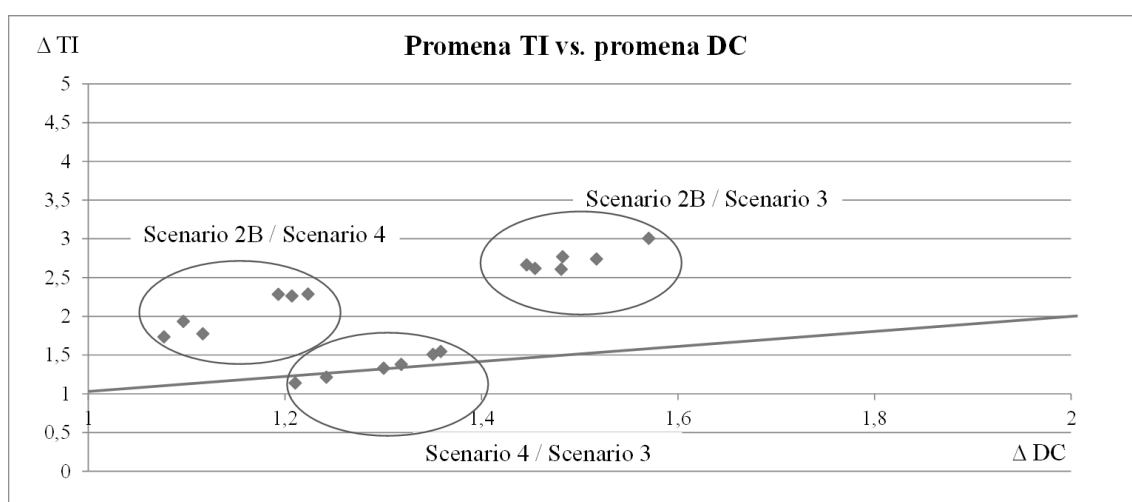
- ♦ Vrednost neefikasnosti emisije za  $\text{NO}_x$ , posmatrano za sve vazduhoplove i za sletanja (Slike 4.18 i 4.20), najviše zavisi od  $FI$ . Kao što je već objašnjeno u Eksperimentu A, emisija  $\text{NO}_x$  najviše zavisi od kašnjenja vazduhoplova u sletanju. Posmatrano za sve vazduhoplove i posebno za sletanja, vrednost  $EI$  za  $\text{NO}_x$  je najviša za Scenario 2B, značajno niža za Scenario 3 i još niža za Scenario 4, dok je za poletanja ova razlika između scenarija manja (Slika 4.19).

Kao i u Eksperimentu A, i za Eksperiment B urađena je analiza međusobne zavisnosti između „veličina“ promena vrednosti  $DC$  i vrednosti  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ , sa ciljem da se ustanovi da li se na osnovu „veličine“ promene dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, koja nastaje kao rezultat primene strateških mera (u ovom slučaju izgradnja nove PSS), i/ili kao rezultat primene različitih taktičkih mera (različitih načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja) za određenu konfiguraciju manevarskih površina, mogu oceniti i „veličine“ promena vrednosti odabranih mera neefikasnosti.

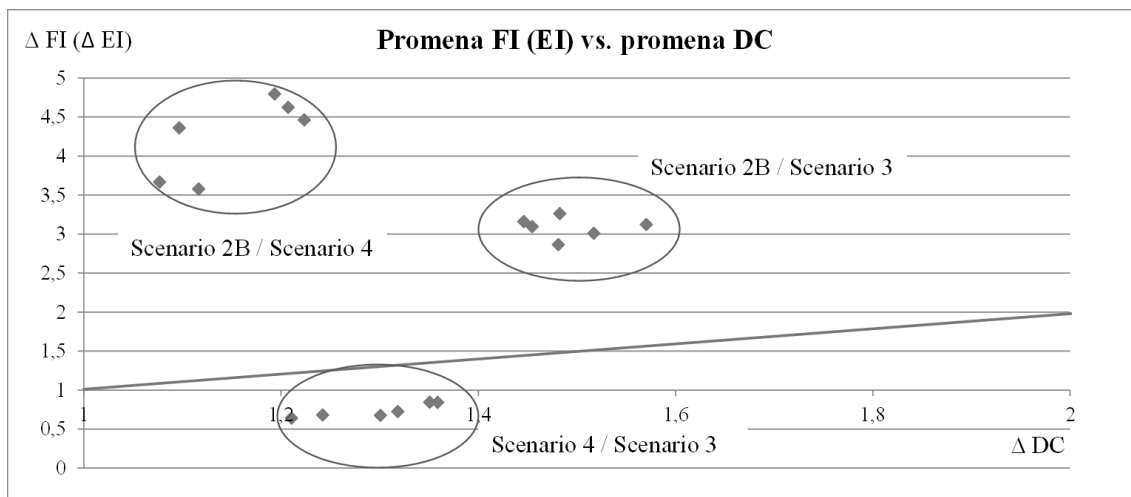
Na slikama 4.21 do 4.23 prikazane su promene vrednosti razmatranih mera neefikasnosti u zavisnosti od promene vrednosti  $DC$ . Kao i u Eksperimentu A, promene vrednosti određenog indikatora su određene kao odnos vrednosti datog indikatora ( $DC$  ili mera neefikasnosti) dobijenih za različite scenarije (na slikama označeno kao  $\Delta DC$  ili  $\Delta TI$ ,  $\Delta FI$  ( $\Delta EI$ );  $\Delta CI$ ). Pri tome, razmatrane su promene vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti koje nastaju prilikom promene konfiguracije manevarskih površina (Scenario 2B / Scenario 3 i Scenario 2B / Scenario 4), kao i promene vrednosti nastale primenom različitih taktika iskorišćenja iste infrastrukture (Scenario 4 / Scenario 3), za svih 6 iteracija simulacije posebno. Dobijene vrednosti odnosa su na datim graficima prikazane tačkama i mogu se uočiti tri „grupe“ tačaka za svako od tri pomenuta poređenja između dva određena scenarija. Vrednost odnosa veća od 1 ukazuje na smanjenje vrednosti određenog indikatora sa „promenom“ scenarija, dok vrednost manja od 1 ukazuje na povećanje vrednosti datog indikatora. „Kosa linija“ povučena na grafiku predstavlja liniju istog odnosa promene  $DC$  i određene mere neefikasnosti.

Sa slike 4.21 može se videti da promenu vrednosti  $DC$ , sa promenom konfiguracije manevarskih površina (Scenario 2B / Scenario 3 i Scenario 2B / Scenario 4), prati i promena vrednosti  $TI$  (sa smanjenjem  $DC$  smanjuje se i  $TI$ ). Takođe, može se uočiti da je (za ista poređenja) promena  $TI$  veća od promene  $DC$ , jer su sve tačke iznad „linije jednakih promena” ( $\Delta TI > \Delta DC$ ). Tako npr. smanjenje  $DC$  za oko 1,5 put dovodi do smanjenja  $TI$  za 2,5-3 puta. U slučaju poređenja Scenarija 4 i 3, tj. poređenjem različitih scenarija za isti sistem (aerodom sa dve PSS), dobijene su skoro jednake promene  $DC$  i  $TI$  (tačke se nalaze oko linije jednakih promena tj.  $\Delta TI \cong \Delta DC$ ).

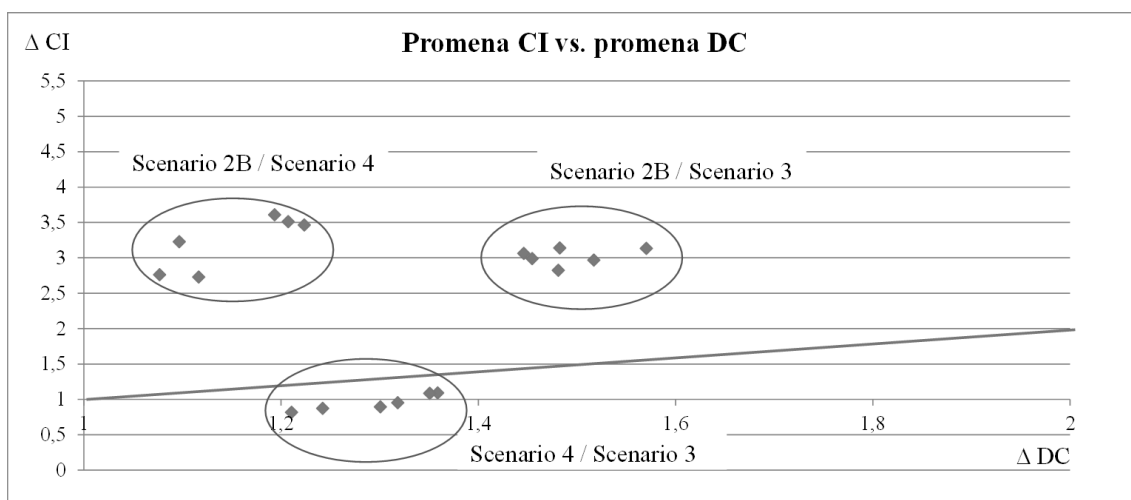
Sa slika 4.22 i 4.23 može se videti da odnos promena  $DC$  i  $FI$  ( $EI$ ) ili  $DC$  i  $CI$  ne ukazuje na određenu pravilnost. Naime, sa promenom konfiguracije manevarskih površina (Scenario 2B / Scenario 3 i Scenario 2B / Scenario 4), za smanjenje vrednosti  $DC$  ( $\Delta DC > 1$ ) može se uočiti smanjenje vrednosti  $FI(EI)$  i  $CI$ , dok se u slučaju poređenja Scenarija 4 i 3 za smanjenje vrednosti  $DC$  ( $\Delta DC > 1$ ) uočava povećanje ovih vrednosti ( $\Delta FI$  ( $\Delta EI$ )  $< 1$ ;  $\Delta CI < 1$ ). Takođe, može se uočiti da je promena (smanjenje)  $FI$  i  $EI$  veća od promene  $DC$  (u slučaju poređenja Scenarija 2B i 3 i Scenarija 2 B i 4), dok je u slučaju poređenja Scenarija 4 i 3 promena (povećanje)  $FI$  i  $EI$  manja od promene (smanjenja)  $DC$ .



