Mogućnosti za smanjenje emisije gasova u taksiranju na Aerodromu Beograd

BOJANA D. MIRKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

EMIR M. GANIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 625.717:[504.5:621.43.068(497.11)

502.3:504.5:621.43.068(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika2006759M

U ovom radu je prikazana analiza mogućnosti za smanjenje emisije gasova u fazi taksiranja na Aerodromu Beograd, motivisana jednim od ciljeva Flighpath 2050 da se emisija štetnih gasova u ovoj fazi leta potpuno eliminiše u budućnosti. Kvantifikovana je potrošnja goriva i emisija štetnih gasova za osnovni scenario za 2019. godinu i upoređena sa tri alternativna scenarija: taksiranje sa jednim motorom, prevlačenje vazduhoplova u odlasku i električno taksiranje. Za aerodrom veličine Aerodroma Beograd prioritet se daje uvođenju procedure taksiranja sa jednim motorom, jer ne zahteva dodatne troškove na strani aerodroma ili aviokompanije, za razliku od druga dva scenarija; a procenjena korist je nešto manja nego u slučaju električnog taksiranja, i gotovo ista kao u slučaju prevlačenja vazduhoplova u odlasku.

Ključne reči: aerodrom, taksiranje vazduhoplova, emisija gasova, potrošnja goriva

1. UVOD

Pitanje zaštite životne sredine je jedno od najznačajnijih globalnih pitanja današnjice. Budući da je vazdušni saobraćaj jedan od zagađivača životne sredine, preduzimaju se brojne aktivnosti od strane regulatornih tela, proizvođača, avioprevoznika, aerodroma i drugih učesnika u sistemu vazdušnog saobraćaja, sa zajedničkim ciljem da se smanji uticaj vazduhoplovstva na globalno zagađenje.

Vazdušni saobraćaj je u 2016. godini učestvovao u ukupnoj emisiji gasova sa efektom staklene bašte (Greenhouse Gases – GHG) sa 3,6%, odnosno sa 13,4% u emisijama koje potiču od saobraćaja u Evropi [1]. Važno je naglasiti da oko 80% emisije CO₂ u vazdušnom saobraćaju na svetskom nivou proizvode letovi preko 1.500 km za koje praktično i ne postoji alternativni vid transporta [2]. Međutim, to ne umanjuje obavezu svih učesnika u vazdušnom saobraćaju da definišu i primenjuju strategije usmerene na smanjenje emisije GHG na što je moguće manju meru.

Evropska komisija (EC) je 2017. godine definisala strategiju „Flight Path 2050“ [3] koja predstavlja viziju sistema vazdušnog saobraćaja i vazduhoplovne indust-

rije u 2050. godini. U ovoj strategiji pored operacionih, bezbednosnih, infrastrukturnih i ostalih ciljeva postavljani su i važni ciljevi u vezi s zaštitom životne sredine. To su, pored ostalog: da tehnologije i procedure omoguće 75% smanjenja emisije CO₂ po putničkom kilometru, 90% smanjenja emisije NO_x i 65% smanjenja buke vazduhoplova (u odnosu na nivo emisije gasova i buke vazduhoplova koji su proizvedeni 2000-tih godina); i da kretanje vazduhoplova po zemlji tokom taksiranja ne emituje štetne gasove.

Uticaj operacija vazduhoplova na zagađenje životne sredine se uobičajeno posmatra kroz dve komponente. Jedna se odnosi na lokalnu emisiju zagađivača tokom ciklusa sletanja i poletanja vazduhoplova na aerodromima (Landing and Take-off - LTO), a druga na globalnu emisiju zagađivača koje se emituju tokom ostalih faza leta (non-LTO). Prva komponenta je važan izvor zagađenja vazduha u okolini aerodroma, a time direktno ili indirektno ima uticaj na zdravlje stanovnika, ekosistem i kulturno nasleđe [4].

VINCI Airports koji upravlja Aerodromom „Nikola Tesla“ Beograd od 2015. godine primenjuje integrisanu politiku zaštite životne sredine AirPact, kao prvi operater aerodroma na svetu koji je to učinio [5]. Ovaj program između ostalog ima za cilj i priključenje svih 46 aerodroma kojima upravlja VINCI Airports programu akreditacije aerodroma za upravljanje emisijom ugljen-dioksida (Airport Carbon Accreditation) i dobijanje sertifikata ISO 14001 [5]. Imajući ovo u vidu, izvesno je da će pitanje zaštite okruženja na

Adresa autora: Bojana Mirković, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305
e-mail: b.mirkovic@sf.bg.ac.rs

Rad primljen: 03.11.2020.

Rad prihvaćen: 12.11.2020

Aerodromu Beograd biti u fokusu budućeg razvoja aerodroma.

