



ANALIZA UTICAJA LOKACIJE I TIPA IZLAZNICE NA KAPACITET POLETNO SLETNE STAZE RUNWAY CAPACITY ANALYSIS AS A FUNCTION OF EXIT TYPE AND LOCATION

ANDRIJA VIDOSAVLJEVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, a.vidosavljevic@sf.bg.ac.rs

Rezime: Predviđeni porast potražnje za vazдушnim saobraćajem zahteva povećanja kapaciteta sistema vazdušnog saobraćaja, pogotovu aerodromskog sistema gde se upravo predviđaju najveća zagušenja. S druge strane, avio kompanije imaju interes za lokacijom izlaznice koja im omogućuje minimiziranje operativnih troškova (minimalno rulanje do platforme nakon sletanja i sl). Navedeni razlozi predstavljali su motivaciju za razvoj modela operacije sletanja. Mogućnosti primene modela ilustrovane su na problemu lokacije izlaznice D staze 12 Beogradskog aerodroma.

Cljučne reči: Kapacitet poletno sletne staze, lokacija izlaznice, simulacija.

Abstract: The predicted increase in air transport demand requires increase of air traffic system capacity, especially airport system capacity where greatest congestions are expected. In addition, airlines have an interest for exit location which guarantees operating costs minimization (minimum taxing time landing, etc). The stated reasons were the motivation for development a model of the aircraft landing operations. The model's capabilities are illustrated using runway exit location problem at Belgrade airport.

Keywords: Runway capacity, runway exit location, simulation.

1. UVOD

Studija Evropske komisije [1], i njene kasnije revizije, predviđaju da će se broj zahteva za vazдушnim saobraćajem udvostručiti u narednih 10 – 15 godina i utrostručiti u narednih 20 godina. Iako se vazdušni prostor uglavnom smatra glavnim limitirajućim faktorom kapaciteta sistema vazdušnog saobraćaja, studije pokazuju da se najveća zagušenja predviđaju upravo na vazduhoplovnim pristaništima (aerodromima).

Aerodromski sistem se sastoji od:

- terminalnog vazdušnog prostora,
- poletno sletnih staza – PSS
- rulnih staza
- pristanišne platforme,
- pristanišne zgrade,
- veze sa opslužnim područjem.

Kapacitet aerodromskog sistema zavisi od kapaciteta svih njegovih delova, pa shodno tome i od kapaciteta PSS-a. Kapacitet PSS-a se definiše kao broj vazduhoplova koje staze mogu da prihvate u određenom intervalu vremena (najčešće 60 minuta) i zavisi od: broja i međusobnog rastojanja PSS-a, broja i lokacija izlaznica, konfiguracije rulnih staza, itd. Kako je kapacitet staze obrnuto proporcionalan vremenu koje vazduhoplovi provedu na stazi, pro-

izilazi da su problemi maksimizacije kapaciteta i minimizacije zauzetosti PSS-a dualni. Lokacija izlaznice za koju je vreme zauzetosti PSS-e minimalno, ujedno predstavlja optimalnu lokaciju sa aspekta kapaciteta.

S druge strane, avio kompanije se rukovode jedino smanjenjem troškova poslovanja, pa se problem lokacije izlaznice može posmatrati kroz minimizaciju nepotrebnog vremena rulanja do pristanišne platforme nakon sletanja. Ovaj problem je od izuzetne važnosti naročito kod aerodroma kod kojih je pristanišni kompleks lociran u blizini praga PSS-e koji je najčešće u upotrebi (aerodrom Beograd, praga 12) [2].

Cilj istraživanja, izloženog u ovom radu, je bio razvoj modela operacije sletanja na PSS-u sa dve izlaznice, radi analize uticaja lokacije i tipa izlaznice na kapacitet PSS-e za zadati miks¹ vazduhoplova. Pored mogućnosti promene miksa vazduhoplova u populaciji (radi predstavljanja sadašnjeg ili budućeg saobraćaja), model je moguće prilagoditi PSS-i sa više izlaznica, radi posmatranja problema optimalne lokacije nove izlaznice pri njenoj konstrukciji.

Rad je organizovan na sledeći način. U poglavlju 2 opisane su operacija sletanja i njene faze. Zatim je predstavljen model operacije sletanja sa usvojenim pretpostavkama i

¹ Zastupljenost pojedinih tipova vazduhoplova u populaciji

opisan proces validacije modela. U poglavlju 3 prikazani su neki rezultati analize podataka dobijenih simulacijom modela i izvedeni su zaključci.