Slika 4.21. Promena  $TI$  vs. promena  $DC$  – Scenariji 2B, 3 i 4

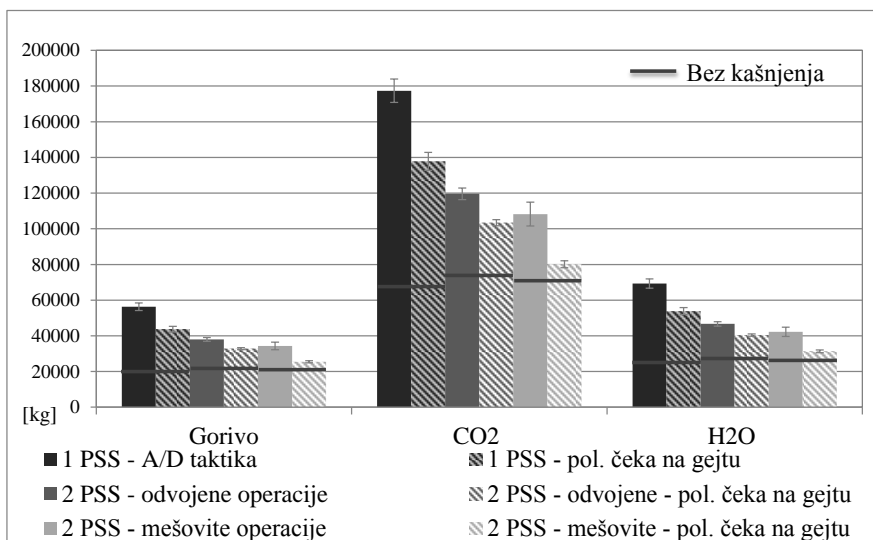


Slika 4.22. Promena DC vs. promena FI (EI) – Scenariji 2B, 3 i 4

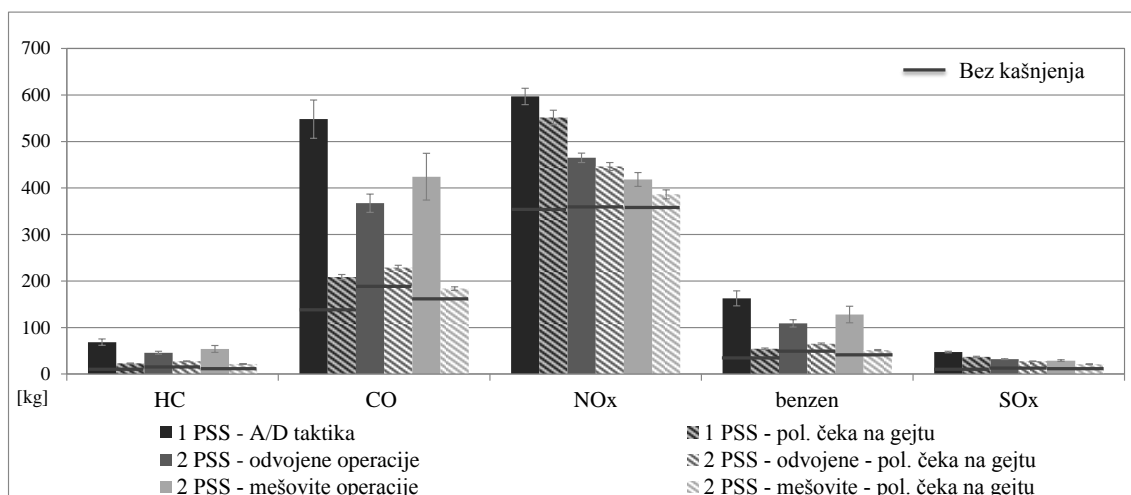


Slika 4.23. Promena DC vs. promena CI – Scenariji 2B, 3 i 4

Kao i u Eksperimentu A, dat je uporedni prikaz ukupno potrošenog goriva i emisije određenih gasova, zatim potrošnje goriva i emisije gasova koje bi se dobile kada bi vazduhoplovi prolazili kroz sistem bez kašnjenja (predstavljene sivom linijom unutar stubića), kao i vrednosti bez kašnjenja poletanja (šrafirani stubići) - Slike 4.24 i 4.25. Prikazane su prosečne vrednosti i standardano odstupanje, dobijene za tri razmatrana scenarija (Scenariji 2B, 3 i 4), na osnovu 6 iteracija simulacije. Vrednosti su najviše za slučaj aerodroma sa jednom PSS (Scenario 2B), za sve posmatrane indikatore. U slučaju aerodroma sa dve PSS, potrošnja goriva je niža za Scenario 4, kao i emisija CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> (usled manjeg kašnjenja sletanja), dok je emisija HC, CO i benzena niža za Scenario 3 (usled manjih kašnjenja poletanja).



Slika 4.24. Potrošeno gorivo i emisija gasova – različite konfiguracije aerodroma i ATC taktike



Slika 4.25. Emisija gasova - različite konfiguracije aerodroma i ATC taktike

Mogući doprinosi od primene „taktike” realizacije kašnjenja vazduhoplova u poletanju na parking pozicijama (sa ugašenim motorima) su najznačajniji za emisiju CO, HC i benzenu (usled visoke emisije ovih gasova tokom faze taksiranja/čekanja), ali je značajno i smanjenje potrošnje goriva i emisije ostalih posmatranih gasova, što se moglo i očekivati. Najznačajnije smanjenje je za emisiju CO, HC i benzenu: oko 60% za Scenario 2B i Scenario 4 i oko 40% za Scenario 3. Veoma su značajna i smanjenja ukupno potrošenog goriva i emisije CO<sub>2</sub>, vodene pare i SO<sub>x</sub> (preko 20% smanjenja za Scenario 2B i Scenario 4 i oko 15% za Scenario 3). Kao što se može videti, za Scenario

3 smanjenje ukupno potrošenog goriva i emisije gasova je manje, s obzirom da su kašnjenja poletanja dosta manja (u odnosu na druga dva razmatrana scenarija; Tabela 4.5).

Na osnovu prikazanih rezultata i izvršenih analiza u Eksperimentu B, za Scenarije 2B, 3 i 4, može se zaključiti sledeće:

- ◆ Postoji značajna razlika između performansi sistema razmatranog u Scenariju 2B tj. aerodroma sa jednom PSS i sistema razmatranog u Scenarijima 3 i 4 tj. aerodroma sa dve PSS, kao i određene razlike u performansama aerodroma sa dve PSS za različite taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja. Aerodrom sa dve PSS omogućava veću efikasnost sistema: manja kašnjenja i veći broj opsluženih vazduhoplova u jednočasovnom intervalu, manji red vazduhoplova koji čekaju na poletanje, niže vrednosti dinamičke kompleksnosti i niže prosečne vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti -  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ , što je logično i očekivano. Posmatrano za sve vazduhoplove, primena taktike odvojenih operacija poletanja i sletanja generiše manje vrednosti  $DC$  i  $TI$ , ali veće vrednosti  $FI$  i ukupne  $EI$  i približno jednake vrednosti  $CI$ , u poređenju sa taktikom mešovutih operacija poletanja i sletanja;
- ◆ Između vrednosti  $DC$  i vrednosti razmatranih mera neefikasnosti:  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$  (definisanih na način prikazan u Poglavlju 3.2.2), posmatrano pri promeni konfiguracije manevarskih površina aerodroma (tj. poređenjem aerodroma sa 1 PSS i aerodroma sa 2 PSS) postoji sledeća jednoznačna međusobna zavisnost: manjim vrednostima  $DC$  odgovaraju i manje vrednosti mera neefikasnosti i obrnuto (posmatrano za sve vazduhoplove). Primena različitih taktika upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja za aerodrom sa 2 PSS dovodi do promena vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti, između kojih ne postoji jednoznačna međusobna zavisnost tj. smanjenje vrednosti  $DC$  dovodi do smanjenja vrednosti pojedinih mera neefikasnosti, dok se vrednosti ostalih mera neefikasnosti povećavaju ili ostaju nepromenjene. Pri tome, promene (smanjenje ili povećanje vrednosti) mera neefikasnosti su veće, manje ili jednake promeni (smanjenju)  $DC$  i obrnuto.

- ◆ Između pojedinih mera neefikasnosti postoji međusobna zavisnost i to:
  - *FI* najviše zavisi od *TI* sletanja,
  - Ukupna *EI* direktno zavisi od *FI*,
  - *EI* za CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O i SO<sub>x</sub> direktno je zavisna od *FI*,
  - *EI* za HC, benzen i CO najviše zavisi od *TI* poletanja,
  - *EI* za NO<sub>x</sub> najviše zavisi od *TI* sletanja, tj. od *FI* sletanja,
  - *CI* direktno zavisi od *EI*;
  
- ◆ Primenom „taktike” realizacije kašnjenja vazduhoplova u poletanju na gejtovima (sa ugašenim motorima), smanjenja potrošnje goriva i emisije gasova su veoma značajna, a naročito u slučaju Scenarija 2B tj. u slučaju aerodroma sa 1 PSS, zatim za Scenario 4 i najmanje za Scenario 3, što je logično i očekivano.

Na osnovu napred iznetog može se zaključiti da je u Eksperimentu B, sa aspekata: *DC*, *TI*, *FI*, *EI* i *CI* (definisanih na način prikazan u disertaciji), aerodrom sa dve PSS efikasniji u odnosu na aerodrom sa jednom PSS, što je i očekivano. Takođe, može se reći da je taktika odvojenih operacija (za aerodrom sa dve PSS) najbolja sa aspekta dinamičke kompleksnosti i vremenske efikasnosti, dok je taktika mešovutih operacija najbolja sa aspekta potrošnje goriva i emisije gasova. Za aerodrom sa dve PSS, sa aspekta *CI*, obe taktike upravljanja saobraćajem približno su jednake.

Generalno, može se zaključiti da strateška mera, kao što je izgradnja nove PSS (što je u ovom eksperimentu prikazano), daje očigledne i očekivane, pozitivne efekte na efikasnost sistema. Odluka o tome koja je ATC taktika pogodnija za bolje iskorišćenje infrastrukture aerodroma sa 2 PSS (sa aspekta održivosti aerodroma) zavisi od konačnih (ili važnijih) ciljeva postavljenih od strane donosioca odluke. Tako na primer, ako donosilac odluke, sa aspekta održivosti aerodroma, veći prioritet daje efikasnosti sistema, tj. *DC* i vremenskoj neefikasnosti, primeniće taktiku odvojenih operacija, dok će taktiku mešovutih operacija primeniti ukoliko veći prioritet daje ekološkom aspektu održivosti aerodroma, tj. potrošnji goriva i emisiji gasova.

#### 4.4.3 Izvedeni zaključci za Eksperimente A i B

Na osnovu prikazanih rezultata i izvršenih analiza u Eksperimentima A i B, za pet razmatranih scenarija, može se zaključiti sledeće:

- ◆ Posmatrano za aerodrom sa jednom PSS, postoji značajna razlika između performansi sistema za dve razmatrane taktike sekvenciranja vazduhoplova: AP i A/D taktika. U poređenju sa AP taktikom, A/D taktika omogućava veću efikasnost sistema, manja kašnjenja, niže vrednosti dinamičke kompleksnosti i niže prosečne vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti -  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ . Takođe, primena različitih taktika upravljanja saobraćajem dovodi do promena u efikasnosti sistema i promena u vrednostima  $DC$  i mera neefikasnosti, između kojih se može uspostaviti jednoznačna međusobna zavisnost, tj. sa smanjenjem  $DC$  smanjuju se i  $TI$ ,  $FI$ ,  $EI$  i  $CI$ , pri čemu su promene (smanjenje mera neefikasnosti) veće ili jednake promenama (smanjenju)  $DC$  i obrnuto. Prema tome, A/D taktika, u uslovima kada postoji stalna potražnja za poletanjima i sletanjima vazduhoplova, je po svim razmatranim indikatorima (definisanim na način opisan u disertaciji) bolja, pa je bolja i sa aspekta održivosti aerodroma;
- ◆ Posmatrano za aerodrom sa dve PSS, primena različitih taktika upravljanja saobraćajem (različite taktike iskorišćenja infrastrukture) dovodi do promena u efikasnosti sistema i promena u vrednostima  $DC$  i mera neefikasnosti, između kojih se ne može uspostaviti jednoznačna međusobna zavisnost tj. smanjenje vrednosti  $DC$  dovodi do smanjenja vrednosti pojedinih mera neefikasnosti, dok se vrednosti ostalih mera neefikasnosti povećavaju ili ostaju nepromenjene, i obrnuto. Pri tome, promene (smanjenje ili povećanje vrednosti) mera neefikasnosti su veće, manje ili jednake promeni (smanjenju)  $DC$  i obrnuto. Odluka o tome koju ATC taktiku primeniti sa aspekta održivosti aerodroma zavisi od konačnih (ili važnijih) ciljeva postavljenih od strane donosioca odluke;
- ◆ U Eksperimentu A je utvrđena jednoznačna međusobna zavisnost između promena vrednosti  $DC$  i promena vrednosti mera neefikasnosti, dok u Eksperimentu B



ovakva zavisnost ne postoji. Na osnovu toga može se zaključiti da generalno posmatrano između promene vrednosti *DC* i mera neefikasnosti, nastalih usled promene taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja i promena u infrastrukturi (strateške mere), ne postoji jednoznačna međusobna zavisnost;

- ◆ Između pojedinih mera neefikasnosti (u oba eksperimenta) postoji međusobna zavisnost i to:
  - *FI* najviše zavisi od *TI* sletanja,
  - Ukupna *EI* direktno zavisi od *FI*,
  - *EI* za  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{SO}_x$  direktno je zavisna od *FI*,
  - *EI* za HC, benzen i CO najviše zavisi od *TI* poletanja,
  - *EI* za  $\text{NO}_x$  najviše zavisi od *TI* sletanja, tj. od *FI* sletanja,
  - *CI* u Eksperimentu A najviše zavisi od *TI*, a u Eksperimentu B od *EI*.
  