U ovom radu akcenat je stavljen na emisije štetnih gasova tokom faze taksiranja na Aerodromu Beograd, budući da je jedan od ciljeva Flighpath 2050 da se emisija štetnih gasova u ovoj fazi leta potpuno eliminiše u budućnosti. Cilj rada je da uporedi osnovni scenario za 2019. godinu, sa alternativnim rešenjima za smanjenje emisije. Jedno rešenje je taksiranje sa jednim motorom u fazi taksiranja u dolasku i odlasku. Drugo rešenje je taksiranje bez uključenih motora, sa dve moguće varijante – prevlačenjem vazduhoplova pomoću vozila za vuču u fazi taksiranja u odlasku (*taxi-out*) i električnim taksiranjem (*E-taxi*) u dolasku i u odlasku.

Nakon uvodnih razmatranja, u drugom poglavlju rada dat je pregled različitih mera za smanjenje emisije štetnih gasova u taksiranju i rezultata njihove primene. U trećem poglavlju prikazani su scenariji i metodologija za proračun potrošnje goriva i emisije gasova. Ulazni podaci, rezultati analize i diskusija za slučaj Aerodroma Beograd su dati u četvrtom poglavlju rada, dok peto poglavlje sadrži zaključna razmatranja i pravce budućih istraživanja.

2. MERE ZA SMANJENJE EMISIJE GASOVA U TAKSIRANJU VAZDUHOPLOVA

Kretanje vazduhoplova po zemlji može trajati od približno deset minuta na malim i srednjim aerodromima, do više desetina minuta na velikim aerodromima, u zavisnosti od obima saobraćaja, kompleksnosti infrastrukture, tokova u dolasku i odlasku i načina upravljanja tim tokovima. Prosečna vremena taksiranja u dolasku i odlasku na velikim aerodromima se konstantno uvećavaju [6] što je logična posledica sve većeg obima saobraćaja i stvaranja zagušenja na infrastrukturi čiji razvoj ne prati dovoljno brzo povećanje saobraćaja.

Zbog toga se tokom kretanja vazduhoplova po zemlji u periodima zagušenja mogu generisati i značajna kašnjenja, što ima za rezultat dodatno povećanje potrošnje goriva i emisije štetnih gasova. Taksiranje u odlasku po pravilu traje duže od taksiranja u dolasku, jer uključuje i proceduru izguravanja (*push-back*) i čekanje aviona na poletanje.

Taksiranje u odlasku je najčešće predmet istraživanja, posebno na velikim aerodromima koji trpe zagušenja. Tako su, na primer, potrošnju goriva i emisije gasova u taksiranju analizirali Simaiakis i Balakrishnan [7] na četiri najzauzetija aerodroma u SAD u 2007. godini (Njujork JFK, Njujork Newark, Filadelfija i Boston Logan) i Nikoleris i dr. [8] na aerodromu Dallas DFW. Međutim, iako je problem emisije gasova na velikim aerodromima značajniji, treba imati na umu

da i mali i srednji aerodromi doprinose globalnom zagađenju, budući da njih ima na hiljade dok je velikih aerodroma stotinak u celom svetu. Yilmaz [4], na primer, analizira emisije od putničkih aviona na Aerodromu Kajseri u Turskoj za 2010; Vujović i Todorović [9] daju ocenu emisije zagađivača na Aerodromu Beograd u periodu 2008-2015; Tsilingridis [10] daje uporednu analizu emisije zagađivača na grčkim aerodromima (10 glavnih + ostali) za 4 godine (1980, 1995, 2000. i 2005); dok Sidiropoulos i dr. [11], takođe na primeru grčkih aerodroma, pokazuju razliku u emisiji štetnih gasova za standardni LTO ciklus i stvarna vremena provedena u različitim fazama.

Standardni LTO ciklus pretpostavlja vreme taksiranja od 26 min (7 min *taxi-in* i 19 min *taxi-out*). Ovo vreme može biti značajno veće kada su u pitanju veliki zagušeni aerodromi, dok je istovremeno za brojne male i srednje aerodrome (kao što je Aerodrom Beograd) značajno precenjeno. Zbog toga je za analizu emisije gasova i za utvrđivanje realnih očekivanih koristi od mera za smanjenje emisije poželjno koristiti prosečna vremena taksiranja ili proračunata vremena taksiranja za svaku operaciju u zavisnosti od poletno-sletne staze i parking pozicije na kojoj se opslužuje, kao što je to urađeno na primeru za Aerodrom Ciriha [12].

Uvođenje mlaznih vazduhoplova i povećanje putničkog saobraćaja tokom sedamdesetih godina prošlog veka iniciralo je brojna pitanja negativnog uticaja vazduhoplovstva na životnu sredinu zbog buke i emisija gasova pre svega. Već tada su se pojavili prvi predlozi mera za smanjenje emisije gasova u taksiranju. Još 1979. godine u [13] su analizirani rezultati primene četiri strategije za kontrolu emisija gasova na primeru aerodroma Los Anđeles i San Francisko.