2. MODEL OPERACIJE SLETANJA

Opis operacije sletanja

Nakon segmenta završnog prilaza, na visini od 15m iznad praga PSS-e započinje operacija sletanja. Sletanje je završeno kada je vazduhoplov napustio PSS-u. Operacija sletanja je podeljena u sledeće faze [3]:

- **nizlet** – u kojoj vazduhoplov i dalje ponire po ravni poniranja konstantnom brzinom;
- **prilet** – u kojoj se vazduhoplov prevodi iz poniranja u horizontalni let i
- **slet** – koja se sastoji od tri podfaze:
 - *idržavanje* – vazduhoplov leti horizontalno, uz sve veće propinjanje (povećanje napadnog ugla) kako bi nadomestio smanjenje brzine (prouzrokovano povećanjem otpora) i održao uzgonsku silu jednaku težini vazduhoplova;
 - *opadanje (parachute)* – kada je vazduhoplov dostigao maksimalni napadni ugao, njegovim daljim povećanjem dolazi do naglog pada uzgona i propodanja vazduhoplova do dodira glavnih nogu stajnog trapa sa PSS-om;
 - *rulanje* – nakon dodira sa stazom, vazduhoplov počinje da usporava i rula do napuštanja staze. Sletanje je završeno kada rep vazduhoplov napusti PSS-u.

Brzina vazduhoplova na početku faze sletanja zavisi od više faktora. Minimalnu brzinu vazduhoplova, potrebnu za održanje u vazduhu, diktiraju kategorija vazduhoplova i brzina vetra. Za svaku (težinsku) kategoriju vazduhoplova definisana je brzina gubitka uzgona (V_s)², koja predstavlja brzinu vazduhoplova u odnosu na vazдушnu masu (Air Speed). Brzina sletanja (V_{ref}) je po definiciji 30% veća od brzine gubitka uzgona, dok je brzina vazduhoplova u odnosu na zemlju (Ground Speed) jednaka V_{ref} uvećanoj za lednu odnosno umanjenoj za čeonu komponentu vetra. S druge strane stvarna brzina kojom vazduhoplov leti u sletanju zavisi od pilota koji upravlja vazduhoplovom (ljudski faktor). Takođe u periodu vršnog opterećenja kontrolor letenja može zahtevati od pilota promenu brzine radi optimalnog sekvencionisanja dolazećeg saobraćaja.

Na rastojanje tačke dodira vazduhoplova sa PSS-om od praga najveći uticaj ima brzina vazduhoplova na pragu, ali i brzina prevodenja vazduhoplova u stanje gubitka uzgona (meko i tvrdo sletanje), ljudski faktor i sl.

Nakon dodira PSS-e, vazduhoplov počinje da usporava i kada se steknu uslovi³ napušta stazu. Intenzitet usporenja je promenljivog karaktera i ima dva pika, prvi pri dodiru PSS-e i drugi nakon aktiviranja vazдушnih kočnica. Zavisi

² brzina pri kojoj krila ne proizvode dovoljanu uzgonsku silu za održavanje vazduhoplova u vazduhu

³ brzina vazduhoplova manja ili jednaka brzini izlaza i na datom mestu postoji izlaznica

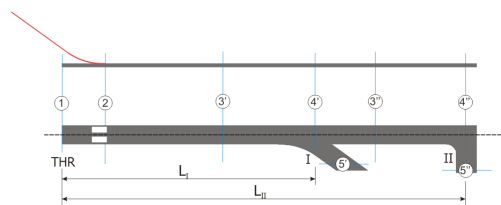
od: koeficijenta trenja (meteorološki uslovi) i podužnog nagiba PSS-e, težine vazduhoplova, brzine pri dodiru PSS-e, upotrebe vazдушnih kočnica i obrnutog potiska i sl. Međutim najuticajni je ljudski faktor, jer od pilotove procene rastojanja do izlaznice zavisi koliki će intenzitet kočenja biti.

Model operacije sletanja

U simulacionom modelu operacije sletanja za granice sistema izabrani su prag PSS-e na koji se vrši sletanje (1) i tačka na izlaznici na kojoj je vazduhoplov u potpunosti napustio PSS-u (5). Operacija sletanja je podeljena u četiri faze, kao što je prikazano na slici 1:

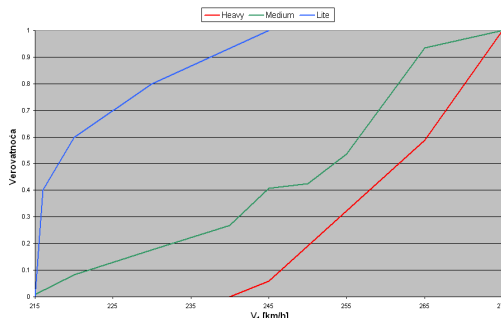
- **poniranja** – od praga do tačke dodira (1 – 2),
- **usporavanja** – od tačke dodira do tačke gde vazduhoplov dostiže brzinu izlaza (2 – 3),
- **rulanja** – kretanje do tačke izlaza (3 – 4),
- **napuštanja staze** – (4 – 5).