- ◆ Primenom „taktike” realizacije kašnjenja vazduhoplova u poletanju na gejtovima (sa ugašenim motorima), smanjenja potrošnje goriva i emisije gasova (koja su logična i očekivana) su manje ili više značajna, u zavisnosti od razmatranog sistema i scenarija.

## 5. ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je uticaj načina upravljanja saobraćajem na postojećim i/ili planiranim resursima aerodroma (poletno-sletnim, rulnim stazama, putanjama za prilaz, sletanje i odlet vazduhoplova), od strane kontrole letenja, na kompleksnost saobraćaja na aerodromu, kao i ocena uticaja kompleksnosti saobraćaja na mere performansi obavljanja saobraćaja na aerodromima, kao pokazatelja održivog razvoja aerodroma. Naime, za datu (trenutnu ili planiranu) saobraćajnu potražnju i konfiguraciju manevarskih površina aerodroma, primena različitih mera upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja može dovesti do generisanja saobraćajnih situacija različite kompleksnosti na aerodromu, što dalje može uticati na efikasnost funkcionisanja aerodroma, a time i na održivi razvoj aerodroma.

Cilj istraživanja u disertaciji bio je da se ustanovi da li postoji i (ukoliko postoji) kakva je međusobna zavisnost između dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja (definisanih na način predložen u disertaciji), a u svrhu ocene održivog razvoja aerodroma. Naime, cilj je bio da se ustanovi da li se na osnovu promene dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, koja nastaje kao rezultat primene različitih načina upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, promene intenziteta saobraćaja i/ili promene u aerodromskoj infrastrukturi (npr. izgradnja nove PSS i/ili rulnih staza), može oceniti i promena u efikasnosti obavljanja saobraćaja (sa aspekta odabranih mera neefikasnosti). Pored analize zavisnosti između dinamičke kompleksnosti i pojedinih mera neefikasnosti, analizirana je i međusobna zavisnost između samih mera neefikasnosti.

U svrhu ostvarivanja postavljenog cilja izvršena je sistematizacija, kritička analiza i predložena je nadgradnja dosadašnjih teorijskih i praktičnih doprinosa u oblasti koja je bila predmet istraživanja. Predložena je metodologija za ocenu uticaja kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma na održivi razvoj aerodroma, kroz ocenu međusobne zavisnosti između dinamičke kompleksnosti saobraćaja na aerodromu i mera neefikasnosti obavljanja saobraćaja. U okviru predložene metodologije su analizirani koncept i mera kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama i u

neposrednoj okolini aerodroma (nazvana Dinamička kompleksnost). Kompleksnost je posmatrana kao mera kvantiteta i kvaliteta međusobnih interakcija vazduhoplova na manevarskim površinama i u neposrednoj okolini aerodroma, pod određenim uslovima. Takođe, predloženom metodologijom, kako bi se bolje razumeli uticaji različitih ATM strateških i taktičkih mera na performanse sistema, definisano je i analizirano nekoliko mera neefikasnosti leta, a zatim i neefikasnosti obavljanja saobraćaja, a u svhu ocene održivog razvoja aerodroma. Predložene mere: vremenska neefikasnost ( $TI$ ), neefikasnost potrošnje goriva ( $FI$ ), emisije gasova ( $EI$ ) i troškovna neefikasnost ( $CI$ ), posmatrane su kao indikatori operativnih, ekoloških i društvenih performansi aerodroma.

Kako bi se ilustrovala primena predložene metodologije, izvršeni su eksperimenti za dve konfiguracije manevarskih površina hipotetičkog aerodroma (trenutnu i planiranu), za različite saobraćajne potražnje i taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, korišćenjem simulacionog modela SIMMOD. Analizirane su saobraćajne situacije (interakcije) i određena su kašnjenja vazduhoplova, zatim vrednosti kompleksnosti saobraćaja na aerodromu, potrošnje goriva i emisije gasova, kao i pojedinih troškova. Dobijeni rezultati su analizirani, diskutovani i na osnovu toga izvedeni su određeni zaključci.

Na osnovu sprovedenog istraživanja i ostvarenih rezultata u ovoj doktorskoj disertaciji mogu se izvesti sledeći zaključci:

- ◆ Posmatrano za aerodrom sa jednom PSS, u uslovima kada postoji stalna potražnja za poletanjima i sletanjima vazduhoplova, primena različitih taktika upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja dovodi do promena vrednosti  $DC$  i mera neefikasnosti, između kojih postoji jednoznačna (definisana na način opisan u disertaciji) međusobna zavisnost tj. smanjenje vrednosti  $DC$  dovodi do smanjenja vrednosti svih razmatranih mera neefikasnosti i obrnuto. Pri tome, promene (smanjenje mera neefikasnosti) su veće ili skoro jednake promeni (smanjenju)  $DC$  i obrnuto. Ovakva zavisnost važi ukoliko posmatramo sve vazduhoplove zajedno. Posmatrano posebno za poletanja i sletanja, kao i za  $EI$  pojedinih gasova, ova

zavisnost nije uvek jednoznačna. Takođe, pokazano je da postoji značajna razlika između performansi sistema za dve razmatrane taktike sekvenciranja vazduhoplova, tj. pokazano je da je A/D taktika, po svim razmatranim pokazateljima performansi sistema (definisanim na način opisan u disertaciji), bolja od AP taktike, pa se može zaključiti da je bolja i sa aspekta održivosti aerodroma;

- ◆ Primena različitih taktika upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, za aerodrom sa 2 PSS, u uslovima kada postoji stalna potražnja za poletanjima i sletanjima vazduhoplova, dovodi do promena vrednosti *DC* i mera neefikasnosti, između kojih ne postoji jednoznačna međusobna zavisnost tj. smanjenje vrednosti *DC* dovodi do smanjenja vrednosti pojedinih mera neefikasnosti, dok se vrednosti ostalih mera neefikasnosti povećavaju ili ostaju nepromenjene. Pri tome, promene (smanjenje ili povećanje vrednosti) mera neefikasnosti su veće, manje ili jednake promeni (smanjenju) *DC* i obrnuto. Odluka o tome koju ATC taktiku primeniti sa aspekta održivosti aerodroma zavisila bi od konačnih (ili važnijih) ciljeva postavljenih od strane donosioca odluke;
- ◆ Analizom međusobne zavisnosti između samih mera neefikasnosti utvrđena je sledeća međusobna zavisnost (za oba eksperimenta):
  - *FI* najviše zavisi od *TI* sletanja,
  - Ukupna *EI* direktno zavisi od *FI*,
  - *EI* za  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{SO}_x$  direktno je zavisna od *FI*,
  - *EI* za HC, benzen i CO najviše zavisi od *TI* poletanja,
  - *EI* za  $\text{NO}_x$  najviše zavisi od *TI* sletanja, tj. od *FI* sletanja,
  - *CI* u Eksperimentu A najviše zavisi od *TI*, a u Eksperimentu B od *EI*.
- ◆ Generalno posmatrano, u uslovima kada postoji stalna potražnja za poletanjima i sletanjima vazduhoplova, između promena vrednosti *DC* i mera neefikasnosti, nastalih usled promene taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja i promena u infrastrukturi (strateške mere), ne postoji jednoznačna međusobna zavisnost;

- ◆ Primena predložene metodologije omogućava donosiocima odluke na predtaktičkom nivou - kontrolorima letenja da odaberu ATC taktiku kojom bi na što bolji način iskoristili postojeće resurse aerodroma, a u cilju smanjenja negativnih uticaja saobraćaja, kako sa aspekta kompleksnosti saobraćaja, tako i sa aspekta održivog razvoja aerodroma. Takođe, primena predložene metodologije omogućava donosiocima odluke na strateškom nivou – planerima i projektantima aerodroma, da testiraju i ocene nove operativne koncepte (koji bi se koristili na predtaktičkom i taktičkom nivou) i/ili proširenja postojeće infrastrukture aerodroma, kako bi po kapacitetu zadovoljili rastuću potražnju, a sa druge strane zadovoljili i zahteve održivog razvoja aerodroma.

Deo rezultata istraživanja sprovedenog u okviru doktorske disertacije objavljen je u međunarodnom časopisu (Krstić Simić i Babić, 2015).

Imajući u vidu napred izneto, jedan od glavnih naučnih doprinosa ove doktorske disertacije je u uvođenju u razmatranje uticaja dinamičke kompleksnosti saobraćaja, kao potencijalnog generatora zagušenja saobraćaja na aerodromima, na održivi razvoj aerodroma, kao i u analizi međusobne zavisnosti između kompleksnosti saobraćajne situacije na aerodromu i analiziranih pokazatelja efikasnosti samog aerodroma.

Uočeni su mogući pravci daljeg istraživanja. S aspekta mere kompleksnosti saobraćaja, jedan od interesantnih pravaca bio bi uključivanje ljudskog faktora u određivanje mere kompleksnosti saobraćaja, npr. putem intervjuisanja kontrolora letenja o njihovoj subjektivnoj oceni važnosti predloženih faktora kompleksnosti i proceni kompleksnosti određenih saobraćajnih situacija.

Uticaj novih ATM operativnih koncepata i novih tehnologija (dizajn vazduhoplova i pogonskih grupa, novih izvora energije) na efikasnost operacija na aerodromu, a samim tim i na održivi razvoj aerodroma, predstavlja takođe jedan od aspekata budućih istraživanja.

Takođe, bilo bi veoma interesantno sprovesti sve navedene analize za aerodrome sa kompleksnijom konfiguracijom manevarskih površina (sa više poletno-sletnih staza i više rulnih staza) i za veće intenzitete saobraćaja, gde bi bio moguć veliki broj različitih interakcija između vazduhoplova. Konačno, kako bi se omogućila veća „stohastičnost“ saobraćajne situacije i omogućilo više statističkih analiza, trebalo bi analizirati veći broj iteracija simulacija.

Istraživanje predstavljeno u ovoj disertaciji, kao i eventualna buduća istraživanja u ovoj oblasti mogu predstavljati polaznu osnovu za razvoj alata za podršku u odlučivanju, kako kontrolorima letenja tako i planerima i projektantima aerodroma, koji bi im omogućio procenu uticaja primene određenih taktičkih i/ili strateških mera (kao što je na primer uvođenje nove ATC taktike na postojećoj infrastrukturi i/ili proširenje infrastrukture aerodroma) na kompleksnost saobraćaja i efikasnost funkcionisanja aerodroma, a u svrhu ocene održivog razvoja aerodroma.