Dve mere su čisto operativne i imaju za cilj smanjenje vremena koje se provodi u taksiranju: kontrola vremena polaska vazduhoplova sa parking pozicije i dodeljivanje poletno-sletne staze (PSS) na bazi minimizacije rastojanja između parking pozicije i PSS. Pored toga, razmatrane su i proceduralne mere: taksiranje sa jednim isključenim motorom i prevlačenje vazduhoplova između PSS i parking pozicija pomoću *push-back* vozila (tzv. *dispatch towing*). Ove dve mere su razmatrane i par godina ranije [14] na primeru Aerodroma Atlanta.

Na bazi podataka iz 2007. godine [6] Deonandan i Balakrishnan [15] porede tri strategije, i to: taksiranje sa jednim motorom, prevlačenje vazduhoplova i napredno upravljanje tokovima saobraćaja zasnovano na razmeni informacija i poboljšanoj koordinaciji između učesnika. Sve tri strategije su upoređene sa osnovnim scenarijom za 15 najzauzetijih aerodroma u SAD. Zaključak je da je kombinacija ovih strategija najbolje rešenje za smanjenje emisije gasova tako da

efikasnost odvijanja operacija ne bude ugrožena. U [16] je na primer analizirana korist od zadržavanja na parking poziciji na primeru Aerodroma Detroit i rezultati pokazuju smanjenje od oko 52% u vremenu taksiranja i 37% manje emisije CO₂.

Taksiranje sa jednim motorom (Single Engine Taxi - SET) kao proceduralna mera za smanjenje emisije se pojavila kao jedna od prvih mera. Podrazumeva isključenje jednog motora za dvomotorne avione i dva motora za četvoromotorne avione. Motori moraju da se zagreju pre polaska, što traje u proseku 2-5 minuta u zavisnosti od tipa motora [15], te zbog toga primena ove procedure u odlasku ima smisla jedino ukoliko je vreme taksiranja duže od ovog perioda. Rezultati primene SET procedure prikazani su u [17] i [18] na primeru dva američka aerodroma za taxi-out i na primeru London Hitrou (LHR) aerodroma za taxi-in. U [17] je pokazano da SET ima potencijal da redukuje emisije za 27% na Aerodromu Orlando i 45% na Njujork LaGuardia aerodromu. U [18] na bazi rezultata primenom SET procedure na LHR data je opšta preporuka za sve aerodrome da uvedu ovu proceduru kao standard i da ulože napore da vreme do isključenja sekundarnih motora svedu na minimum.

Tehnološki napredak omogućio je unapređenje postojećih operativnih i proceduralnih mera. Alati za upravljanje tokovima u odlasku (Departure Manager) i kretanjem aviona po zemlji (Surface Manager) i njihova integracija kroz A-CDM (Airport-Collaborative Decision Making) koncept značajno su unapredili upravljanje saobraćajem na zagušenim aerodromima. Početkom 2000-ih godina pojavila su se i rešenja za taksiranje bez aktivnih motora čime je napravljen značajan korak bliže ostvarivanju cilja potpune eliminacije emisije gasova u taksiranju. Električno taksiranje može biti omogućeno zemaljskim (eksternim) sistemima ili (internim) sistemima koji su u sklopu vazduhoplova. Prvo rešenje zahteva dodatnu opremu u vidu specijalizovanih traktora za vuču, kao i infrastrukturu koja će omogućiti ovakve operacije bez generisanja dodatnih zagušenja. Drugo rešenje zahteva intervencije na samom vazduhoplovu, tačnije na stajnom trapu. Detaljan pregled sistema za električno taksiranje daju Lukic i dr. [19]. U nastavku su date samo osnovne karakteristike, koje su od značaja za definisanje scenarija i analizu sprovedenu u ovom radu.

Eksterni sistemi su uglavnom u formi vozila koja se kače na vazduhoplov i voze ga duž putanje do poletno-sletne staze. TaxiBot je trenutno jedina sertifikovana i operativna alternativa za taksiranje. Zasniva se na principu towbarless pushback veze koja može da se koristi za različite kategorije vazduhoplova bez potrebnih modifikacija. Nakon povezivanja, traktor vuče vazduhoplov koristeći svoj dizel-električni motor. Kretanje TaxiBot-a kontroliše kapetan direktno iz

aviona tako što koristi komande za okretanje nosnog točka i kočnice za kočenje. Ove komande se detektuju od strane platforme na kojoj je nosni stajni trap i prenose se na kretanje samog TaxiBot-a. Na holding poziciji se TaxiBot otkači od aviona, što traje oko 3 minuta, koliko je potrebno i da se motori zagreju pre finalnog taksiranja, izlaza na poletno-sletnu stazu i poletanja [20]. Vozač vraća TaxiBot vozilo nazad na platformu. Ovo dodatno opterećuje manevarske površine, te bi za već zagušene aerodrome zahtevalo planiranje pomoćne infrastrukture za ove operacije.

