Uticaj taktika upravljanja od strane kontrole letenja na efikasnost funkcionisanja aerodroma

TATJANA Ž. KRSTIĆ SIMIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd
OBRAD J. BABIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 656.7.05/.07
DOI: 10.5937/tehnika1504673K

Predmet istraživanja u ovom radu predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem na manevarskim površinama aerodroma, kao i vazдушnom prostoru u neposrednoj okolini aerodroma, od strane kontrole letenja, na efikasnost funkcionisanja aerodroma. U tu svrhu predložene su mere neefikasnosti obavljanja saobraćaja: vremenska, potrošnje goriva i emisije gasova. Izvršeni su eksperimenti za aerodrom pretpostavljene konfiguracije i saobraćajne potražnje, za različite taktike upravljanja od strane kontrole letenja, korišćenjem simulacionog modela SIMMOD. Dobijeni rezultati su analizirani i izvedeni su određeni zaključci.

Ključne reči: upravljanje vazдушnim saobraćajem, aerodromi, efikasnost

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 [1].

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 indirektno negativne uticaje na društvo i životnu sredinu. Direktne 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 vazdu-

šnog saobraćaja i usluge, kao i one od recikliranja određenih komponenata sistema [2].

Navedene činjenice o porastu vazdušnog saobraćaja i negativnim uticajima tog rasta, kao i potreba kontrolisanja datih uticaja, svakako čine veoma aktuelnom i značajnom svaku vrstu analize u cilju smanjenja negativnih uticaja 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, u Evropi vazdušni saobraćaj generiše 3,5% celokupne emisije CO₂, i ova emisija je u stalnom porastu, pri čemu je 0,2% emisije (celokupne) generisano usled neefikasnosti upravljanja vazдушnim saobraćajem od strane kontrole letenja [3].

Glavni istraživački projekti iz oblasti upravljanja vazдушnim saobraćajem (Air Traffic Management - ATM) u Evropi - Single European Sky ATM Research [4], 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 CO₂ od strane vazduhoplova za (prosečno) 10% po letu).

Usled porasta obima vazdušnog saobraćaja, broj letova značajno se povećao, kašnjenja su takođe pora-

Adresa autora: Tatjana Krstić Simić, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

Rad primljen: 17.04.2015.

Rad prihvaćen: 21.05.2015.

sla, 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 predmet istraživanja u ovom radu odabran je saobraćaj u sletanju i poletanju, sa detaljnom analizom kretanja vazduhoplova po manevarskim površinama aerodroma: poletno-sletnim i rulnim stazama.

Za aerodrome sa velikim intenzitetom saobraćaja tokom vršnih sati, kašnjenja u sletanju, vremena taksiranja u dolasku i odlasku, kao i kašnjenja u poletanju rastu, što uzrokuje dodatnu, nepotrebnu potrošnju goriva, emisiju gasova i vremensku neefikasnost. Do 2035. godine, kašnjenja na aerodromima će porasti sa 1 min/letu (u 2012. god) na 5-6 minuta/letu, pretvarajući ih tako od ne tako značajnog u glavnog doprinosioca kašnjenju [1]. Kako bi se to izbeglo, aerodromi se moraju ili proširiti, ili (s obzirom da proširenje nije moguće u velikom broju slučajeva) se njihovi postojeći resursi moraju što efikasnije koristiti.

Predmet istraživanja u ovom radu predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem na manevarskim površinama aerodroma, kao i vazdušnom prostoru u neposrednoj okolini aerodroma, od strane kontrole letenja, na mere performansi obavljanja saobraćaja na aerodromima. Naime, za datu (trenutnu ili planiranu) saobraćajnu potražnju, različite mere upravljanja saobraćajem mogu rezultirati različitom efikasnošću obavljanja saobraćaja na određenom aerodromu tj. različitom efikasnošću funkcionisanja aerodroma. U ovom istraživanju, pod efikasnošću obavljanja saobraćaja podrazumeva se da se upravljanje saobraćajem vrši na takav način, da negativni efekti obavljanja letova budu što manji, tj. da se letovi realizuju pod uslovima kao da su sami u sistemu (bez kašnjenja). Efikasnost obavljanja saobraćaja, definisana na ovaj način, od značaja je ne samo za funkcionisanje posmatranog aerodroma, već i za generisanje direktnih i indirektnih negativnih uticaja saobraćaja na društvo i životnu sredinu.