## Literatura

- Anagnostakis, I., Clarke, J.P., Böhme, D., Völckers, U. (2001), "*Runway Operation Planning and Control: Sequencing and Scheduling*", Proceedings of the 34<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences, 3-6 January, Maui, HI, USA
- Anagnostakis, I., Clarke, J.P. (2003), "*Runway Operation Planning: A Two-Stage Solution Methodology*", Proceedings of the 36<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences, 6-9 January, Big Island, HI, USA
- Atkins, S., Jung, Y., Brinton, C., Stell, L., Rogowski, S. (2004), "*Surface Management System Field Trial Results*", AIAA 4<sup>th</sup> Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum, 20-22 September, Chicago, Illinois
- Atkin J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S. (2010), "*The Airport Ground Movement Problem: Past and Current Research and Future Directions*", 4<sup>th</sup> International Conference on Research in Air Transportation, June 01-04, Budapest, Hungary
- Atkin J.A.D., Burke, E.K., Ravizza, S. (2011), "*A more realistic approach for airport ground movement optimisation with stand holding*", Multidisciplinary International Scheduling Conference, 09-12 August, Phoenix, USA
- Babić, O. i Netjasov, F. (2011) „Kontrola letenja“, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Srbija
- Balakrishnan, H., Chandran, B. (2007), "*Efficient and Equitable Departure Scheduling in Real-Time: New Approaches to Old Problems*," 7<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, July, Barcelona, Spain,
- Balakrishnan, H., Chandran, B.G. (2010), "*Algorithms for Scheduling Runway Operations Under Constrained Position Shifting*", Operation Research, Vol. 58, No. 6, November-December 2010, pp. 1650-1665
- Bennell, J.A., Mesgarpour, M., Potts, C.N. (2011), "*Airport runway scheduling*", 4OR: A Quarterly of Operation Research, 9(2), pp. 115-138
- Brentnall, A.R., Cheng, R.C.H. (2009), "*Some effects of aircraft arrival sequence algorithms*", Journal of the Operational Research Society (2009) 60, pp. 962-972

- Celikel, A., Duchene, N., Hustache, J.C., Elliff, T., Pilon, N., Smith, P. (2005), *“Indicators for the Management of Sustainability in the Air Transport System”*, 9<sup>th</sup> Air Transport Research Society World Conference, July 3-7, Rio de Janeiro, Brazil
- Chaboud, T., Hunter, R., Hustache, J. C., Mahlich, S. and Tullett, P. (2000), *“Air Traffic Complexity: Potential Impacts on Workload and Costs”*, EEC Note No. 11/00, Project GEN-4-E2, Eurocontrol Experimental Centre, Bretigny, France
- Chen J., Ravizza S., Atkin J.A.D., Stewart P. (2011), *“On the Utilisation of Fuzzy Rule-Based Systems for Taxi Time Estimations at Airports”*, 11<sup>th</sup> Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization and Systems ATMOS'11, September 8, Saarbrucken, Germany
- Clean Sky Joint Undertaking, (2014), *“Annual Implementation Plan 2014”*, CS-GB-2013-13-12 doc8a AIP 2014
- D'Ariano, A., D'Urgolo, P., Pacciarelli, D., Pranzo, M. (2010), *“Optimal Sequencing of Aircrafts Take-Off and Landing at a Busy Airport”*, 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 19-22 September, Madeira Island, Portugal
- Deau, R., Gotteland, J.B., Durand, N. (2009), *“Airport surface management and runways scheduling”*, 8<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2009), June 29 – July 2, Napa, California, USA
- Delahaye, D., Puechmorel, S. (2000), *“Air Traffic Complexity: Towards Intrinsic Metrics”*, 3<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Napoli, Italy
- Delahaye, D., Puechmorel, S., Hansman, J., Histon, J. (2003), *“Air Traffic Complexity based on Non Linear Dynamical Systems”*, Proceedings of 5<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar”, Budapest, Hungary
- Deonandan, I., Balakrishnan, H. (2010), *“Evaluation of Strategies for Reducing Taxi-out Emissions at Airports”*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, 13-15 September, Fort Worth, Texas



- Djokic, J., Lorenz B., Fricke, H. (2010), “*Air traffic control complexity as workload driver*”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 18, Issue 6, December 2010, pp. 930-936
- Eurocontrol Experimental Centre (2009), “*AEM - Advanced Emission Model III Release 2.0 User Guide, Version 1.2*”, Bretigny, France
- Eurocontrol Experimental Centre (2012), “*Performance Review Report: An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2011*”, Performance Review Commission
- Eurocontrol Experimental Centre (2013), Challenges of Growth 2013: Summary Report, <http://www.eurocontrol.int/articles/challenges-growth>.
- European Commission (2014), “EU communication campaign on climate action”, [http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/campaign\\_mobile.pdf](http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/campaign_mobile.pdf)
- Garcia, J., Berlanga, A., Molina J.M., Casar J.R. (2005), “*Optimization of Airport Ground Operations Integrating Genetic and Dynamic Flow Management Algorithms*”, Journal AI Communications, Volume 18, Issue 2, April 2005, pp. 143-164
- Gianazza, D. (2007) “*Airspace configuration using air traffic complexity metrics*“, Proceedings of 7th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Barcelona, Spain
- Gianazza, D. (2008), “*Smoothed traffic complexity metrics for airspace configuration schedules*“, Proceedings of 3rd International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT), Fairfax, USA, pp. 77–85
- Haan, A.R.C. de (2007), “*Aviation and Sustainable Development*”, Delft University of Technology, Delft, Netherlands
- Histon, J.M., Aigoïn, G., Delahaye D., Hansman, R. J. and Puechmorel, S. (2001), “*Introducing Structural Consideration into Complexity Metrics*”, 4<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2001), 4-7 December, Santa Fe, USA
- Horonjef, R., McKelvey, F.X., Sproule, W.J., Young, S.B. (2010), “*Planning and Design of Airports*”, Fifth edition, Mc Grow Hill

- ICAO (2004), “*Doc 9643 - Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)*”, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada
- ICAO (2012), “ICAO aircraft engine emissions databank“, <http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php>
- ICAO (2013), “*Annex 14, Aerodromes - Volume I: Aerodrome Design and Operations*”, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada
- Idris, H., Wing, D., Vivona, R. and Garcia-Chico, J.L. (2007), “*A Distributed Trajectory-Oriented Approach to Managing Traffic Complexity*“, 7<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, 18-20 September, Belfast, Northern Ireland
- Idris, H., Vivona, R., Wing, D. (2009), “*Metrics for Traffic Complexity Management in Self-Separation Operations*“, Air Traffic Control Quarterly Vol. 17, Issue 1, pp. 95-124
- Janić, M. (1999), “*Aviation and externalities: the accomplishments and problems*”, Transportation Research Part D, Volume 4, No. 3, pp. 159-180
- Janić, M. (2002), “*Methodology for Assessing Sustainability of Air Transport System*”, Journal of Air Transportation, Volume 7, No. 2, 2002, pp. 115-162.
- Janić, M. (2004), “*An Application of the Methodology for Assessing Sustainability of Air Transport System*”, Journal of Air Transportation, Volume 9, 2004, pp. 40-82.
- Janić, M. (2010), “*Developing an Indicator System for Monitoring, Analyzing and Assessing Airport Sustainability*”, European Journal of Transport and Infrastructure Research, September 2010, pp. 206-229.
- Jeon, C.M., Amekudzi, A., Guensler, R. L. (2013), “*Sustainability assessment at the transportation planning level: Performance measures and indexes*”, Transport Policy, Volume 25, January 2013, pp. 10-21
- Jung, Y., Hoang, T., Montoya J., Gupta, G., Malik, W., Tobias, L. (2010), “*A Concept and Implementation of Optimized Operations of Airport Surface Traffic*”, Proceedings of the 10<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, 13-15 September, Fort Worth, Texas

- Jung, Y., Hoang, T., Montoya J., Gupta, G., Malik, W., Tobias, L., Wang, H. (2011), *“Performance Evaluation of a Surface Traffic Management Tool for Dallas/Fort Worth International Airport”*, 9<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2011), 14-17 June, Berlin, Germany
- Kim, B., Li, L., Clarke, J.P. (2010), *“Runway Assignment by Minimizing Emissions in Terminal Airspace”*, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2-5 August, Toronto, Ontario, Canada
- Khadilkar, H., Balakrishnan, H. (2012), *“Estimation of Aircraft Taxi-out Fuel Burn using Flight Data Recorder Archives”*, Transportation Research Part D: Transport and the Environment, Volume 17, Issue 7, October 2012
- Kopardekar, P., Magyarits, S. (2003), *“Measurement and Prediction of Dynamic Density”*, Proceedings of 5<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar”, Budapest, Hungary
- Kopardekar, P., Prevot, T., Jastrzebski, M. (2009), *“Traffic Complexity Measurement Under Higher Levels of Automation and Higher Traffic Densities”*, Air Traffic Control Quarterly, Vol. 17, Issue 2, pp. 125-148
- Koros, A., Rocco, P.D., Panjwani, G., Ingurgio, V., D’Arcy, J.F. (2003), *“Complexity in Air Traffic Control Towers: A Field Study, Part 1. Complexity Factors”* (Report No. DOT/FAA/CT-TN03/14), Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration
- Koros, A., Rocco, P.D., Panjwani, G., Ingurgio, V., D’Arcy, J.F. (2006), *“Complexity in Air Traffic Control Towers: A Field Study, Part 2. Controller Strategies and Information Requirements”* (Report No. DOT/FAA/TC-06/22), Atlantic City, NJ: Federal Aviation Administration
- Krstić, T. (2004), *“Kompleksnost saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma”*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd
- Krstić, T., Tošić, V. (2010), *“Airfield Traffic Complexity”*, Proceedings of the 14th ATRS World Conference, 06-09 July, Porto, Portugal

- Krstić, T., Netjasov, F., Tošić, V. (2011), *“Air Traffic Complexity through Traffic Characteristics”*, European Conference on Complex Systems 2011 – ECCS 2011, Proceedings of the Satellite Meeting: Complexity and the Future of Transportation Systems, September 15, Vienna, Austria
- Krstić Simić, T., Babić, O., Andrić, V. (2014), *“Influence of Airport Operations Management on Traffic Complexity and Efficiency”*, 6th ICRAAT Conference, 26-30 May, Istanbul, Turkey
- Krstić Simić, T., Babić, O. (2015), *“Airport Traffic Complexity and Environment Efficiency Metrics for Evaluation of ATM Measures”*, Journal of Air Transport Management, Volume 42, January 2015, pp. 260-271
- Laudeman, I., Shelden, S.G., Branstrom, R., Brasil, C.L. (1998a), *“Dynamic Density: An Air Traffic Management Metric”*, NASA/TM-1998-112226, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Moffett Field, USA
- Laudeman, I., Brasil, C.L., Branstrom, R. (1998b), *“Measuring Air Traffic Complexity”*, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center, Moffett Field, USA
- Lee, H., Balakrishnan, H. (2008), *“Fuel Cost, Delay and Throughput Tradeoffs in Runway Scheduling”*, 2008 American Control Conference, 11-13 June, Seattle, Washington, USA
- Lee, D.S., et al. (2010), *“Transport Impacts on Atmosphere and Climate: Aviation”*, Atmospheric Environment, Volume 44, Issues 37, December 2010, pp. 4678-4734
- Lesire, C. (2010), *“An Iterative A\* Algorithm for Planning of Airport Ground Movements”*, Proceedings of the 2010 conference on ECAI 2010:19<sup>th</sup> European Conference on Artificial Intelligence, pp. 413-418
- Levine, B.S., Gao, H.O. (2007), *“Aircraft Taxi-out Emissions at Congested Hub Airports and the Implications for Aviation Emissions Reduction in the United States”*, TRB 2007, 86<sup>th</sup> Annual Meeting, January, Washington, USA
- Liu, Y., Hansen, M. (2013), *“Ground Delay Program Decision-making using Multiple Criteria: A Single Airport Case”*, 10<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2013), 10-13 June, Chicago, Illinois, USA

- Lourenco, R., Pires, A.C. (2005), “*Air transportation planning: multicriteria analysis in the definition of sustainable development indicators*”, Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society, No.1, 2005
- Majumdar, A., Ochieng, W. (2007), “*Air traffic control complexity and safety: a framework for sector design based upon controller interviews of complexity factors*“, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp. 70–80
- Masalonis, A. J., Callaham, M. B. and Wanke, C. R. (2003), “*Dynamic Density and Complexity Metrics for Realtime Traffic Flow Management*”, 5<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2003), 23-27 June, Budapest, Hungary
- Mogford, R.H., Guttman, J.A., Morrow, S.L., Kopardekar, P. (1995), “*The Complexity Construct in Air Traffic Control: A Review and Synthesis of the Literature*”, DOT/FAA/CT-TN95/22, Federal Aviation Administration, Atlantic City
- Montoya, J., Wood, Z., Rathinam, S. (2011), “*Runway Scheduling Using Generalized Dynamic Programming*”, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 8-11 August, Portland, Oregon
- Netjasov, F., Janic, M., Tomic, V. (2009), “*The future air transport system: looking for generic metrics of complexity for terminal airspace*”, Proceedings of the 88<sup>th</sup> TRB annual meeting, 11-15 January, Washington (DC), USA
- Netjasov, F., Janic, M., Tomic, V. (2011), “*Developing a generic metric of terminal airspace traffic complexity*”, Transportmetrica 2011, pp. 1-26
- Nikoleris, T., Gupta, G., Kistler, M. (2011), “*Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport*”, Transportation Research Part D, Volume 16, pp. 302-308
- Ohsfeldt, M. et al. (2007), “*Quantifying the Relationship between Air Traffic Management Inefficiency, Fuel Burn and Air Pollutant Emissions*”, 8USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2007), 2-5 July, Barcelona, Spain