Interni sistemi mogu biti integrisani u nosni točak ili u glavni stajni trap. Neki od postojećih sistema ovog tipa za električno taksiranje su WheelTug i Electric Green Taxiing System (EGTS). Interni sistemi omogućavaju potpunu autonomnost vazduhoplova, odnosno ne zahtevaju angažovanje push-back vozila, čime se postiže ušteda u ukupnom vremenu taksiranja u odlasku. Iako nije potrebna dodatna infrastruktura, za razliku od TaxiBot-a ovaj sistem za taksiranje ostaje na vazduhoplovu, te predstavlja dodatnu težinu koju će vazduhoplov nositi tokom leta i koja će očekivano imati za rezultat povećanje potrošnje goriva. Ovi sistemi nisu u potpunosti električni, već koriste Auxiliary Power Unit (APU) kao motor pokretač [20].

Električno taksiranje vazduhoplova eliminiše emisiju štetnih gasova od motora aviona, ali postoje sekundarni izvori emisije gasova (vozilo i APU) koji moraju biti uzeti u razmatranje za fer poređenje sa drugim merama. Uticaj električnog taksiranja kao mere za smanjenje emisije gasova analizirano je u [21]. Hospodarka daje detaljan pregled pozitivnih i negativnih aspekata električnog taksiranja na bazi kojih je urađena kvantitativna analiza ušteda i troškova od ovog koncepta.

U radovima [22-24] se električno taksiranje poredi sa drugim alternativnim scenarijima – SET i prevlačenje aviona u odlasku. U [22] i [23] scenario prevlačenja podrazumeva korišćenje klasičnog vozila, dok je u [24] razmatran TaxiBot. U [22] su pored potrošnje goriva i emisije gasova od motora, APU-a i vozila za vuču, uzeti u razmatranje i kapitalna ulaganja u vozila i električni sistem, operativni troškovi i troškovi njihovog održavanja, kao i penali za dodatnu potrošnju goriva tokom leta za slučaj internih sistema.

Na bazi svega toga upoređeni su ekonomski efekti prelaza sa osnovnog na alternativne scenarije, a dodatno su diskutovana i operativna ograničenja za primenu vozila i sistema za električno taksiranje na aerodromima u SAD.

U [23] je pored ova tri razmatran i scenario naprednog upravljanja tokovima saobraćaja, za 10 aerodroma sa najdužim vremenom taksiranja u odlasku u 2010. godini. Rezultati pokazuju da je moguće

ostvariti kumulativnu uštedu u potrošnji goriva i oko 50% adekvatnom kombinacijom strategija/tehnologija npr. električno taksiranje i klasično prevlačenje. U [24] su na primeru 10 aerodroma u SAD sa najdužim taksiranjem u odlasku upoređeni SET i dve varijante električnog taksiranja – eksterni i interni sistem i to po kriterijumu potrošnje goriva i emisije HC, CO i NO_x. Svi alternativni scenariji pokazuju poboljšanje u odnosu na osnovni. Generalno, interni sistemi pokazuju najveći potencijal kada je u pitanju smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Ekonomska analiza pokazuje da su i interni i eksterni sistemi vredni razmatranja i da opravdavaju primenu.

Za slučaj Aerodroma Beograd koji je razmatran u ovom radu usvojeni su scenariji kao u slučaju [23]. Scenariji su predstavljeni u sledećem poglavlju.

3. OPIS SCENARIJA

U cilju procene i kvantifikacije uštede goriva i smanjenja emisije gasova koje se mogu postići primenom različitih alternativa za taksiranje, u ovom radu su razmatrana četiri scenarija:

- Osnovni scenario - konvencionalno taksiranje,
- Taksiranje sa jednim motorom (SET procedura),
- Eksterni sistemi za taksiranje - prevlačenje vazduhoplova traktorom za vuču,
- Interni sistem za električno taksiranje (WheelTug ili EGTS).

Na slici 1 su za sva četiri scenarija prikazane različite faze i upotrebe motora, traktora za vuču i APU-a tokom taksiranja. U nastavku je dat opis scenarija i jednačine za proračun potrošnje goriva. Emisije gasova za svaki zagađivač (NO_x, CO i HC) i za svaki izvor emisije (vazduhoplov, traktor za vuču i APU) dobijaju se množenjem indeksa emisije gasova sa količinom potrošenog goriva.

Scenario 1 – Konvencionalno taksiranje

Osnovni scenario podrazumeva taksiranje sa svim motorima i korišćenje APU-a i traktora za vuču prilikom izlaska sa parking pozicije, kao što je prikazano na slici 1.

		taxi-in		opsluga	taxi-out		povratak
		HM			PB	ZM	
Scenario 1	motor 1						
	motor 2						
	APU						
	traktor						
Scenario 2	motor 1						
	motor 2						
	APU						
	traktor						
Scenario 3	motor 1						
	motor 2						
	APU						
	traktor						
Scenario 4	motor 1						
	motor 2						
	APU						
	traktor						
izlazak sa PSS							
		on-block	off-block			line-up	

Slika 1 – Prikaz osnovnog i tri alternativna scenarija taksiranja

U ovom scenariju, tokom push-back procedure APU se upotrebljava u uslovima bez opterećenja, dok je upotreba traktora za vuču pod maksimalnim opterećenjem.