Ulazni parametri modela kao što su: ubrzanje vazduhoplova u letu i nakon dodira PSS-e, funkcija raspodele brzine vazduhoplova na pragu za različite kategorije vazduhoplova, funkcija raspodele položaja tačke dodira (touch down) dobijeni su na osnovu podataka snimljenih na Beogradskom aerodromu 1980. godine [4].



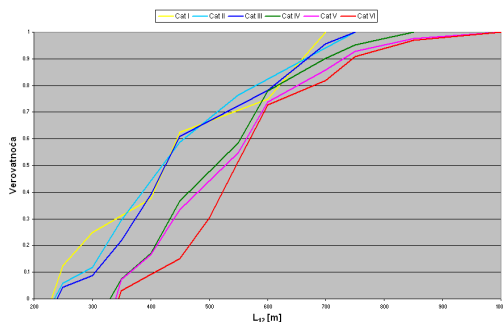
Slika 1. Značajne tačke u operaciji sletanja

Prva faza obuhvata let vazduhoplova između praga PSS-e i tačke na PSS-i na kojoj točkovi zadnjih nogu stajnog trapa prvi put dodirnu stazu. U ovoj fazi predpostavljeno je da se vazduhoplov kreće ravnomerno usporeno sa ubrzanjem -1m/s^2 . Brzina vazduhoplova na pragu (V_1) predstavlja slučajnu promenljivu koja zavisi od kategorije vazduhoplova (sa određenom verovatnoćom uzima vrednost L, M i H u zavisnosti od zadatog miksa populacije) i predstavljena je empirijskim raspedelom na slici 2.



Slika 2: Funkcija raspodele brzine vazduhoplova na pragu PSS-e

Položaj tačke dodira (L_{12}) takođe predstavlja zavisnu slučajnu promenljivu. Na osnovu brzine na pragu (V_1) vazduhoplovi se dele u šest kategorija, i svakoj je pridružena određena empirijska raspodela položaja tačke dodira (slika 3).



Slika 3. Funkcija raspodele položaja tačke dodira PSS-e

Kako je pretpostavljeno ravnomerno usporeno kretanje vazduhoplova u prvoj fazi, na osnovu generisanih vrednosti V_1 i L_{12} moguće je odrediti brzinu vazduhoplova pri dodiru PSS-e (V_2) po formuli (1), dok se vreme koje vazduhoplov provede u prvoj fazi (t_1) računa po formuli (2).

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - 2 \cdot a_1 \cdot L_{12}} \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{2 \cdot L_{12}}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

U drugoj fazi vazduhoplov, nakon dodira sa PSS-om, počinje da usporava kako bi što pre napustio PSS-u. Za potrebe ovog rada, pretpostavljeno je konstantno usporenje koje iznosi -1.4 m/s^2 . Brzinu izlaza⁴ (V_3) vazduhoplov dostiže u tački 3, čije se rastojanje od praga (L_{13}) dobija po formuli (3), dok se vreme provedeno u ovoj fazi (t_2) dobija po formuli (4).

$$L_{13} = L_{12} + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2 \cdot a_2} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot L_{13}}{V_2 + V_3} \quad (4)$$

Položaj tačke 3 može biti dvojak u zavisnosti da li je vazduhoplov željenu brzinu dostigao pre ili posle prolaska izlaznice I. U prvom slučaju (tačka 3' na slici 1) rastojanje L_{13} se dobija kada u formuli (3) brzina V_3 uzme vrednost propisanu za izlaznicu I (V_{1I}). Tada važi da je $L_{13} < L_1$. U suprotnom, vazduhoplov nastavlja usporeno kretanje do dostizanja propisane brzine za izlaznicu II (V_{1II}) koju dostiže u tački 3'' na slici 1.