- Oortmerssen, S.G. (2008), “*Determining Airport Sustainability*”, Technical University of Delft, Faculty of Aerospace Engineering,  
<http://www.garsonline.de/Downloads/080703/van%20Oortmerssen%20Paper%20GARS.pdf>
- Pawlak, W.S., Brinton, C.R., Crouch, K, Lancaster, K.M. (1996a), “*A Framework for the Evaluation of Air Traffic Control Complexity*”, Proceedings of 1996 AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, USA
- Pawlak, W.S., Brinton, C.R., Crouch, K, Lancaster, K.M. (1996b), “*An Evaluation of Air Traffic Control Complexity*”, Final Report, Contract Number NAS2-14284, Wyndemere Inc., Boulder, USA
- Pawlak, W.S., Brinton, C.R. (1996), “*Issues In Free Flight: Results From Controller-In-the-Loop Simulations*”, Proceedings of 1996 Air Traffic Control Association Conference, USA
- Pawlak, W.S. (1996), “*The Complexity of Air traffic control*”, Wyndemere Inc., Boulder, USA
- Prandini, M., Putta, V., Hu, J. (2009), “*A probabilistic measure of air traffic complexity in three-dimensional airspace*”, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing 2009, pp. 1-25
- Ravizza, S., Chen, J., Atkin, J.A.D., Burke, E.K., Stewart, P. (2012), “*The trade-off between taxi time and fuel consumption in airport ground movement*”, Conference on Advanced Systems for Public Transport, 23-27 July, Santiago, Chile
- Rathinam, S., Wood, Z., Sridhar, B., Jung, Y. (2009), “*A Generalized Dynamic Programming Approach for a Departure Scheduling Problem*”, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 10-13 August, Chicago, Illinois
- Reynolds, T.G. (2009), “*Development of Flight Inefficiency Metrics for Environmental Performance Assessment of ATM*”, 8<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2009), June 29 – July 2, Napa, California, USA
- Ryerson M.S., Hansen, M., Bonn J. (2011), “*Fuel Consumption and Operational Performance*”, 9<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2011), 14-17 June, Berlin, Germany

- Saffarzadeh, M., Kamal, Abadi, I.N., Kordani, A.A., Gangraj, E.A. (2008), “*A New Approach in Airport Capacity Enhancement Based on Integrated Runway Assignment and Operations Planning Model*”, *Journal of Applied Science* 8 (22), pp. 4040 - 4050
- Sandberg, M., Reynolds, T.G., Khadilkar, H., Balakrishnan, H. (2013), “*Airport Characterization for the Adaptation of Surface Congestion Management Approaches*”, 10<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2013), 10-13 June, Chicago, Illinois, USA
- Schaefer, D. (2001), “*Air Traffic Complexity as a Key Concept for Multi-Sector Planning*”, 20<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, Daytona Beach, USA
- SESAR (2012), “*The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management: European ATM Master Plan*”, Edition 2, October 2012
- Simaiakis, I., Balakrishnan H. (2009), “*Queuing Models of Airport Departure Processes for Emissions Reduction*”, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 10-13 August, Chicago, Illinois
- Sölveling, G., Senay S., Clarke, J.P.B., Johnson, E.L. (2011), „*Scheduling of Runway Operations for Reduced Environmental Impact*“, *Transportation Research Part D: Vol. 16, Issue 2, March 2011*, pp. 110-120
- Sridhar, B., Sneth, K.S., Grabbe, S. (1998), “*Airspace Complexity and its Application in Air Traffic Management*”, 2<sup>nd</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Orlando, USA
- Tošić, V. (1991), “*Airport Ground Traffic Analysis – Case Study: Boston Logan Airport*”, Working paper UCB-ITS-WP-91-4, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, USA
- Tošić, V. and Netjasov, F. (2003), “*Terminal Airspace Traffic Complexity*”, 5<sup>th</sup> EURO/INFORMS Joint International Meeting”, Istanbul, Turkey
- Transportation Research Board: Sustainable Transportation Indicators Subcommittee (2009), “*Sustainable Transportation Indicators: A Recommended Research Program for Developing Transportation Indicators and Data*”, TRB 88<sup>th</sup> Annual Meeting, Paper 09-3403, January 11-15, Washington, DC

- Vogel, M., Schelbert, K., Fricke, H., Kistan, T. (2013), “*Analysis of Airspace Complexity Factors’ Capability to Predict Workload and Safety Levels in the TMA*”, 10<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2013), 10-13 June, Chicago, Illinois, USA
- Wood, Z., Kistler, M., Rathinam, S., Jung, Y. (2009), “*A Simulator for Modeling Aircraft Surface Operations at Airports*”, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 10-13 August, Chicago, Illinois
- Yifei, Z., De, Z., Rentain, Y., Hongyong, W. (2011), “*Method to Analyse Air Traffic Situation Based on Air Traffic Complexity Map*”, 9<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar (ATM2011), 14-17 June, Berlin, Germany



# **PRILOG I**

## **FAKTORI KOMPLEKSNOSTI SAOBRAĆAJA U KONTROLI LETENJA**

**(Mogford et al, 1995)**

Tabela I.1. Faktori kompleksnosti u kontroli letenja i metode merenja

Izvor	Faktori kompleksnosti	Pristup	Rezultati
FAA izveštaj 7210.46 (1984)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ broj poletanja</li> <li>◆ broj sletanja</li> <li>◆ vanredni slučajeви</li> <li>◆ specijalni letovi</li> <li>◆ broj <i>en-route</i> vazduhoplova koji zahtevaju kontrolu</li> <li>◆ broj <i>en-route</i> vazduhoplova koji ne zahtevaju kontrolu</li> <li>◆ koordinacija</li> </ul>	Formula za kompleksnost radnog opterećenja.	Ponderisana suma faktora kompleksnosti za vršni sat koja se koristi za validaciju sektora.
Davis (1963)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ “gustina” saobraćaja</li> <li>◆ kombinacija saobraćaja (dolasci/poletanja vs. preleti)</li> <li>◆ broj aerodromskih terminala</li> </ul>	Eksperiment ispitivanja efekta karakteristika sektora na aktivnosti kontrolora.	Statistički odnos između faktora kompleksnosti i aktivnosti kontrolora.
Kuhar i ostali (1976)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ obim saobraćaja</li> <li>◆ raspodela saobraćaja</li> <li>◆ osoblje</li> <li>◆ vremenski uslovi</li> <li>◆ status opreme</li> </ul>	Procena ARTS ( <i>Automated Radar Terminal System</i> ) sistema.	ARTS III sistem podržava povećanje produktivnosti i kapaciteta.
Buckley i ostali (1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ geometrija sektora</li> <li>◆ “gustina” saobraćaja</li> </ul>	Dva simulaciona eksperimenta.	Utvrđena je interakcija između geometrije sektora i “gustina” saobraćaja i 10 različitih mera performansi.
Arad (1964)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ opterećenje okruženja</li> <li>◆ rutinsko opterećenje</li> <li>◆ opterećenje vazdušnog prostora</li> </ul>	Studija je sprovedena u 13 centara kontrole letenja da bi se definisali faktori “teškoće”.	Formula za opterećenje vazdušnog prostora.

Tabela I.1 Faktori kompleksnosti u kontroli letenja i metode merenja (nastavak)

Izvor	Faktori kompleksnosti	Pristup	Rezultati
Jolitz (1965)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ suma generisanog rada u toku 1 h vođenja vazduhoplova u preletu kroz sektor kada nema interakcija sa ostalim vazduhoplovima</li> <li>♦ rutinsko opterećenje</li> <li>♦ “gustina” saobraćaja</li> </ul>	Validacija modela opterećenja koje je razvio Arad (1964).	Matematički model nije dobar za predikciju radnog opterećenja; “gustina” saobraćaja je bolji pokazatelj.
Soede et al. (1971)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ komunikacija sa vazduhoplovom</li> <li>♦ prisutnost konflikata</li> <li>♦ broj promena putanja</li> </ul>	Faktori u korelaciji sa vremenima izvršenja zadataka u kontroli letenja.	Promenljive vazdušnog prostora su u korelaciji sa trajanjem komponenata zadataka kontrole letenja.
Schmidt (1976)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ prevencija konflikata u krosiranju</li> <li>♦ prevencija konflikata u preletu</li> <li>♦ transferi</li> <li>♦ izlazne tačke</li> <li>♦ koordinacija sa ostalim kontrolorima</li> <li>♦ zahtevi pilota</li> <li>♦ struktura saobraćaja</li> </ul>	Sprovedena istraživanja da bi se odredile “teškoće” određenih događaja.	Razvijen je indeks težine kontrole – CDI ( <i>Control Difficulty Index</i> ) koji predstavlja sumu očekivanog broja ATC događaja na sat pomnoženu sa faktorom težine.
Stein (1985)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ grupisanje vazduhoplova po malim delovima vazdušnog prostora</li> <li>♦ broj transfera - predaja vazduhoplova</li> <li>♦ ukupan broj letova u nadležnosti kontrolora</li> <li>♦ broj transfera - prihvatanja vazduhoplova</li> </ul>	Korelacija faktora vazdušnog prostora i rezultati dobijeni primenom tehnike ATWIT – <i>Air Traffic Workload Input Technique</i> .	Statistička zavisnost faktora vazdušnog prostora i radnog opterećenja kontrolora letenja.

Tabela I.1. Faktori kompleksnosti u kontroli letenja i metode merenja (nastavak)

Izvor	Faktori kompleksnosti	Pristup	Rezultati
Grossberg (1989)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ potrebne akcija prilikom spajanja i razdvajanja vazduhoplova</li> <li>♦ broj vazduhoplova u penjanju i poniranju</li> <li>♦ kombinacija tipova vazduhoplova</li> <li>♦ česta koordinacija sa ostalim kontrolorima</li> <li>♦ “gustina” saobraćaja</li> </ul>	Razvijen indeks kompleksnosti baziran na navedenim faktorima i ispitana korelacija sa operativnim greškama.	Pronađena značajna statistička korelacija između indeksa kompleksnosti i operativnih grešaka.
Mogford i ostali (1993)	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ suma saobraćaja u penjanju i poniranju</li> <li>♦ kombinacija vazduhoplova</li> <li>♦ broj putanja vazduhoplova koje se seku</li> <li>♦ broj zahtevanih procedura</li> <li>♦ broj vojnih letova</li> <li>♦ broj koordinacija</li> <li>♦ “hub” kompanije</li> <li>♦ vreme</li> <li>♦ kompleksne rute vazduhoplova</li> <li>♦ zabranjene zone, zone upozorenja i zone vojnog letenja</li> <li>♦ veličina sektora</li> <li>♦ zahtevi za dužinskim sekvenciranjem i razdvajanjem</li> <li>♦ adekvatnost radio i radarske pokrivenosti</li> <li>♦ zagušenje radio frekvencija</li> </ul>	<p>Upitnik sa skalama za procenu.</p> <p>Višedimenzionalno “skaliranje” rezultata poređenja faktora kompleksnosti u parovima.</p> <p>Korelacija ocena kompleksnosti sa celokupnim kriterijumima kompleksnosti.</p>	Razvijena je konačna lista od 15 faktora kompleksnosti. Niz ovih faktora korelirani su procenom kontrolora o kompleksnosti.