Kako bi se sagledao uticaj upravljanja, predložene su mere neefikasnosti obavljanja saobraćaja na aerodromima: vremenska neefikasnost i neefikasnost potrošnje goriva i emisije gasova. Cilj istraživanja bio je određivanje međusobne zavisnosti između taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, i efikasnosti obavljanja saobraćaja na aerodromu pretpostavljene konfiguracije manevarskih površina i pretpostavljenog intenziteta saobraćaja. Pored toga, analizirana je i međusobna zavisnost između predloženih mera neefikasnosti.

2. MERE NEEFIKASNOSTI LETA

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 manevarskim površinama aerodroma (najkraće rute, bez zadržavanja i kretanje optimalnim brzinama). Ovakvo letenje omogućilo bi najmanju potrošnju goriva i emisiju gasova, najniže nivoe generisane buke i najmanje ukupne negativne efekte na kvalitet vazduha. Ipak, ograničenja u realnim uslovima (kao npr. minimalno razdvajanje vazduhoplova, raspoloživi kapacitet itd) vodi do manje efikasnih profila leta i putanja taksiranja po manevarskim površinama aerodroma i, samim tim, do negativnih efekata na životnu sredinu koji bi bili veći od onih koji bi nastali u slučaju „idealnih” letova.

ATM može imati značajnu ulogu u smanjenju uticaja vazdušnog saobraćaja na životnu sredinu. 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 kakvo odstupanje 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. Uvedena je mera neefikasnosti – „Inefficiency Metric” (IM), koja pruža informaciju o razlici između stvarnih (Stvr.v.) i optimalnih vrednosti (Opt. v.) analiziranih parametara i data je izrazom [5]:

$$IM (\%) = ((\text{Stvr. v.} - \text{Opt. v.}) / \text{Opt. v.}) \times 100 \quad (1)$$

U ovom istraživanju, za ocenu uticaja načina upravljanja od strane kontrole letenja na efikasnost aerodroma odabrani su: vreme koje vazduhoplovi dodatno provedu u sistemu usled kašnjenja, gorivo koje potroše, kao i količina emitovanih gasova. Mere vremenske neefikasnosti – Time Inefficiency (TI), neefikasnosti sa aspekta potrošnje goriva - Fuel Inefficiency (FI) i emisije gasova - Emission Inefficiency (EI), definisane su na osnovu formule (1), 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. 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.

2.1 Vremenska neefikasnost

Vremenska neefikasnost TI leta i određuje se po formuli:

$$TI_i = \frac{\sum_j T_{ij} - \sum_j T_{opt_{ij}}}{\sum_j T_{opt_{ij}}} \times 100 \quad j = 1, \dots, m_i \quad (2)$$

gde je:

T_{ij} - stvarno vreme koje posmatrani let i provede u fazi leta j ,

T_{optij} - optimalno vreme, tj. 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_{optij} mogu se odrediti i kašnjenja vazduhoplova, kao ukupno kašnjenje svih posmatranih vazduhoplova, prosečno kašnjenje vazduhoplova u poletanju ili sletanju itd.

2.2 Neefikasnost potrošnje goriva i emisije gasova

U ovom istraživanju, korišćene su vrednosti potrošnje goriva i odgovarajuće emisije gasova (za ugljen dioksid - CO₂, vodenu paru - H₂O, ugljen monoksid - CO, ugljovodonike - HC, azot okside - NO_x, benzen i sumpor okside - SO_x) u različitim fazama leta koje su date u ICAO-ovoj bazi podataka emisije motora vazduhoplova - Aircraft Engine Emissions Databank [6], i u EUROCONTROL-ovoj bazi podataka koja je (u ovom slučaju) preuzeta iz modela AEM3 - Advanced Emission Model (bazirana na BADA bazi podataka [7]).

Potrošnja goriva i emisija gasova vazduhoplova unutar posmatranih granica sistema zavisi od tipa vazduhoplova, tipa motora vazduhoplova, faze(a) leta i vremena provedenog u određenoj fazi(ama) leta. Pomoću jednačina (3) - (7), prikazan je način određivanja potrošnje goriva i emisije gasova, kako u pojedinim fazama leta, tako i za sve posmatrane faze leta, koje su potom korišćene za određivanje neefikasnosti potrošnje goriva (FI) i emisije gasova (EI).

