

# Оценка на газовите емисии от въздухоплавателни средства при стандартен цикъл на излитане и кацане на летище „Васил Левски“

Николай Стойков, Радина Николова

**Резюме**—Настоящото изследване представя количествена оценка на газовите емисии от въздухоплавателни средства по време на стандартния цикъл на излитане и кацане (LTO) на летище „Васил Левски“ за 2023 година. Прилага се методологията, разработена от Международната организация за гражданска авиация (ICAO), която обхваща четирите основни фази на LTO цикъла: рулиране, излитане, набор на височина и заход за кацане. Анализът се фокусира върху най-често използваните типове въздухоплавателни средства, опериращи на летището. Оперативните данни за 2023 г. са предоставени от оператора на летище Васил Левски-София "SOF Connect. С използването на емисионният индекс за всеки газ замърсител и оперативните данни са изчислени емисиите на азотни окиси ( $\text{NO}_x$ ), неизгорели въглеводороди (HC) и въглероден окис (CO). Целта на изследването е да предостави надеждна основа за бъдещи мерки, насочени към намаляване на екологичното въздействие на авиацията на местно ниво.

**Ключови думи**—емисии, ICAO, LTO цикъл, летище Васил Левски, екологично въздействие

## I. ВЪВЕДЕНИЕ

През последните десетилетия въздушният транспорт бележи динамично развитие и се превръща в основен двигател на глобализацията, като осигурява бърза свързаност между региони и континенти. Успоредно с това обаче количеството на замърсяващите вещества отделяни от въздухоплавателните средства оказват значимо влияние върху глобалния климат.

Емисиите от авиационните газотурбинни двигатели се състоят основно от въглероден диоксид ( $\text{CO}_2$ ), азотни окиси ( $\text{NO}_x$ ), серни окиси ( $\text{SO}_x$ ), водна пара, твърди частици (PM) и въглеводороди (HC). Тези компоненти оказват значимо въздействие както върху локалното качество на атмосферния въздух в зоните около летищата, така и върху глобалните процеси, свързани с изменението на климата [1–3]. Според Lee et al. (2021) авиационният сектор представлява един от водещите антропогенни източници на климатично въздействие за периода 2000–2018 г., като приносят му към глобалното затопляне е оценен като значителен и нарастващ [3].

На локално ниво, особено под височина от 3000 ft в

рамките на стандартния LTO (Landing and Take-Off) цикъл, газовите емисии отделяни от авиационните двигатели имат пряко влияние върху качеството на въздуха и общественото здраве [2], [4], [5]. При тези условия се отделят  $\text{NO}_x$ , CO, черен въглерод и фини прахови частици, които водят до сърдечно-съдови и респираторни заболявания, както и до увреждания на имунната и нервната система [2], [5], [11].

Емпирични изследвания на летища в Европа и Азия показват, че нарастващият въздушен трафик е свързан със значително влошаване на локалното качество на въздуха [4], [5], [8]–[12].

За количествена оценка на тези емисии Международната организация за гражданска авиация (ICAO) е разработила стандартизирани методологии, описани в Annex 16, Volume II [6], както и база данни с емисионни фактори за авиационни двигатели [7]. Тези инструменти позволяват създаването на точни емисионни отчети, които подпомагат разработването на научно обосновани политики за устойчиво развитие на авиацията [9]–[12], [14]. Последни систематични прегледи подчертават, че надеждната оценка на емисиите в LTO цикъла е критичен инструмент за управление на въздействието на въздухоплаването върху околната среда [14].

Целта на изследването е да се оцени количеството на вредните емисии, по-специално азотни окиси, въглероден окис и въглеводороди, отделени от най-често използваните въздухоплавателни средства по време на LTO цикъла на летище „Васил Левски“-София за 2023 година.

## II. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Летище „Васил Левски“-София (показано на фиг. 1) представлява основният международен авиационен хъб на Република България и изпълнява ключова роля в националната транспортна система. То е разположено на приблизително 10 km източно от центъра на град София, при надморска височина от 531 m. Летищната инфраструктура включва една основна писта за излитане и кацане (ПИК 09–27) с дължина 3600 m, като бившата писта, след извършена реконфигурация, се

Received: 01.07.2026

Published: 26.07.2026

<https://doi.org/10.47978/TUS.2026.76.03.008>

Николай Стойков, Технически университет – София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1000, България