## **PRILOG II**

### **ODRŽIVOST SISTEMA VAZDUŠNOG SAOBRAĆAJA**

## **PRILOG II.1**

### **NEGATIVNI UTICAJI VAZDUŠNOG SAOBRAĆAJA**

**(Janić, 1999)**

Tabela II.1. Ekološki problemi/uticaji vezani za operacije civilnog vazduhoplovstva

<b>Problem</b>	<b>Objašnjenje</b>
<b>1. Zagađenje vazduha u okolini aerodroma</b>	Emisija pogonske grupe vazduhoplova
	Emisija motornih vozila na aerodromu
	Emisija saobraćaja za pristup aerodromu
	Emisija od ostalih izvora na aerodromu
<b>2. Emisija gasova na globalnom nivou</b>	Dugoročno zagađenje vazduha (npr. kisele kiše)
	Efekat staklene bašte
	Oštećenje ozonskog omotača
<b>3. Buka vazduhoplova</b>	Buka u blizini aerodroma izazvana kretanjem vazduhoplova
	Testiranje motora i drugi izvori buke na aerodromima
	Buka izazvana „en-route“ letenjem vazduhoplova
	Probijanje zvučnog zida supersoničnih vazduhoplova
<b>4. Incidenti/nesreće</b>	Nesreće ili incidenti koji uključuju smrt ili povrede putnika ili „oštećenje“ opasnih materija koje su prevožene kao teret
	Ostali ekološki problemi koji mogu nastati usled avionskih nesreća
	Hitne procedure koje uključuju ispuštanje goriva
<b>5. Zagušenje i kašnjenja</b>	Zagušenja i kašnjenja na aerodromu i na rutama
<b>6. Aerodrom/Infrastruktura</b>	Gubitak zemljišta
	Erozija zemljišta
	Uticaj na vodu, izvore reka i drenažu oblasti
	Uticaj na floru i faunu
<b>7. Zagađenje vode/zemljišta u okolini aerodroma</b>	Zagađenje vode izazvano neadekvatnim tretmanom otpadnih voda aerodroma
	Zagađenje vode i zemljišta izazvano curenjem iz rezervoara
<b>8. Upravljanje otpadom na aerodromu</b>	Odlaganje ekološki štetnih materijala koji se koriste pri opsluzi i održavanju vazduhoplova
	Odlaganje otpada sa aerodroma i dolazećih vazduhoplova

U radu Janić (1999) je data analiza potencijalnih ekoloških problema navedenih od strane ICAO:

1. *Detaljna analiza potrošnje goriva i energetske efikasnosti* posmatrano kroz sledeće aspekte: ukupna potrošnja goriva u sektoru civilnog vazduhoplovstva, napredak u tehnologiji pogonskih grupa vazduhoplova, operativne mere za smanjenje potrošnje goriva, obnova flote, kumulativni efekti različitih faktora na održivi razvoj civilnog vazduhoplovstva.
2. *Analiza zagađenja vazduha*: karakteristike glavnih zagađivača, uticaj zagađivača na okruženje (dugoročni uticaj daleko od izvora zagađivača, npr. kisele kiše – pokazano je da je uticaj vazdušnog saobraćaja relativno mali; promene na ozonskom omotaču; efekat staklene bašte),
3. *Buka vazduhoplova*: motivacija za regulaciju, kontrolisanje i monitorisanje buke je veoma visoka; razvijene su različite vremenski i prostorno-bazirane procedure za smanjenje buke (procedure za poletanje i sletanje); planiranje i kontrola iskorišćenja zemljišta u okolini aerodroma su postala važna pitanja; novi tipovi vazduhoplova opremljeni tišim motorima (smanjenje nivoa buke, kao i smanjenje prostornog rasprostiranja buke oko aerodroma).
4. *Pitanje bezbednosti* ima najviši prioritet u vazdušnom saobraćaju. Ovo pitanje se uglavnom „rešava“ procenom rizika od nesreće i poređenjem sa troškovima alternativnih mera bezbednosti. Rizik se meri verovatnoćom događaja čije posledice mogu biti manje ili više ozbiljne povrede, oštećenja i/ili gubici. Procena rizika se bazira na objektivno ili subjektivno poznatim ili pretpostavljenim verovatnoćama.
5. *Zagušenja i kašnjenja* mogu imati različit uticaj na različite grupe:
  - ◆ Aerodromi: ograničen rast aerodroma, što može uticati na gubitak prihoda aerodromskih operatera i vlasti;



- ◆ Avio-kompanije: umanjen rast kompanije, što može uticati na rast operativnih troškova, i samim tim na gubitke u poslovanju (prihoda, profita i zaposlenost), i okrenuti korisnike nekom drugom vidu transporta;
- ◆ Putnici: zagušenja i kašnjenja mogu dovesti do gubitka produktivnosti, posebno za poslovne putnike;
- ◆ Turizam: mogu izazvati gubitak prihoda usled ograničenog rasta, kao i gubitak potencijalnih poslova;
- ◆ Zapošljavanje: usled ograničenog rasta, može se obezbediti manji broj radnih mesta;
- ◆ Biznis i industrija: gubitak prihoda, veći operativni troškovi, transfer uspešnih poslovnih aktivnosti na atraktivnije lokacije;
- ◆ Vlasti: umanjen prihod od taksi i naknada, što bi dovelo do gubitka očekivanih prihoda;
- ◆ Proizvođači vazduhoplova: usled zagušenja može se promeniti broj naručenih vazduhoplova.

## **PRILOG II.2**

### **VAZDUŠNI SAOBRAĆAJ I ODRŽIVI RAZVOJ**

**(Haan, 2007)**

Tabela II.2. Predloženi indikatori održivog razvoja: društveni aspekt (*People*), ekološki (*Planet*) i ekonomski aspekt (*Profit*) - INFRAS i EEA

	People	Planet	Profit
European Union	Basic access and development needs of individuals and societies being met	Consistent with ecosystem health	Basic access and development needs of companies being met
	Safe	Limits emissions and waste within the planet's ability to absorb them	Affordable operation
	Consistent with human health	Uses renewable resources at or below their rates of generation	Efficient operation
	Promises equity within and between generations	Uses non-renewable resources at or below the rate of development of renewable substitutes	Supports a competitive economy
	Fair operation	Low impact on land	Supports balanced regional developments
	Offers choice	Low noise generation	
INFRAS	Accessibility of remote areas	Energy efficiency	Job creation and growth contribution
	Safety  Local and National participation of people in decision making	Climate change	Access and travel time speed
		Noise	Global productivity
		Air pollution	Regional and local market changes
		Land use	Cost recovery of infrastructure costs

Tabela II.3. Pregrupisani indikatori iz Tabele II.2 (tako da donosioci odluka dobiju potrebne informacije o svim aspektima održivog razvoja u vazduhoplovstvu)

People	Planet	Profit
<p><b>PE1</b> Basic access and development needs of individuals and societies being met</p> <p>Accessibility of remote areas</p>	<p><b>PL1</b> Consistent with ecosystem health</p> <p>Limits emissions and waste within the planet's ability to absorb them</p> <p>Climate change</p> <p>Air pollution</p>	<p><b>PR1</b> Basic access and development needs of companies being met</p> <p>Supports a competitive economy</p> <p>Job creation and growth contribution</p> <p>Access and travel time speed</p> <p>Global productivity</p>
<p><b>PE2</b> Safe Safety</p>		
<p><b>PE3</b> Consistent with human health</p>	<p><b>PL2</b> Uses renewable resources at or below their rates of generation</p> <p>Uses non-renewable resources at or below the rate of development of renewable substitutes</p> <p>Energy efficiency</p> <p><b>PL3</b> Low impact on land</p> <p>Land use</p> <p><b>PL4</b> Low noise generation</p> <p>Noise</p>	<p><b>PR3</b> Efficient operation</p>
<p><b>PE4</b> Promises equity within and between generations</p>		<p><b>PR4</b> Cost recovery of infrastructure costs</p>
<p><b>PE5</b> Fair operation Offers choice Local and National participation of people in decision making</p>		<p><b>PR5</b> Supports balanced regional developments Regional and local market changes</p>

Tabela II.4. Ciljevi, odabrani pokazatelji vrednosti određenog indikatora i jedinice mera

	Code	Objective	Proxy	Unit
People	PE1-1	Higher capacity coverage	Possible air travel capacity of the system compared to air travel demand	Compared to 1999 levels
	PE1-2	Higher area coverage	Possible coverage of area reachable by air transport compared to base case	Compared to 1999 levels
	PE2-1	Less fatalities	Number of fatalities per year	#/year
	PE2-2	Less incidents	Number of incidents per year	#/year
	PE3-1	Less fuel use	Total amount of necessary aircraft fuel to fulfill the yearly market demand for air travel	Ton/year
	PE3-2	Less emissions	Change in exhaust of the hazardous substances CO <sub>2</sub> and NO <sub>x</sub>	Compared to 1999 levels
	PE-4	Satisfy PE1-1 PE1-2, PE2-1, PE2-2, PE3-1, PL1-3 and PL4-1 all together		Yes/No
	PR2-1	Lower ticket price	Change in direct operating costs	Compared to 1999 levels
	PR4-1	More airlines	Number of airlines in operation	Compared to 1999 levels
	PR4-3	More alternative transport modes	For continental flights: number of alternative transport modes	Increase/decrease
Planet	PE3-1	Less fuel use	Total amount of necessary aircraft fuel to fulfill the yearly market demand for air travel	Ton/year
	PE3-2	Less emissions	Change in exhaust of the hazardous substances CO <sub>2</sub> and NO <sub>x</sub>	Compared to 1999 levels
	PL1-1	Less contribution to climate change	Degrees change (compared to 1999) in overall temperature due to aviation activities	Δ°C
	PE3-3	Local air quality	Air quality	Compared to 1999 levels
	PL2-1	Less aluminum use	Aluminum use by aviation industry	Compared to 1999 levels
	PL2-2	Less use of other metals	Metal use (non aluminum) by the aviation industry	Compared to 1999 levels
	PL2-3	Less use of non-ferro materials	Plastic use by the aviation industry	Compared to 1999 levels
	PL3-1	Less land use	Land use	Compared to 1999 levels
	PL4-1	Less noise generation	Noise	Compared to 1999 levels
Profit	PE1-1	Higher capacity coverage	Possible air travel capacity of the system compared to air travel demand	Compared to 1999 levels
	PE1-2	Higher area coverage	Possible coverage of area reachable by air transport compared to base case	Compared to 1999 levels
	PR2-1	Lower ticket price	Change in direct operating costs	Compared to 1999 levels
	PR3-1	Less fuel use	Total amount of necessary aircraft fuel to fulfill the yearly market demand for air travel	Ton/year
	PR3-2	Less gate occupation time	Average occupation times of gates at airports per aircraft type	Compared to 1999 levels
	PR4-1	More airlines	Number of airlines in operation	Compared to 1999 levels
	PR4-3	More alternative transport modes	For continental flights: number of alternative transport modes	Increase/decrease
	PR5-1	More local airports	Number of airfields worldwide	Compared to 1999 levels
	PR5-2	Higher spreading of airports around the world	Spreading of airfields between developed and developing countries (0% = all airports in developed countries)	Compared to 1999 levels

## **PRILOG II.3**

### **METODOLOGIJA ZA PROCENU ODRŽIVOSTI VAZDUHOPLOVNOG TRANSPORTNOG SISTEMA**

- **Indikatori kategorisani po različitim korisnicima/učesnicima sistema -  
(Janić, 2002)**

Tabela II.5. Sistem indikatora za korisnike

Table 1A. The Indicator System for Users

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Operational</i>	<i>Experienced punctuality of service</i>	- Flights carried out on time - Delay of air trip	- Percent of flights on time - Average delay per flight	- Total number of flights per period of time - Total number of flights per period of time
	<i>Experienced unreliability of service</i>	- Cancellation and/or diversion of flights	- Percent of cancelled (or diverted) flights	- Total number of flights per period of time
	<i>Lost and damaged baggage</i>	- Lost and/or damage of baggage	- Average number of lost (or damaged) baggage per passenger	- Total number of passenger served per period of time
<i>Economic</i>	<i>Safety</i>	- Perceived risk of death (or injury) during air trip	- Average number of deaths (injuries) per RPK/RPM	- Total RPK/RPM per period of time
	<i>Security</i>	- Perceived risk of treat by illegal dangerous devices	- Average number of detected dangerous devices per passenger	- Total number of screened passengers per period of time
	<i>Economic convenience</i>	- Generalised travel cost	- Average airfare per passenger	- Period of time
<i>Social</i>	<i>Spatial convenience</i>	- Number of destinations served by an airline from given airport	- Number of destinations per airport and airline	- Period of time
<i>Environmental</i>	<i>Comfort and health</i>	- Comfort at airport terminal crowding (passenger density)	- Average number of passengers per unit of terminal area - Average queuing time per passenger	- Total number of passengers served per period of time - Total number of passengers served per period of time - Period of time
		- Quality of air in aircraft - Seat configuration in aircraft	- Quantity of fresh air delivered to aircraft cabin per unit of time - Average number and size of seats in economy class	- Period of time