Potrošnja goriva $PG_j^{S_1}$ za tip vazduhoplova j za Scenario 1 se računa na sledeći način:

$$PG_j^{S_1} = PG_{t,j} \cdot (t_{taxi-in} + t_{taxi-out}) \cdot n_{m,j} + PG_{pb,max} \cdot t_{pb} + PG_{APU,bo} \cdot t_{pb} \quad (1)$$

gde je $PG_{t,j}$ protok goriva tokom faze taksiranja za tip vazduhoplova j , $t_{taxi-in} + t_{taxi-out}$ ukupno vreme taksiranja podeljeno u dve faze *taxi-in* i *taxi-out*, $n_{m,j}$ broj motora za tip vazduhoplova j , $PG_{pb,max}$ protok goriva za traktor za vuču u uslovima maksimalnog opterećenja, t_{pb} vreme trajanja *push-back* procedure, $PG_{APU,bo}$ protok goriva za APU u uslovima bez opterećenja.

Potrošnja goriva $PG_{pb,f}$ za traktor za vuču zavisi od uslova opterećenja f (bez opterećenja ili pri maksimalnom opterećenju) pri kojima se koristi različiti faktor opterećenja FO_f (obično između 0,5 i 0,8) i može se izračunati na sledeći način:

$$PG_{pb,f} = FO_f \cdot kW \cdot PG_{kW,g} \quad (2)$$

gde je kW snaga motora u kilovatima, PG_{kW} protok goriva za traktor za vuču po kilovatu snage motora i tipu goriva koje koristi (dizel, benzin ili metan). Snaga motora se razlikuje prema kategoriji vazduhoplova koji se vuče (uskotrupni ili širokotrupni).

Scenario 2 – Taksiranje sa jednim motorom

SET procedura podrazumeva da vazduhoplov taksira u dolasku i u odlasku sa samo jednim motorom, odnosno sa dva motora u slučaju četvoromotornih vazduhoplova. U slučaju vazduhoplova sa tri motora pretpostavljeno je da se taksiranje vrši sa jednim motorom.

U ovom scenariju pretpostavka je da su svi motori operativni 5 minuta pre poletanja (faza zagrevanja motora - ZM) kao i 3 minuta nakon sletanja (faza hlađenja motora - HM). Takođe, kao i u prethodnom scenariju, pretpostavljeno je korišćenje APU-a i traktora za vuču prilikom izlaska sa parking pozicije, kao što je prikazano na slici 1.

Potrošnja goriva $PG_j^{S_2}$ za tip vazduhoplova j za Scenario 2 se računa na sledeći način:

$$PG_j^{S_2} = PG_{t,j} \cdot (t_{taxi-in} + t_{taxi-out} - t_{zm} - t_{hm}) \cdot n_{rm,j} + PG_{t,j} \cdot (t_{zm} + t_{hm}) \cdot n_{m,j} + PG_{pb,max} \cdot t_{pb} + PG_{APU,bo} \cdot t_{pb} \quad (3)$$

gde je, t_{zm} vreme zagrevanja motora, t_{hm} vreme hlađenja motora, $n_{rm,j}$ redukovani broj motora za tip

vazduhoplova j , dok su ostale oznake iste kao u prethodnom scenariju.

Scenario 3 – Prevlačenje vazduhoplova

U ovom scenariju, upotreba eksternih sistema za taksiranje razmatrana je samo za taxi-out fazu. Korišćenje traktora za vuču tokom taxi-in faze je operativno zahtevno, jer podrazumeva da vozilo čeka na manevarskim površinama sletanje vazduhoplova. Takođe, taksiranje u dolasku traje znatno kraće u odnosu na taksiranje u odlasku, pa su i uštede manje, a vreme taksiranja se dodatno uvećava usled čekanja na povezivanje traktora za vuču i vazduhoplova. Zbog svega navedenog, u ovom scenariju taxi-in faza se vrši sa svim motorima, kao tokom konvencionalnog taksiranja u prvom scenariju, dok taxi-out faza podrazumeva klasičnu push-back proceduru, zatim prevlačenje vazduhoplova traktorom za vuču sve do trenutka startovanja i zagrevanja motora pre poletanja, kao što je prikazano na slici 1. Za brzinu taksiranja prevlačenjem pomoću traktora usvojeno je 10 km/h. Za povratak traktora za vuču do platforme, pretpostavljena je brzina od 20 km/h, budući da se vraća bez opterećenja, a imajući u vidu da je to maksimalna dozvoljena brzina kretanja vozila po platformi. To je istovremeno i brzina kretanja vazduhoplova na osnovu koje su procenjena prosečna vremena taksiranja vazduhoplova u odlasku. Shodno tome, u ovom scenariju taxi-out procedura (isključujući push-back) traje dvostruko duže nego u osnovnom scenariju, a povratak vozila na platformu ima isto trajanje, zbog iste prosečne brzine kretanja. U slučaju prevlačenja vazduhoplova do poletno-sletne staze APU se koristi u uslovima bez opterećenja, a traktor za vuču pod maksimalnim opterećenjem, osim prilikom povratka na platformu kada se koristi bez opterećenja.