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

$$TF_i = \sum_j FB_{ij} = \sum_j (T_{ij} \times N_i \times FBI_{ij}) \quad (3)$$

$j = 1, \dots, m_i$

gde je:

FB_{ij} - potrošnja goriva tokom određene faze j leta i (u kg),

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

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).

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

Za određivanje emisije HC, CO i NO_x:

$$E_{ijk} = T_{ij} \times N_i \times EI_{ijk} \quad (4)$$

gde je:

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

Za određivanje emisije CO₂, H₂O i SO_x:

$$E_{ijk} = w_k \times FB_{ij} \quad (5)$$

gde je:

w_k - faktor multipliciranja potrošenog goriva u datoj fazi leta j na letu i za određeni gas k ;

Za određivanje emisije benzena:

$$E_{ijbenzen} = 2,372 \times N_i \times E_{ijHC} \quad (6)$$

gde je:

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

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

$$TE_i = \sum_j \sum_k E_{ijk} \quad k = 1, \dots, l; j = 1, \dots, m_i \quad (7)$$

gde je:

l - ukupan broj posmatranih gasova (zagađivača).

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:

$$FI_i = ((TF_i - TF_{opt_i}) / TF_{opt_i}) \times 100 \quad (8)$$

gde je:

TF_i - ukupno potrošeno gorivo na letu i tokom posmatranih faza leta j (jednačina 3),

TF_{opt_i} - optimalna količina goriva koja bi bila potrošena na letu i (tokom posmatranih faza leta j).

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

$$EI_i = ((TE_i - TE_{opt_i}) / TE_{opt_i}) \times 100 \quad (9)$$

gde je:

TE_i - ukupna emisija gasova za sve posmatrane gasove k tokom faza leta j na letu i (jednačina 7),

TE_{opt_i} - optimalna količina posmatranih gasova k koja bi bila emitovana na letu i (tokom posmatranih faza leta j).

3. EKSPERIMENTI

Kako bi se ispitao uticaj primene različitih taktika upravljanja saobraćajem na mere efikasnosti sistema,

urađeni su određeni simulacioni eksperimenti, za pretpostavljenu konfiguraciju manevarskih površina aerodroma i pretpostavljeni saobraćaj.

3.1. Ulazni podaci

Konfiguracija aerodroma

Primenom simulacionog modela SIMMOD (Verzija 8.1), modeliran je aerodrom sa jednom poletno-sletnom stazom (PSS) i rulnom stazom (RS) paralelnom sa PSS (slika 1). Data konfiguracija manevarskih površina odabrana je kao konfiguracija koja omogućuje veliki protok saobraćaja i za koju kontrola letenja ima mogućnost da na taktičkom nivou organizuje saobraćaj na više različitih načina.

Granice sistema koji je razmatran

Sistem analiziran u ovom istraživanju obuhvata manevarske površine aerodroma kao i vazdušni prostor u neposrednoj okolini aerodroma.

Vazduhoplovi u sletanju se u sistemu pojavljuju u tački završnog prilazanja (u daljem tekstu tačka FAF –

Final Approach Fix), koja se nalazi u produžetku ose PSS i to na 5 NM od praga PSS na koji se sleće.

Međutim, prilikom određivanja mera neefikasnosti, uzima se u obzir i kašnjenje sletanja u prilazu, koje se vazduhoplovima dodeljuje pre stizanja u tačku FAF (vazduhoplovi u sletanju u tačku FAF dolaze već dovoljno razdvojeni, uglavnom od strane prilazne kontrole letenja), jer su data kašnjenja generisana usled razdvajanja vazduhoplova u prilazu i sletanju, pa se kao takva trebaju uzeti u obzir prilikom razmatranja efikasnosti funkcionisanja sistema.

Vazduhoplovi u poletanju se u sistemu pojavljuju u momentu kada traže dozvolu da krenu na poletanje.

U momentu kada vazduhoplov krene da rula ka poziciji za čekanje na poletanje, smatra se da se on odmah nalazi na početku RS na izlasku sa platforme, tj. ne uzima se u obzir vreme kretanja vazduhoplova po platformi od parking pozicije do izlaska na RS (kretanje po platformi se ne razmatra).