RPK/RPM — Revenue Passenger-Kilometre or Revenue Passenger Mile

Tabela II.6. Sistem indikatora za aerodrome

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Operational</i>	<i>Demand</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Number of WLU</li> <li>- Number of ATM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Number of WLU accommodated per period of time</li> <li>- Number of ATM accommodated per period of time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Period of time</li> <li>- Period of time</li> </ul>
	<i>Capacity</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximum number of WLU</li> <li>- Maximum number of ATM</li> <li>- Delay of ATM or WLU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximum number of WLU per unit of time</li> <li>- Maximum number of ATM per unit of time</li> <li>- Average delay per ATM (WLU)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Period of time</li> <li>- Period of time</li> </ul>
	<i>Quality of service</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Substitution of air services by adequate surface services</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Percent of substituted flights</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Total number of ATM or WLU per period of time</li> </ul>
	<i>Integrated service</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operating profits</li> <li>- Output per employee</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Average earnings per WLU</li> <li>- Average number of WLU or ATM per employee</li> <li>- Average quantity of energy per WLU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Total number of shot haul flights per period of time</li> <li>- Total WLU per period of time</li> <li>- Total number of employees per period of time</li> <li>- Total WLU per period of time</li> </ul>
<i>Economic Social</i>	<i>Profitability</i> <i>Labour productivity</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energy consumption for airport operation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Total area determined by given long-term noise level - <math>L_{eq}</math></li> <li>- Average quantity of air pollution per LTO cycle</li> <li>- Average quantity of waste per WLU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Total number of ATM per period of time</li> <li>- Total number of LTO cycles per period of time</li> <li>- Total WLU per period of time</li> </ul>
	<i>Energy inefficiency</i> <i>Noise inefficiency</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generation of long-term noise level</li> <li>- Emission of air pollutants by polluting events</li> <li>- Generation of waste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Number of WLU carried out per unit of land</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Total surface of land taken</li> </ul>
<i>Environmental</i>	<i>Land use inefficiency</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Land taken for airport infrastructure and its utilisation</li> </ul>		

WLU Workload Unit; ATM Air Traffic Movement (arrival or departure); LTO Landing/Take-Off



Tabela II.7. Sistem indikatora za ATM/ATC

Table 3A. The Indicator System for Air Traffic Management/Air Traffic Control (ATM/ATC)

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure dependent variable	Independent variable
<i>Operational</i>	<i>Demand</i>	- Number of flights	- Number of controlled flights per period of time	- Period of time
	<i>Capacity</i>	- The maximum number of flights	- Maximum number of controlled flights per unit of time	- Period of time
	<i>Safety</i>	- Perceived risk of air traffic accident	- Average number of aircraft accidents or near midair collisions per flight	- Total number of flights per period of time
<i>Environmental</i>	<i>Punctuality of service</i>	- Traffic (flights) not delayed due to ATM/ATC restrictions - ATM/ATC delays	- Percent of non-delayed flights - Average delay per delayed flight	- Total number of flights per period of time - Total number of flights per period of time
	<i>Cost efficiency</i>	- Operating cost of ATM services	- Average cost per controlled flight	- Total number of flights per period of time
	<i>Labour productivity</i>	- Output per employee	- Average number of controlled flights per employee	- Total number of employees per period of time
	<i>Energy efficiency</i>	- Extra energy (fuel) consumption	- Average extra fuel consumed per flight	- Total number of flights per period of time
	<i>Air pollution efficiency</i>	- Extra air pollution	- Average extra emission of pollutants per flight	- Total number of flights per period of time

Tabela II.8. Sistem indikatora za vazduhoplovne kompanije

Table 4A. The Indicator System for Airlines

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Operational</i>	<i>Airline size</i>	- Total transport work carried out - Number of passengers served - Volume of freight transported	- Volume of output—RTK/RTM—per period of time - Number of passengers per period of time - Volume of freight per period of time - RTK/RTM or ATK/ATM	- Period of time - Period of time - Period of time - Total ATK/ATM per period of time - Total number of flights per period of time - Total number of flights per period of time - Total number of flights per period of time - Total RTK/RTM or FH per period of time
	<i>Load factor</i>	- Utilisation of available capacity		
	<i>Operational punctuality</i>	- On-time flights - Length of delays	- Percent of on-time flights - Average delay per flight	
	<i>Unreliability of service</i>	- Cancelled (or diverted) flights	- Percent of cancelled (or diverted) flights	
	<i>Safety</i>	- Risk of aircraft accident/incident	- Average number of aircraft accidents or incidents per RTK/RTM or FH	
<i>Economic</i>	<i>Profitability</i>	- Operating profits	- Average earnings per RTK/RTM	- Total RTK/RTM per period of time
	<i>Labour productivity</i>	- Output per employee	- Average number of RTK/RTM per employee	- Total number of employees per period of time
<i>Environmental</i>	<i>Energy efficiency</i>	- Energy (fuel) consumption	- Average fuel consumption per RTK/RTM, D, or FH	- Total RTK/RTM, D, or FH per period of time
	<i>Air pollution efficiency</i>	- Emission of air pollutants	- Average air pollution per RTK/RTM, D or FH	- Total RTK/RTM, D, or FH per period of time
	<i>Noise efficiency</i>	- Use of aircraft of Stage 3 and 4 in the fleet	- Percent of aircraft of Stage 3 and 4 type in the fleet	- Total number of aircraft in the fleet per period of time
	<i>Waste efficiency</i>	- Generation of in-flight waste	- Average quantity of in-flight waste per RTK/RTM	- Total RTK/RTM per period of time

RTK/RTM Revenue Ton-Kilometre or Revenue Ton-Mile;; ATK/ATM Available Ton-Kilometre or Available Ton-Mile; D Distance flown; FH Flying Hours

Tabela II.9 Sistem indikatora za vazduhoplovnu industriju

Table 5A. The Indicator System for Aerospace Manufacturers

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Operational</i>	<i>Innovations of aircraft</i>	- New aircraft in terms of technical productivity and cost efficiency	- Average technical productivity per aircraft - Average cost per unit of capacity—ASK/ASM	- Period of time - Aircraft capacity seats
	<i>Innovations of ATM/ATC and airport facilities and equipment</i>	- New ATM/ATC and airport facilities and equipment	- Cumulative aircraft position error - Capacity of airport facilities and equipment	- Period of time - Period of time
<i>Economic</i>	<i>Reliability of structures</i>	- Failures of the system components	- Average number of failures per unit of time	- Total operating time
	<i>Profitability</i>	- Operating profits	- Average earnings per unit sold	- Total number of units sold per period of time
<i>Environmental</i>	<i>Labour productivity</i>	- Output per employee	- Average number of units produced per employee	- Total number of employees per period
	<i>Energy efficiency</i>	- Reduction of fuel consumption of new engines and aircraft	- Percent of reduction of fuel consumption per unit of engine power or aircraft operation weight	- Total engine power or aircraft operating weight
	<i>Air pollution efficiency</i>	- Reduction of air pollution of new engines and aircraft	- Percent of reduction of air pollution per unit of engine power or aircraft operating weight	- Total engine power or aircraft operating weight
	<i>Noise efficiency</i>	- Reduction of noise of new engines and aircraft	- Percent of reduction of noise per unit of engine power or aircraft operating weight	- Total engine power or aircraft operating weight

ASK/ASM Aircraft Seat Kilometre or Aircraft Seat Mile

Tabela II.10. Sistem indikatora za članove lokalne zajednice

Table 6A. The Indicator System for Local Community Members

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Social</i>	<i>Social welfare</i>	- Relationship between employment by ATS and total local employment	- Proportion of ATS employees in total local employment	
<i>Environmental</i>	<i>Noise disturbance</i>	- Annoyance of local people by noise	- Total number of complaints to noise by community people per period of time	- Total number of local employees per period of time
	<i>Air pollution</i>	- Exposure of local people to air pollution generated by ATS	- Average number of complaints per ATM	- Total number of ATM per period of time
	<i>Safety</i>	- Perceived risk of death or injury and/or damage or loss of community property due to aircraft accident	- Proportion of ATS air pollution in total air pollution in the community	- Total number of ATM per period of time - Total air pollution in the region per period of time

ATM Air Transport Movement (arrival or departure); ATS Air Transport System

Tabela II.11. Sistem indikatora za lokalnu i centralnu vlast

Table 7A. The Indicator System for Local and Central Government

Dimension of performance	Indicator	Explanation	Measure—dependent variable	Independent variable
<i>Economic</i>	<i>Economic welfare</i>	- Contribution of ATS to GDP	- Proportion of GDP by ATS in total GDP	- Total GDP per period of time
	<i>Internalisation and globalisation</i>	- Use of ATS for long- distance business (trade and trips) and tourism	- Proportion of business trips (or trade) by ATS by total number of long- distance business trips (or total trade)	- Total number of long-distance business trips (total trade) per period of time
<i>Social</i>	<i>Externalities</i>	- Total cost of the environmental damage (noise, air pollution, congestion, accidents and incidents)	- Proportion of tourist trips by ATS in total number of long-distance tourist trips	- Total number of long- distance tourist trips per period of time
	<i>Overall social welfare</i>	- Total direct and indirect employment	- Average expenses per period of time	- Period of time
<i>Environmental</i>	<i>Global energy efficiency</i>	- Total energy consumption by ATS	- Total number of the ATS employees per period of time	- Period of time
	<i>Global noise disturbance</i>	- Peoples exposure to ATS noise in the region or country	- Average energy consumption per RTK/RTM	- Total RTK/RTM per per period of time
	<i>Global air pollution</i>	- Global air pollution in the region or country	- Total number of exposed people to ATS noise per period of time	- Period of time
	<i>Global land use</i>	- Land used for regional and/or national ATS infrastructure	- Total ATS air pollution per period of time	- Period of time
			- Area of land for ATS infrastructure per RTK/RTM	- Total RTK/RTM per per period of time















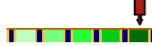





















RTK/RTM Revenue Passenger Kilometre or Revenue Passenger Mile; ATS Air Transport System

## **PRILOG II.4**

### **INDIKATORI ZA UPRAVLJANJE ODRŽIVOŠĆU U VAZDUHOPLOVNOM TRANSPORTNOM SISTEMU**

**(Celikel et al, 2005)**

Tabela II.12. Klasifikacija indikatori po učesnicima, domen i kvalitativna procena

Stakeholder	Social	Environmental	Economic
<i>ANSPs</i>	Accidents per total number of flights  	Flight efficiency (extra distance flown)  	Total cost per kilometre controlled (capacity + delay)  
<i>Engine Aircraft Manufacturers</i>	Number of jobs  	Average fuel flow for a selected aircraft family  	Operating profit margin  
<i>Civil airspace users</i>	Noise: Total QC of the EU fleet  	Total fuel burn  	Operating profit margin   
<i>Military airspace users</i>	Percentage of en route delays due to military activities   	Total fuel sold to military aircraft operations <b>?</b>	Military fuel cost in defence budget <b>?</b>
<i>Airport</i>	Number of jobs  	(SOPHOS Airport Energy Indicator can replace this) <b>?</b>	Operating profit margin  
<i>Passengers</i>	Number of destinations & total number of flights  	CO <sub>2</sub> per passenger kilometer  	Ticket fares (Air Transport Price Index)  
<i>Citizens</i>	People exposed above 55 Lden  	Share of aviation CO <sub>2</sub> in total CO <sub>2</sub>  	Wage bill <b>?</b>