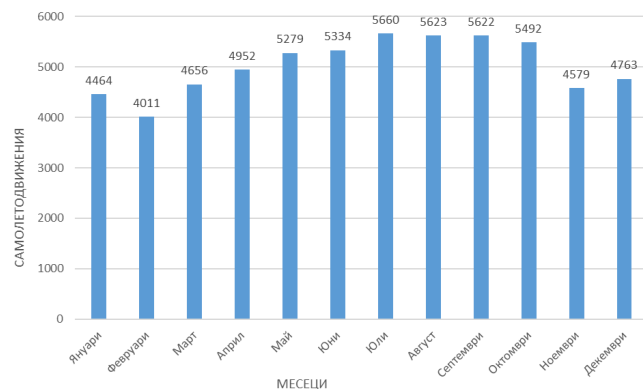
Радина Николова, Технически университет – София, бул. „Кл. Охридски“ 8, София 1000, България, ([r.nikolova@tu-sofia.bg](mailto:r.nikolova@tu-sofia.bg))

използва като успоредна пътека за рулиране, оптимизираща наземното движение на въздухоплавателните средства. В източната част на летището пистата преминава над речното корито на р. Искър посредством специално проектиран мост [13].

През 2023 г. летището е обработило общо 7 208 987 пътници, което е с 20,8% повече в сравнение с 2022г. Регистрирани са общо 60 345 самолетодвижения. На фиг. 2 е показано месечното разпределение на самолетодвиженията за 2023г, най-голям брой самолетодвижения се наблюдават през летните месеци (юли-септември), дължащо се на туристическият сезон. Месеците около Коледа и Нова година (декември, януари) също показват повече самолетодвижения.



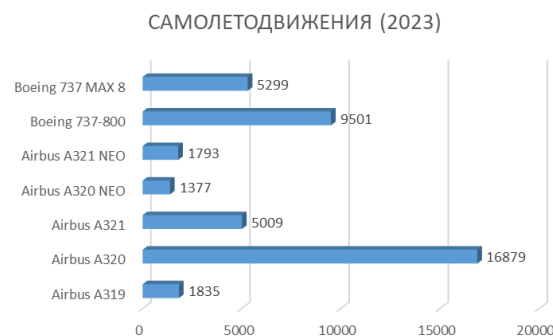
фиг. 1. Летище Васил Левски-София



Фиг. 2. Месечно разпределение на самолетодвиженията за 2023 г.

Въздухоплавателните средства, които най-често оперират на летище Васил Левски-София, са: Boeing B737NG, B738MAX и Airbus A320CEO/A320NEO и Airbus 321CEO/321NEO. Тези модели са избрани въз основа на данни предоставени от операторът на летище Васил Левски-София "SOF Connect за 2023 г.

На фиг. 3 са показани най-често използваните въздухоплавателни средства на летище „Васил Левски“ през 2023 г. През 2023 г. на летище „Васил Левски“ най-често използваният самолет е Airbus A320, с общо 16 879 самолетодвижения, което го прави доминиращ в структурата на полетите.



Фиг. 3. Най-често използвани въздухоплавателни средства на летище „Васил Левски“ през 2023 г.

След него се нарежда Boeing 737-800 с 9501 движения, а на трето място е Airbus A321 с 5009 движения. По-малък дял заемат новите поколения самолети – Boeing 737 MAX 8 (5299 движения), Airbus A321 NEO (1793 движения) и Airbus A320 NEO (1377 движения). Тези данни показват, че въпреки навлизането на по-нови и по-екологични модели, традиционните Airbus A320 и Boeing 737-800 продължават да бъдат най-широко използвани на летището.

### III. МЕТОДОЛОГИЯ

Количеството на замърсяващите вещества, отделяни от авиационните двигатели на територията на летището и в неговата околност при стандартен цикъл на излитане и кацане (Landing and take-off) може да се оцени по формулата [14].

$$E_{ik} = \sum_j (EI_{ijk} \times (FF_{ij} \div 1000) \times (t_{ij} \times 60) \times N_i) \quad (1)$$

В уравнение (1),  $k$  е видът замърсител ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  или  $\text{HC}$ ),  $i$  е типът на въздухоплавателното средство, а  $j$  показва режима на работа на двигателя на въздухоплавателното средство  $i$  (излитане, изкачване, подход за кацане, рулиране).