Slika 1 - Aerodrom sa jednom PSS i rulnom stazom paralelnom sa PSS

Taktike upravljanja saobraćajem u eksperimentima

Analizirana su dva scenarija, tj. dve taktike koje kontrola letenja može primeniti za iskorišćenje postojeće infrastrukture:

1) Taktika u kojoj sletanja imaju prioritet (Arrivals priority – AP), prilikom zauzimanja PSS - u daljem tekstu Scenario 1. Sekvenca vazduhoplova u dolasku određena je na osnovu momenata kada se vazduhoplovi pojavljuju u sistemu u tački FAF tj. po pravilu “Prvi došao – prvi opslužen” (First Come – First Served - 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 sa kojeg vazduhoplov poleće (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.

2) Taktika pri kojoj se poletanje umeće između dva sletanja: Sletanja-poletanja (Arrival-departure - A/D), prilikom zauzimanja PSS - u daljem tekstu Scenario 2. 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.

Struktura i karakteristike saobraćaja

Intenzitet saobraćaja:

Vazduhoplovi se pojavljuju u sistemu na slučajan način, pri čemu međuvreme nailaska između dva vazduhoplova (i za sletanja i za poletanja) ima ravnomernu raspodelu od 1 do 3 minuta - R(60s, 180s). Ovaj intenzitet saobraćaja treba da ilustruje obim saobraćaja koji će dovesti do zagušenja sistema, tj. do značajnih kašnjenja vazduhoplova.

Tip operacija (sletanja ili poletanja) i tip vazduhoplova:

Tip operacija i tip vazduhoplova su dodeljivani prethodno generisanim vazduhoplovima na slučajan način (odnos sletanja / poletanja: 50/50% i odnos heavy / large* vazduhoplovi: 25/75%).

*Podela vazduhoplova po FAA-u [8]

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 prikazano je u tabeli 1:

Tabela 1. Razdvajanje vazduhoplova u prilazu

Vodeći/prateći	heavy	large
heavy	4 NM	5 NM
large	3 NM	3 NM

Zauzetost PSS nakon sletanja vazduhoplova (u zavisnosti od tipa vazduhoplova i izlaznice na kojoj vazduhoplov napušta PSS) prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2. Zauzetost PSS nakon sletanja

Tip a/c / izlaznica	Izlaznica 1	Izlaznica 2	Izlaznica 3
heavy	-	47s	60,5s
large	41s	53s	-

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: 120 s – ukoliko je vodeći vazduhoplov tipa *heavy*, odnosno 90 s ukoliko je vodeći vazduhoplov tipa *large*.

Vrednosti indikatora neefikasnosti

Kašnjenja, potrošnja goriva i emisija gasova određivani su za sledeće faze leta: čekanje vazduhoplova u vazduhu, prilaz, sletanje, poletanje, penjanje, taksiranje u dolasku i odlasku i čekanje na manevarskim površinama, na način opisan u Poglavlju 2.

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) – takođe sa učešćem 50/50%.

Izvedeni su stohastički eksperimenti u simulacionom modelu SIMMOD kako bi se odredio domen vrednosti za razmatrane mere neefikasnosti, za date 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.

Pošto je svrha eksperimenata bila samo da ilustruje uticaj promene načina upravljanja saobraćajem na mere neefikasnosti, po 6 iteracija za oba scenarija 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.

3.2 Rezultati eksperimenata i diskusija

U ovom poglavlju prikazani su i diskutovani dobijeni rezultati eksperimenata sprovedenih za analizirane Scenarije 1 i 2, za pretpostavljeni intenzitet saobraćaja i konfiguraciju manevarskih površina.

U tabeli 3 prikazane su vrednosti prosečnog broja opsluženih vazduhoplova, prosečnog ukupnog kašnjenja i kašnjenja po vazduhoplovu, dobijene za dve različite taktike sekvenciranja vazduhoplova. 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 3 može se videti da taktika sekvenciranja A/D daje manja prosečna kašnjenja za veći protok sistema (A/D taktika: prosečno kašnjenje po opsluženom vazduhoplovu je 2,84 min za 46,83 opsluženih vazduhoplova; AP taktika: prosečno kašnjenje po opsluženom vazduhoplovu je 4,39 min za 39,17 opsluženih vazduhoplova).