Po dostizanju brzine izlaza, vazduhoplov nastavlja rulanje po stazi do tačke lokacije izlaznice (tačka 4 na slici 1). Vazduhoplov se u trećoj fazi kreće konstantnom brzinom pa se vreme rulanja određuje po formuli (5), gde L predstavlja rastojanje izlaznice od praga (uzima vrednost L_1 ili L_{1II} u zavisnosti od prihvaćene izlaznice).

$$t_3 = \frac{L - L_{13}}{V_3} \quad (5)$$

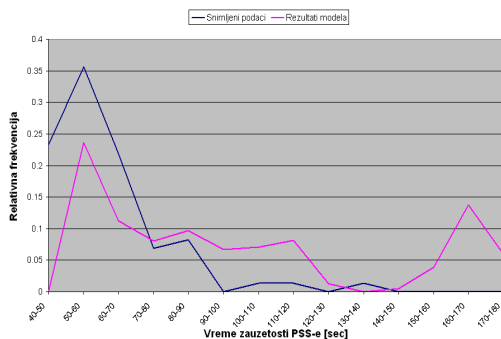
Poslednja faza obuhvata rulanje vazduhoplova između tačaka 4 i 5 radi napuštanje PSS-e. Kako se smatra da je vazduhoplov napustio stazu tek kada je celom svojom dužinom prešao ivicu PSS-e, tačka 5 je lociranja na 50m rastojanja od ivice PSS-e, koliko iznosi dužina najvećeg vazduhoplova u populaciji. Vreme potrebno za napuštanje PSS-e dobija se po formuli (6).

$$t_4 = \frac{50m}{V_3}$$

Izlazne promenljive modela predstavljaju: vreme zauzetosti PSS-e, koje se dobija kao zbir vremena trajanja pojedinih faza operacije sletanja, i podatak da li je vazduhoplov prihvatio izlaznicu I ili ne, na osnovu kojeg se računa verovatnoća prihvata izlaznice.

Validacija modela

Validacija modela je izvršena poređenjem podataka dobijenih snimanjem saobraćaja na Beogradskom aerodromu 1980. godine [4] sa rezultatima simulacionog modela za slučaj polu-brze izlaznice locirane na 2000m od praga, što odgovara tadašnjoj konfiguraciji PSS-e, i odgovarajući miks vazduhoplova.



Slika 4. Raspodele verovatnoća vremena zauzetosti

Uporednim prikazom raspodela verovatnoća vremena zauzetosti dobijenih snimanjem saobraćaja i simulacionim modelom (slika 4) uočene su razlike koje su posledica pretpostavki modela. Sa slike 4 može se videti da je frekvencija vremena zauzetosti PSS-e od 50 sekundi, koju generišu vazduhoplovi koji prihvata prvu izlaznicu, znatno niža u modelu što je posledica pretpostavljene brzine izlaza. Usvajanje brzine izlaza, koja je manja od projektovane brzine preporučene od strane ICAO-a, uslovlilo je i manju verovatnoću prihvata izlaznice (77% naspram 82.5% koliko iznosi za snimljeni saobraćaj).

Još značajniji uticaj ima pretpostavka da vazduhoplov usporava konstantno do brzine izlaza a zatim nastavlja rulanje konstantnom brzinom sve do napuštanja PSS-e. Kako u realnosti pilot prilagođava kočenje svojoj trenutnoj brzini i procenjenom rastojanju do izlaznice, to će se retko desiti da vazduhoplov u rulanju konstantnom brzinom, jednakoj brzini izlaza, provede onoliko vremena koliko se

⁴ brzina sa kojom je, po standardima, dozvoljeno da vazduhoplov napusti PSS-u. Zavisni od tipa izlaznice.

dobija modelom. Kao direktna posledica ove pretpostavke, u rezultatima modela na slici 4 se može uočiti velika frekvencija vremena zauzetosti u opsegu 150-180 sekundi, koje uzrokuju vazduhoplovi koji nisu prihvatili prvu izlaznicu, dok vremena zauzetosti snimljenog saobraćaja ne prelaze 140 sekundi i u opsegu 90-140 javljaju se u malom broju slučajeva.

3. ILUSTRACIJA PRIMENE MODELA

Primena modela operacije sletanja, opisanog u ovom radu, ilustrovana je na primeru Beogradskog aerodroma "Nikola Tesla". Simulacija operacije sletanja vršena je za prag 12, sa ciljem određivanja optimalne lokacije izlaznice D. Funkcija cilja je minimiziranje prosečnog vremena zauzetosti PSS-e, sa ciljem povećanja kapaciteta PSS-e. U simulaciji su sprovedena dva eksperimenata za slučaj brze odnosno polu-brze izlaznice, od kojih svaki ima jedanaest scenarija za razne lokacije izlaznice (1500m-2500m). Analiza nekih od rezultata prikazana je u nastavku.

U tabeli 1 dat je uporedni prikaz rezultata eksperimenta 1, svih 11 scenarija. Iz table se može videti da je optimalna lokacija brze izlaznice, sa aspekta minimalnog vremena zauzetosti PSS-e, na 2100m od praga 12.