## **PRILOG II.5**

**SISTEM INDIKATORA ZA OCENU ODRŽIVOG RAZVOJA AERODROMA  
(Janić, 2010)**



U radu Janić (2010) predložen je sistem indikatora za monitorisanje, analizu i procenu održivog razvoja datog aerodroma. Predloženi sistem indikatora sadrži 12 indikatora: 4 za operativne performanse, 2 za ekonomske, 1 za društvene i 5 za ekološke performanse, i to su:

### Indikatori operativnih performansi aerodroma

Glavnim indikatorima operativnih performansi jednog aerodroma mogu se smatrati:

- ◆ Potražnja - ukazuje na „razmeru“ operacija aerodroma, kao npr: broj operacija vazduhoplova, broj putnika i obim tereta, opsluženih tokom određenog vremenskog perioda (sat, dan, godina). U nekim situacijama se koriste jedinica radnog opterećenja – WLU (*workload unit* = 1 putnik ili 100 kg tereta), kao ukupna mera za putnike i obim tereta. Sa aspekta aerodromskog operatera poželjna je što veća potražnja.
- ◆ Kapacitet ukazuje na sposobnost aerodroma da se prilagodi određenom obimu potražnje pod određenim uslovima. Mogu se koristiti dve mere: kapacitet vazdušne strane, u smislu maksimalnog broja operacija, i zemaljske strane u smislu maksimalnog broja WLU opsluženih tokom datog perioda vremena (čas, dan, godina). Oba kapaciteta mogu biti izražena kao „maksimalni“ ili „praktični“ kapacitet. Za oba kapaciteta se teži da budu što veći i da rastu sa porastom potražnje.
- ◆ Kvalitet usluge ukazuje na odnos između potražnje i kapaciteta aerodroma. Prosečno kašnjenje po operaciji ili WLU (do kojeg dolazi kada potražnja pređe kapacitet), može se koristiti kao mera za koju se teži da ima što je moguće manju vrednost, koja opada sa povećanjem potražnje.
- ◆ Integrirana intermodalna usluga je indikator, koji može biti relevantan za one aerodrome koji su povezani sa zemaljskim regionalnim, nacionalnim i međunarodnim transportnim mrežama. Ovi aerodromi imaju mogućnost da

poboljšaju iskorišćenje sopstvenog kapaciteta zamenom nekih od kratkolinijskih letova sa adekvatnom zemaljskom uslugom, npr. konvencionalnom ili brzom železnicom, sa jedne strane, i korišćenjem oslobođenih slotova za profitabilnije dugolinijske letove. Ovaj indikator može npr. predstavljati odnos između broja zamenjenih letova i ukupnog broja potencijalno zamenljivih letova sprovedeno tokom datog perioda vremena (godina). Ovaj odnos bi trebao da bude što veći i da raste sa porastom broja zamenljivih letova.

### Indikatori ekonomskih performansi

Za dati aerodrom kao preduzeće, profitabilnost i produktivnost rada mogu biti dobri indikatori ekonomskih performansi:

- ◆ *Profitabilnost* obično reflektuje aerodromski finansijsko-poslovni uspeh. Meri se „operativnim“ profitom, tj. razlikom između „operativne“ zarade i „operativnih“ troškova po jedinici aerodromskog izlaza – WLU (Doganis, 1992). Za ovu meru se teži da ima što veću vrednost i da raste sa porastom aerodromskog „izlaza“.
- ◆ *Produktivnost rada* ukazuje na efikasnost radnika na datom aerodromu. Kao mera produktivnosti često se koristi broj opsluženih WLU (ili broj operacija) po zapošljenom radniku, tokom datog perioda vremena (godina). Za ovu meru se teži da ima što višu vrednost i da raste sa porastom broja zapošljenih.

### Indikatori društvenih performansi

Indikatorom društvenih performansi smatra se i direktno i indirektno zapošljavanje od strane datog aerodroma. Ovaj indikator može biti predstavljen preko uzročnih odnosa između ukupnog broja zapošljenih na i oko datog aerodroma i godišnjeg obima saobraćaja na aerodromu.

### Indikatori ekoloških performansi

Indikatori ekoloških performansi povezani su sa uticajem aerodroma na zdravlje lokalnog stanovništva i životnu sredinu:

- ◆ Energetska efikasnost vezana je za ukupnu energiju koja se koristi od strane datog aerodroma tokom posmatranog perioda vremena (godina). Energija, dobijena iz različitih izvora, koristi se za osvetljenje i grejanje. Mera za ovaj indikator je energija potrošena po jedinici aerodromskog „izlaza“ – WLU, tokom datog perioda vremena (godina). Teži se da vrednost ove mere bude što niža i da se smanjuje sa povećanjem obima aerodromskog „izlaza“.
- ◆ Efikasnost buke odnosi se na energiju buke generisanu kretanjem vazduhoplova tokom određenog vremenskog perioda. Neke od mera za ovaj indikator su površina, izražena u  $\text{km}^2$ , izložena dugoročno ekvivalentnom nivou buke  $L_{eq}$  (u decibelima – dB(A)), populacija i broj domaćinstava izloženih pomenutoj buci u dužem periodu. Vrednost ovog indikatora treba da bude što niža i da se smanjuje sa povećanjem broja operacija.
- ◆ Efikasnost zagađenja vazduha vezana je za ukupno zagađenje vazduha generisano operacijama određenog aerodroma. Može se uzeti u obzir skup svih ili samo određenih zagađivača. Pored zagađivača generisanih vazдушnim saobraćajem, moraju se uzeti u obzir i zagađivači od zemaljskog (drumskog) saobraćaja u prilazu aerodromu, kao i od operacija opsluživanja na samom aerodromu. Generalno, suma zagađivača vazduha po događaju – LTO (*landing/take-off*) ciklusu - može se koristiti kao standardna mera preporučena od strane ICAO-a. Zagađenje koje nije direktno vezano za LTO ciklus može se „vezati“ za određeni LTO ciklus. Teži se da vrednost ovog indikatora bude što niža i da opada sa povećanjem broja LTO ciklusa tokom određenog vremenskog perioda (godina).
- ◆ Efikasnost iskorišćenja zemljišta vezana je za iskorišćenje zemljišta zauzetog zgradama i operacijama na datom aerodromu – vazdušne i zemaljske strane. Jednom

kada je infrastruktura izgrađena, intenzitet korišćenja zauzetog zemljišta postaje zavisn od obima potražnje. Intenzitet je ograničen kapacitetom infrastrukture. Pogodna mera za ovaj indikator je obim WLU koje se opsluže tokom posmatranog vremenskog perioda (godina) po jedinici zauzetog zemljišta. Ova mera treba da ima što višu vrednost i da raste sa porastom površine zemljišta koje zauzima aerodrom.

- ◆ *Efikasnost otpada* vezana je za generisanje otpada od strane operacija na datom aerodromu, ne uzimajući u obzir otpad koji generišu avio-kompanije. Odgovarajuća mera za ovaj indikator je suma otpada generisanog po jedinici aerodromskog „izlaza“ (putnika i/ili WLU). Za ovu meru se teži da ima što nižu vrednost i da opada sa porastom „izlaza“ aerodroma tokom posmatranog vremenskog perioda (godina).

## **PRILOG II.6**

### **KLASIFIKACIJA INDIKATORA ODRŽIVOSTI U VAZDUŠNOM SAOBRAĆAJU I INDEKS ODRŽIVOSTI**

**(Lourenco i Pires, 2005)**

Tabela II.13. Klasifikacija indikatora održivosti

Types	Indicators
Economic	Domestic Product
	Total Income
	Per Capita Income
	Jobs (Primary, Secondary and Tertiary Sectors)
	Departure/Arrival Fees (Passengers)
	Landing and Take-off Fees (Aircrafts)
	Price of Air Ticket
	Unitary Production Cost
	Gains with Productivity
Social	Income Distribution
	Unemployment Rate
	Human Development Index
Environmental	Soil Fragmentation (Land Use and Occupation in Neighboring, Area, Airport Security Area)
	Noise (Exposition, Hearing Capacity Loss, Reduction of Sleeping Hours)
	Solid Waste
	Atmospheric Pollution (Particles and Emissions Causing Greenhouse Effect)
	Energy Consumption (Aircrafts, Vehicles for Airport Operation, Multimodal Integration Vehicles, Alternative Fuels)
Infrastructure	Accessibility (Duration of Journey, Distance)
	Mobility (Frequency, Speed)
	Intensity of Traffic (Aircraft Flow, Passenger Flow, Cargo Flow)
	Multimodal Integration (Services Offered, Safety, Efficiency)
	Transport Network Capacity

## Biografija

Tatjana Krstić Simić, dipl. ing. rođena je u Negotinu 1971. godine, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju "Predrag Kostić". Saobraćajni fakultet upisala je 1990. godine i diplomirala 1996. godine na Odseku za vazdušni saobraćaj sa diplomskim radom pod nazivom "Neprecizni instrumentalni prilaz na prag THR 11 na Aerodromu "Niš"". Magistrirala je na Saobraćajnom fakultetu na Odseku za vazdušni saobraćaj 2004. godine sa radom "Kompleksnost saobraćaja na manevarskim površinama aerodroma". Dobitnik je stipendije Vlade Republike Srbije i Ministarstva prosvete i sporta za najbolje studente dodiplomskih i posle diplomskih studija za 2001. godinu.

Od novembra 1996. zaposlena je na Saobraćajnom fakultetu na Katedri za aerodrome i bezbednost vazdušne plovidbe, prvo kao istraživač-talenat, od 1998. kao asistent pripravnik, a 2005. godine izabrana je u zvanje asistenta za užu naučnu oblast „Aerodromi i bezbednost vazdušne plovidbe“.

Tokom dosadašnjeg rada bila je angažovana na držanju vežbi iz sledećih predmeta: Kontrola letenja 1 i 2, Vazduhoplovna pristaništa 1 i 2, Robni transport u vazdušnom saobraćaju, Vazduhoplovna navigacija, Transportne mreže i Osnove vazdušnog saobraćaja.

Pored nastave bavila se i naučnim radom u oblasti kontrole letenja i upravljanja vazdušnim saobraćajem, održivim razvojem u vazdušnom saobraćaju, ljudskim faktorom u kontroli letenja, planiranjem i projektovanjem aerodroma. Do sada je saopštila na domaćim i međunarodnim konferencijama i skupovima 7 radova, dok su 2 rada objavljena u međunarodnim naučnim časopisima (*Fuzzy Sets and Systems* i *Journal of Air Transport Management*). Takođe, učestvovala je u izradi većeg broja naučno-istraživačkih i stručnih studija i projekata.

Redaktor je knjige: Miodrag Ilić, "Vazduhoplovna navigacija", Beograd 2008.

Udata je i ima dvoje dece.

Prilog 1.

## Izjava o autorstvu

Potpisana Tatjana Krstić Simić

Broj indeksa  /

### Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**UTICAJ KOMPLEKSNOSTI SAOBRAĆAJA NA MANEVARSKIM  
POVRŠINAMA NA ODRŽIVI RAZVOJ AERODROMA**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

**Potpis doktoranda**

U Beogradu, 30. 04. 2015.

Tatjana Krstić Simić



Prilog 2.

## Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Tatjana Krstić Simić

Broj indeksa  /

Studijski program  /

Naslov rada Uticaj kompleksnosti saobraćaja na manevarskim površinama na održivi razvoj aerodroma

Mentor dr Obrad Babić, redovni profesor

Potpisana Tatjana Krstić Simić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.04.2015.

Tatjana Krstić Simić

Prilog 3.

## Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

---

### UTICAJ KOMPLEKSNOSTI SAOBRAĆAJA NA MANEVARSKIM POVRŠINAMA NA ODRŽIVI RAZVOJ AERODROMA

---

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

U Beogradu, 30.04.2015.

Potpis doktoranda

*Valjanc Uršić Stanić*