Tabela 3. Kašnjenja vazduhoplova - Scenario 1 vs. Scenario 2

ATC taktite / scenariuo	Tip operacije	Pros. Br. Opsluženih u a/c u 1. satu	Pros. Ukup. Kaš. a/c opsluženih u 1. satu	Prosečno kaš. Po a/c opsl. U 1. satu	Prosečan br a/c u sistemu 1. satu	Pros. Ukup. Kaš. a/c u sistemu u 1. satu	Pros. Kaš. Po a/c u sistemu u 1. satu
AP Scenario 1	Ukupno	39,17	172 min	4,39 min	56,33 min	551 min	9,78 min
	Sletanja	24,33	14 min	0,58 min	28,17 min	17 min	0,60 min
	poletanja	14,83	158 min	10,64 min	28,17 min	534 min	18,96 min
A/D Scneario 2	Ukupno	46,83	133 min	2,84 min	56,33 min	183 min	3,25 min
	Sletanja	24,00	43 min	1,79 min	28,17 min	56 min	1,99 min
	poletanja	22,83	89 min	3,90 min	28,17 min	127 min	4,51 min

Na slici 2 prikazane su vrednosti prosečne dužine reda vazduhoplova u poletanju za oba scenarija. Sa date slike i na osnovu vrednosti iz tabele 3 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 2 - Prosečna dužina reda u poletanju – Scenario 1 vs. Scenario 2

Na slici 3 dat je uporedni prikaz vrednosti mera neefikasnosti, dobijenih za Scenarije 1 i 2. 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 3 vidi se da su razlike u neefikasnosti za dve prikazane taktike značajne. Naime, u Scenariju 2 (A/D taktika) u poređenju sa Scenarijem 1 (AP taktika) posmatrano za sve vazduhoplove dobijene su niže vrednosti mera neefikasnosti - TI , FI i EI (na slici 3 označene sa svi). Takođe, za AP taktiku, TI vazduhoplova u poletanju ima visoku vrednost, koja je dosta veća od TI vazduhoplova u sletanju (oko 98% TI „pripada” poletanjima, a približno 2% sletanjima). Za A/D taktiku, TI poletanja je i dalje veća od TI sletanja, ali razlika je manja (oko 78% TI „pripada” poletanjima, a približno 22% sletanjima). Ovakva raspodela između TI poletanja i sletanja posledica je, u najvećoj meri, primenjene taktike upravljanja saobraćajem, ali određeni uticaj ima i ukupno vreme koje vazduhoplovi u poletanju i sletanju provode u sistemu. Naime, poletanja u sistemu provedu (bez kašnjenja) od 192 s do 321 s (u zavisnosti od gejt-a sa kog vazduhoplov polazi), dok sletanja u sistemu provedu između 285 s i 440 s (u zavisnosti od izlaznice sa PSS koju koriste nakon sletanja i određeno gejt-a). Samim tim, ista vrednost kašnjenja vazduhoplova daje veće vrednosti TI za poletanja nego za sletanja.

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 3 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_2 i H_2O imaju najveći udeo u ukupnoj emisiji zagađivača, i direktno su zavisni od potrošenog goriva, dobijene vrednosti ukupne EI su veoma slične vrednostima FI (slika 3). Da bi se dobila potpuna informacija o EI , vrednosti EI prikazane su posebno za različite gasove, za sve vazduhoplove (slika 4), kao i posebno za poletanja (slika 5) i sletanja (slika 6). 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.

Na osnovu slike 3 vidi se da je FI zavisna od TI (smanjenje TI dovodi do smanjenja FI i obrnuto) i da je EI zavisna od FI . Takođe, sa slika 4, 5 i 6 može se videti da zavisnost EI od FI nije ista za sve gasove tj:

- Neefikasnosti emisije za CO_2 , H_2O i SO_x direktno je zavisna od FI (posmatrano za sve vazduhoplove zajedno, kao i posebno za poletanja i sletanja). Posmatrano za sve vazduhoplove (slika 4), kao i za poletanja (slika 5) neefikasnost emisije navedenih gasova je manja u slučaju primene A/D taktike, dok je za sletanja (slika 6) 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);

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 navedenih faza leta.

U posmatranim scenarijima, kašnjenja na zemlji su uglavnom 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 i 5), dok je za sletanja nešto viša za A/D taktiku (slika 6);

Vrednost neefikasnosti emisije za NO_x , posmatrano za sve vazduhoplove (slika 4) je nešto viša za A/D taktiku (u poređenju sa AP taktikom), značajno viša za istu taktiku ukoliko posmatramo samo sletanja (slika 6), a nešto niža posmatrano za poletanja (Slika 5). Naime, emisija NO_x 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 penja-

nja 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.