Potrošnja goriva $PG_j^{S_3}$ za tip vazduhoplova j za Scenario 3 se računa na sledeći način:

$$PG_j^{S_3} = PG_{t,j} \cdot (t_{taxi-in} + t_{zm}) \cdot n_{m,j} + PG_{pb,max} \cdot t_{taxi-out} + PG_{APU,bo} \cdot (t_{taxi-out} - t_{zm}) + PG_{pb,bo} \cdot t_p \quad (4)$$

gde je, $PG_{pb,bo}$ protok goriva za traktor za vuču u uslovima bez opterećenja, t_p vreme povratka traktora za vuču do parking pozicije, dok su ostale oznake iste kao u prethodnim scenarijima.

Scenario 4 – Električno taksiranje

U ovom scenariju koristi se tehnologija koja omogućava da motori vazduhoplova budu isključeni tokom većeg dela faze taksiranja. Interni sistem za električno taksiranje koristi APU kao motor pokretač i na taj način omogućava vazduhoplovu taksiranje u dolasku i odlasku. Motori vazduhoplova su operativni samo tokom faza zagrevanja i hlađenja motora. U toku

push-back procedure i prevlačenja vazduhoplova sa i do poletno-sletne staze APU se koristi u uslovima maksimalnog opterećenja, dok upotreba traktora za vuču nije potrebna, kao što je prikazano na slici 1.

Potrošnja goriva $PG_j^{S_4}$ za tip vazduhoplova j za Scenario 4 se računa na sledeći način:

$$PG_j^{S_4} = PG_{t,j} \cdot (t_{zm} + t_{hm}) \cdot n_{m,j} + PG_{APU,max} \cdot (t_{taxi-in} + t_{taxi-out} - t_{zm} - t_{hm}) \quad (5)$$

gde je, $PG_{APU,max}$ protok goriva za APU u uslovima maksimalnog opterećenja, dok su ostale oznake iste kao u prethodnim scenarijima. Povećanje potrošnje goriva tokom leta zbog povećanja težine vazduhoplova usled nošenja internog sistema za taksiranje nije razmatrano u okviru ovog istraživanja.

4. STUDIJA SLUČAJA ZA AERODROM BEOGRAD

4.1. Ulazni podaci

Podaci koji su potrebni da bi se proračunala potrošnja goriva i emisije gasova za svaki od scenarija uključuju: broj operacija; tip vazduhoplova, broj i tip motora, APU model; vreme rada motora po svakoj fazi taksiranja; indekse potrošnje goriva i emisije gasova za svaki scenario.

Podaci o broju letova po tipu vazduhoplova za 2019. godinu dobijeni su od Aerodroma Beograd. Na slici 2 prikazano je učešće prvih 10 najzastupljenijih tipova vazduhoplova u ukupnom saobraćaju. U ovom radu analizirano je 60 tipova vazduhoplova koji čine 98% godišnjeg saobraćaja.

Slika 2 - Učešće najzastupljenijih tipova vazduhoplova u ukupnom saobraćaju

Za tip motora je korišćen najčešće ugrađivani tip na osnovu saobraćaja na evropskim aerodromima prema podacima iz EMEP/EEA baze. Podaci o tipu i

broju motora za mlazne i klipne motore preuzeti su iz AEM baze (Advanced Emission Model [25]) koja koristi podatke iz ICAO baze emisija (ICAO Aircraft Engine Emissions Databank [26]) za mlazne motore, a FOCA bazu (Swiss Federal Office of Civil Aviation [27]) za klipne motore, dok je za turboelisne motore korišćena EMEP/EEA baza [28]. Iz istih baza preuzeti su i indeksi potrošnje goriva i emisije gasova za sve tipove vazduhoplova, dok su u slučaju traktora za vuču podaci preuzeti iz FAA Tehničkog izveštaja [29], a za APU iz ACRP Izveštaja 64 [30]. Pretpostavka je da svaka operacija zahteva push-back proceduru za napuštanje parking pozicije u trajanju od 3 minuta. Pretpostavljeno je da sva push-back vozila koriste dizel gorivo i da je motor jačine 130 kW (175 BHP) za traktore za vuču uskotrupnih vazduhoplova, dok je za traktore za vuču širokotrupnih vazduhoplova motor jačine 373 kW (500 BHP). U uslovima bez opterećenja, faktor opterećenja za traktor za vuču iznosi 0,5 dok u uslovima maksimalnog opterećenja on iznosi 0,8.