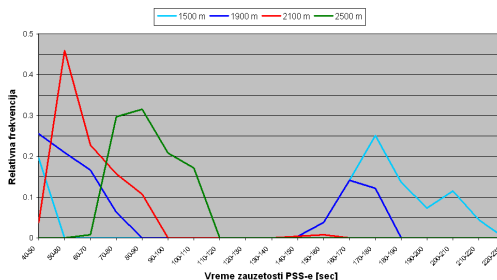
Tabela 1. Rezultati eksperimenta 1

Scenario	Lokacija izlaznice	Prosečno vreme zauzetosti PSS-e	Verovatnoća prihvata izlaznice D
1	1500	155	20
2	1600	143	27
3	1700	126	39
4	1800	116	47
5	1900	89	70
6	2000	66	92
7	2100	64	99
8	2200	69	100
9	2300	75	100
10	2400	81	100
11	2500	87	100

Sa slike 5, na kojoj su prikazane raspodele verovatnoća vremena zauzetosti PSS-e za četiri reprezentativna scenarija eksperimenta 1, može se videti da kriva gustine raspodele ima dva pika: jedan na nižim vrednostima vremena zauzetosti (40-60 sekundi), koji generišu vazduhoplovi koji su izašli na izlaznicu D, i drugi na višim vrednostima vremena zauzetosti (170-180 sekundi), kao posledica neprihvatanja izlaznice D.

Za slučaj lokacije izlaznice preblizu praga PSS-e na koji se sleće (scenario 1), većina vazduhoplova ne uspeva da napusti PSS-u na prvog izlaznici (verovatnoća prihvata izlaznice je mala svega 20%, tabela 1), pa je drugi pik izraženiji, što uzrokuje visoko prosečno vreme zauzetosti PSS-e. Udaljavanjem izlaznice od praga povećava se verovatnoća prihvata izlaznice, pa prvi pik postaje sve izraženiji, dok se drugi pik smanjuje i na kraju potpuno iščezava. Povećanje verovatnoće prihvata izlaznice dovodi do smanjenja prosečnog vremena zauzetosti PSS-e sve do dostizanja minimalne vrednosti koja odgovara optimalnoj

lokaciji izlaznice. Daljim udaljavanjem izlaznice, preko optimalne (2100 m), dolazi do porasta prosečnog vremena zauzetosti PSS-e i pored daljeg povećanja verovatnoće prihvata izlaznice, što je grafički predstavljeno širenjem prvog pika krive gustine raspodele i njegovim pomeranjem ka višim vrednostima, a posledica je dužeg rulanja vazduhoplova po pisti.



Slika 5. Raspodele verovatnoća vremena zauzetosti

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je model operacije sletanja namenjen analizi uticaja lokacije i tipa izlaznice na kapacitet PSS-e za zadati miks populacije vazduhoplova.

Analizom podataka, tokom validacije modela, utvrđeni su uzroci razlike između podataka dobijenih snimanjem saobraćaja i rezultata modela i predložena su buduća unapređenja modela (uvođenje kompleksnijeg algoritma kočenja sa modeliranjem uloge pilota). I pored uočenih razlika, a obzirom na namenu modela, smatra se da model dovoljno dobro opisuje posmatrani sistem.

Primena modela ilustrovana je na primeru lokacije izlaznice D za stazu 12 Beogradskog aerodroma za ulazni miks saobraćaja koji odgovara 1980. godini. Analizom podataka utvrđene su optimalne lokacije brze i polu-brze izlaznice, kao i prednosti koje donosi uvođenje brze izlaznice. U budućem radu korisno bi bilo razmatranje problema lokacije izlaznice D za ulazni miks koji odgovara današnjem saobraćaju, imajući u vidu da je dugolinijski saobraćaj 80-ih godina činio veliki udeo. Problem lokacije nove izlaznice je samo još jedan od mogućih, koji bi takođe bilo interesantno posmatrati.

LITERATURA

- [1] P. Argüelles, et al., "EUROPEAN AERONAUTICS: A VISION FOR 2020", European Commission, Luxembourg, 2001.
- [2] V. Tošić, D. Teodorović, O. Babić, "Optimum runway exit location", Transportation Planning and Technology, 10(2) (1985) 135-145.
- [3] S. Gvozdenović, P. Mirosavljević, pisana predavanja "Uvod u performanse transportnih vazduhoplova", Saobraćajni fakultet, Beograd, 2008.
- [4] Z. Živković, diplomski rad "Analiza karakteristika saobraćaja na PSS-i aerodroma Beograd", Saobraćajni fakultet, Beograd, 1980.