Slika 3 - Vrednosti neefikasnosti – Scenario 1 vs. Scenario 2

Slika 4 - Vrednosti neefikasnosti sa detaljnijim prikazom EI – Scen. 1 vs. Scen. 2

Slika 5 - Vrednosti neefikasnosti za poletanja sa detaljnim prikazom EI – Scen. 1 vs. Scen. 2

Slika 6 - Vrednosti neefikasnosti za sletanja sa detaljnim prikazom EI – Scen. 1 vs. Scen. 2

Na osnovu prikazanih rezultata i izvršenih analiza za Scenarije 1 i 2, može se zaključiti da je taktika A/D bolja od taktike AP, po pitanju vrednosti mera neefikasnosti (definisanih na način opisan u ovom radu).

4. ZAKLJUČAK

Predmet istraživanja u ovom radu predstavlja uticaj načina upravljanja saobraćajem na manevarskim površinama aerodroma, kao i vazdušnom prostoru u neposrednoj okolini aerodroma, od strane kontrole letenja, na mere efikasnosti funkcionisanja aerodroma.

Kako bi se bolje sagledao uticaj različitih mera upravljanja, od strane kontrole letenja, na performanse sistema, definisano je i analizirano nekoliko mera neefikasnosti leta, a zatim i neefikasnosti obavljanja saobraćaja, i to: vremenska neefikasnost (TI), neefikasnost potrošnje goriva (FI) i neefikasnost emisije gasova (EI).

Izvršeni su eksperimenti za određenu konfiguraciju manevarskih površina hipotetičkog aerodroma, za pretpostavljenu saobraćajnu potražnju i taktike upravljanja saobraćajem od strane kontrole letenja, korišćenjem simulacionog modela SIMMOD.

Određena su kašnjenja vazduhoplova, kao i vrednosti potrošnje goriva i emisije gasova. Dobijeni rezultati su analizirani, diskutovani i na osnovu toga izvedeni su sledeći zaključci:

- 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, kao i

niže prosečne vrednosti mera neefikasnosti - *TI*, *FI* i *EI*;

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 neefikasnost poletanja odnosno sletanja, u ukupnoj vrednosti *TI* (što je veći udeo *TI* sletanja veća je i *FI*),
- Ukupna *EI* direktno zavisi od *FI*,
- *EI* za CO₂, H₂O i SO_x 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 ručnim stazama),
- *EI* za NO_x najviše zavisi od *TI* sletanja, tj. od *FI* sletanja,
- što su i očekivani rezultati;

Istraživanje predstavljeno u ovom radu, 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 mera (kao što je na primer uvođenje nove taktike upravljanja saobraćajem na postojećoj infrastrukturi) na efikasnost funkcionisanja aerodroma.

LITERATURA

- [1] EEC, Challenges of Growth 2013: Summary Report, 2013
- [2] Janić, M, Developing an Indicator System for Monitoring, Analyzing and Assessing Airport Sustainability, EJTIR, September 2010, pp. 206-229.
- [3] EEC, Performance Review Report: An Assessment of ATM in Europe during the Calendar Year 2013, Performance Review Commission, 2014
- [4] SESAR, The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management: European ATM Master Plan, Edition 2, October 2012
- [5] Reynolds, T.G, Development of Flight Inefficiency Metrics for Environmental Performance Assessment of ATM, ATM 2009, Napa, California, USA
- [6] ICAO, ICAO aircraft engine emissions databank, - <http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php>
- [7] EEC, AEM - Advanced Emission Model III Release 2.0 User Guide, Version 1.2, 2009, Bretigny, France
- [8] Horonjeff, R. et al, "Planning and Design of Airports" Mc Grow Hill, Fifth edition, 2010,

SUMMARY

INFLUENCE OF AIR TRAFFIC CONTROL MANAGEMENT TACTICS ON AIRPORT EFFICIENCY

The research presented in this paper deals with influence of different traffic management on an airport airfields and in airport vicinity, by air traffic control, on airport efficiency. For this purpose, several flight inefficiency metrics are proposed, and these are: Time, Fuel and Emission Inefficiency. For the airport of assumed configuration and traffic demand, for different management tactics applied by air traffic control, some experiments were performed, using a simulation model SIMMOD. The results are analyzed and some conclusions are made.

Key words: Air Traffic Management airport, efficiency