4.2. Rezultati

Kao rezultat primene metodologije opisane u prethodnom poglavlju za slučaj na Aerodromu Beograd, u tabeli 1 prikazane su izračunate količine potrošenog goriva i emisije gasova za svaki scenario i svaki zagađivač za 2019. godinu.

Tabela 1. Ukupna potrošnja goriva i emisije gasova po svakom scenariju

	Potrošnja goriva (t)	CO (t)	HC (t)	NO _x (t)
S1	5.937,27	129,34	17,50	29,69
S2	4.514,54	98,43	13,39	23,14
S3	4.562,83	100,73	15,24	40,57
S4	3.452,25	66,43	8,63	17,21

Iz tabele 1 se može videti da se potrošnja goriva smanjuje sa uvođenjem svakog novog scenarija osim u slučaju Scenarija 3 u kojem je zabeležen rast potrošnje goriva u odnosu na SET proceduru. Iako je u ovom slučaju smanjena potrošnja goriva vazduhoplova za 15% u odnosu na Scenario 2, usled dvostruko dužeg vremena taksiranja i povećane upotrebe APU-a i traktora za vuču, ukupna potrošnja goriva je povećana za 1%.

Najveće uštede ostvaruju se uvođenjem internih sistema za električno taksiranje pri čemu se u odnosu na konvencionalno taksiranje potrošnja goriva i NO_x smanjuju za 42%, emisije CO za 49%, a emisije HC za 51%. Slika 3 prikazuje emisije gasova (u tonama) po izvorima emisije za svaki scenario, gde se vidi da se u prva dva scenarija samo emisije vazduhoplova (A/C) razlikuju, dok su za APU i traktore za vuču (PB) iste.

Slika 3 – Emisije gasova po scenarijima za svaki izvor emisije

Najveća količina gasova CO i HC od strane APU emitovana je u Scenariju 3, dok su emisije NO_x najveće u Scenariju 4. U Scenariju 3 traktori za vuču beleže preko 8 puta veće emisije svih gasova u odnosu na osnovni scenario, dok se u Scenariju 4 ne koriste.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je analiziran uticaj taksiranja vazduhoplova na Aerodromu Beograd na životnu sredinu kroz procenu emisije štetnih gasova za 2019. godinu. Cilj rada je bio da se ispituju moguća poboljšanja ove faze LTO ciklusa i kvantifikuju koristi od uvođenja alternativnih procedura u taksiranju. Rezultati pokazuju da su moguća poboljšanja i da svaki od tri analizirana scenarija ima za rezultat smanjenu potrošnju goriva i emisiju gasova CO, HC i NO_x u odnosu na konvencionalno taksiranje. Najveća poboljšanja se ostvaruju kroz električno taksiranje (scenario 4), mada za ovu veličinu aerodroma nije toliko značajna razlika u odnosu na druge scenarije.

Scenariji 3 i 4 podrazumevaju i određene troškove (na strani aerodroma ili aviokompanija), te bi opravdanost uvođenja ovih scenarija trebalo potkrepiti detaljnom analizom troškova i koristi. Scenario 2, SET procedura, ne zahteva nikakve dodatne troškove, a procenjena korist na bazi saobraćaja iz 2019. godine je nešto manja od scenarija 4, a gotovo ista kao u scenariju 3. Imajući sve ovo u vidu, intuitivno se može reći da je scenario 2 preporučeni scenario za smanjenje emisije štetnih gasova u fazi taksiranja na Aerodromu Beograd.

Rezultati u ovom istraživanju dobijeni su uz određene pretpostavke. Za analizu opravdanosti bi trebalo koristiti preciznije podatke o vremenima taksiranja za svaku operaciju, trajanju push-back procedure i stvarnim tipovima motora za vazduhoplove.

6. ZAHVALNICA

Ovo istraživanje podržalo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Posebna zahvalnost upućena je Aerodromu Beograd koji se pružio potrebne podatke za ovo istraživanje.

LITERATURA

- [1] European Aviation Safety Agency - EASA, European Aviation Environmental Report 2019.
- [2] Air Transport Action Group – ATAG, Facts and Figures, 2020.
- [3] European Commission, Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation, 2017.
- [4] Yilmaz, I., Emissions from passenger aircrafts at Kayseri Airport, Turkey, *Journal of Air Transport Management*, 2017, vol. 58, pp. 176-182.
- [5] VINCI Airports – Aerodrom Beograd, <https://beg.aero/lat/node/174>
- [6] Bureau of Transportation Statistics, Sitting on the Runway: Current Aircraft Taxi Times Now Exceed Pre-9/11 Experience, 2007. Updated 2017.
- [7] Simaiakis, I., Balakrishnan, H. Impact of Congestion on Taxi Times, Fuel Burn, and Emissions at Major Airports, *Transportation Research Record*, 2010, 2184(1):22-30.
- [8] Nikoleris, T., Gupta, G, Kistler, M, Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport, *Transportation Research Part D*, 2011, 16(4): 302-308.
- [9] Vujovic D, Todorovic N, An assessment of pollutant emissions due to air traffic at Nikola Tesla International Airport, Belgrade, and the link between local air quality and weather types, *Transportation Research Part D*, 2017, 56: 85-94.
- [10] Tsilingiridis, G. Aircraft air pollutant emissions in Greek airports, *Global Nest Journal*, 2009, 11(4):528-534.
- [11] Sidiropoulos C, Ikonomopoulos A, Stratioti A, Tsilingiridis, G. Comparison of typical LTO-Cycle emissions with aircraft engine and airport-specific emissions for Greek airports, *9th International Conference on Environmental Science and Technology*, Greece, September 2005.
- [12] Fleuti E, Maraini S, Taxi-Emissions at Zurich Airport - Calculation Analysis and Opportunities, Zurich Airport, 2017.
- [13] Gelinas C. G, Fan, H. S. L, Reducing Air Pollutant Emissions at Airports by Controlling Aircraft Ground Operations, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1979, 29(2): 125-128.
- [14] U. S. Environmental Protection Agency. An Evaluation of Strategies for Airport Air Pollution Control, EPA-450/3-75-052, 1975.
- [15] Deonandan I, Balakrishnan H, Evaluation of Strategies for Reducing Taxi-Out Emissions at Airports, *9th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, 21- 23 September 2009, Hilton Head, South Carolina.
- [16] Ashok A, Balakrishnan H, Barrett, S. R. H, Reducing the air quality and CO2 climate impacts of taxi and takeoff operations at airports, *Transportation Research Part D*, vol. 54, 2017., pp. 287-303.
- [17] Kumar V, Sherry L, Thompson T, Analysis of emissions inventory for single-engine taxi-out operations, *3rd International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, Fairfax, VA, 2008, pp. 445-450, ISBN: 978-0-615-20720-9
- [18] Koudis G. S, Hu, S.J, Majmudar A, Jones R, Stettler, M.E.J, Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52(A):15-28.
- [19] Lukic M, Giangrande P, Hebala A, Nuzzo S, Galea M, Review, Challenges and Future Developments of Electric Taxiing System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(4): 1441-1457.
- [20] Lazar Drobnjakovic, *Električno taksiranje vazduhoplova*, završni rad, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, 2020.
- [21] Hospodka J, Cost-benefit analysis of electric taxi systems for aircraft, *Journal of Air Transport Management*, 2014, 39: 81–88, 2014.
- [22] Vaishnav P, The Costs and Benefits of Reducing Fuel Burn and Emissions from Taxiing Aircraft. *Transportation Research Record*, 2014;2400(1):65-77.
- [23] Dzikus N, Wollenheit R, Schaefer M, Gollnick, V. The Benefit of Innovative Taxi Concepts: The Impact of Airport Size, Fleet Mix and Traffic Growth, *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, August 2013, Los Angeles, CA
- [24] Guo R, Zhang Y, Wang Q, Comparison of emerging ground propulsion systems for electrified aircraft taxi operations, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, 44: 98-109.
- [25] EUROCONTROL. Advanced Emission Model User Guide AEM-KERNEL version 2.5.5, 2018
- [26] International Civil Aviation Organization, ICAO Aircraft Engine Emissions Databank, 2020.

- [27] Swiss Federal Office of Civil Aviation (FOCA), Aircraft Engine Emissions, 2020.
- [28] European Environment Agency, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009
- [29] https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/ae8c1e824b9246d29a9596b517674999
- [30] Motor Vehicle and Fuel Emissions Laboratory (U. S.), United States Federal Aviation Administration, and Energy and Environmental Analysis, Technical data to support FAA's advisory circular on reducing emissions from commercial aviation. Arlington, Va.: Energy and Environmental Analysis, 1995.
- [31] Environmental Science Associates, ACRP Report 64 - Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APU's and Alternative Systems. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2012.

SUMMARY

MEASURES TO REDUCE POLLUTANT EMISSIONS FROM TAXIING AIRCRAFT AT BELGRADE AIRPORT

This paper presents the analysis of measures to reduce pollutant emissions of taxiing aircraft at Belgrade Airport, motivated by one of the Flighpath 2050 goals that aircraft movements should be emission-free when taxiing. Fuel burn and pollutant emissions are quantified for basic scenario for year 2019, and compared to three alternative scenarios: single engine taxiing, dispatch towing and electric taxiing. For a mid-size airport like Belgrade Airport the priority should be given to single engine taxi procedure because it is not associated with additional implementation costs, unlike the other two scenarios; and estimated benefit is only somewhat smaller compared to electric taxiing case and almost the same as in dispatch towing case.

Key words: airport, aircraft taxiing, pollutant emission, fuel burn