$E_{ik}$ -масата на замърсяващите вещества от тип  $k$  отделени в атмосферата от въздухоплавателно средство  $i$  по време на стандартен цикъл при кацане и излитане (LTO), kg

$N_i$ -брой на двигателите за въздухоплавателно средство  $i$

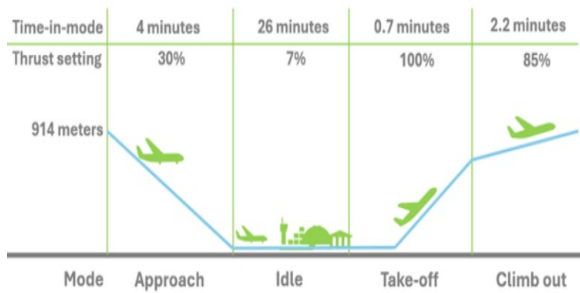
$EI_{ijk}$  -емисионен индекс за всеки газов замърсител от тип  $k$  при режим на работа на двигателя  $j$  за въздухоплавателно средство  $i$ , g/kg

$FF_{ij}$  -разход на гориво (на двигател) при режим на работа на двигателя  $j$  от въздухоплавателно средство  $i$ , kg/s

$t_{ij}$  - времето на работа за всеки режим на работа на двигателя  $j$  за въздухоплавателно средство  $i$ , s

На фиг. 4 е показан стандартният цикъл за излитане и кацане (LTO -Landing and Take-Off cycle), дефиниран от ICAO, който описва фазите на работа на авиационните двигатели от момента, в който самолетът е на земята, до достигане на височина до 3000 ft ( $\approx 914$  m), и обратно при кацане. Той е основа за изчисляване на емисиите на вредни газове от въздухоплавателни средства в района

на летищата.



Фиг. 4. Стандартен цикъл на LTO [6]

LTO цикълът включва четири основни фази:

1. **Taxi/Idle (рулиране/работа на празен ход)** –
  - о Двигателят работи на ниска тяга (около 7% от максималната).
  - о Средна продължителност: 26 минути (ICAO стандарт, варира според летището).
2. **Take-off (излитане)** –
  - о Двигателят работи на максимална тяга (100%).
  - о Средна продължителност: 0,7 минути.
3. **Climb-out (начален набор на височина)** –
  - о Двигателят работи на около 85% от максималната тяга.
  - о Фазата продължава до достигане на височина под 3000 ft.
  - о Средна продължителност: 2,2 минути.
4. **Approach (заход за кацане)** –
  - о Двигателят работи на около 30% от максималната тяга.
  - о Фазата започва при спускане под 3000 ft и продължава до прага на пистата.
  - о Средна продължителност: 4 минути.

#### IV. РЕЗУЛТАТИ

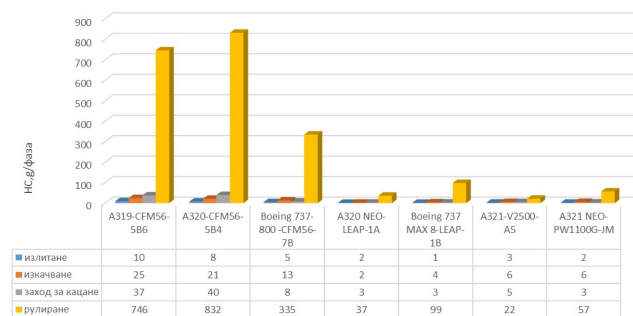
Базата данни на ICAO за емисиите от авиационните двигатели на въздухоплавателните средства (Engine Exhaust Emissions Databank) предоставя стандартни стойности за TIM (време в режим), EI (емисионен индекс) и FF (разход на гориво) в зависимост от типа на двигателя[7].

Фиг. 5 представя количествата отделени въглеродороди (HC) от различни типове въздухоплавателни средства по време на стандартния LTO цикъл, разделени по фази – излитане, изкачване, заход за кацане и рулиране. Ясно се вижда, че най-големи емисии се генерират по време на фазата рулиране. Традиционните модели с двигатели от серията CFM56 (A319-CFM56-5B6 и A320-CFM56-5B4) показват значително по-високи стойности на емисиите, достигащи съответно 746 g и 832 g HC, което ги поставя сред най-замърсяващите типове. В контраст, самолетите от по-ново поколение, оборудвани с двигатели LEAP-1A, LEAP-1B и PW1100G-JM, демонстрират значително по-ниски стойности на емисиите, особено при фазата на рулиране, където резултатите са десетки пъти по-ниски в сравнение със

старите модели. Това потвърждава ефективността на новите технологии за намаляване на вредните емисии.

Най-високите нива на замърсяване се наблюдават при A320-CFM56-5B4, докато най-ниските са при A321-NEO-PW1100G-JM и A320-NEO-LEAP-1A, което показва значителен напредък в посока екологосъобразност. Тези резултати подчертават нуждата от постепенно изтегляне на остарелите модели и ускорено внедряване на нови по-екологични двигатели, за да се намали общото въздействие върху качеството на въздуха в района на летищата.

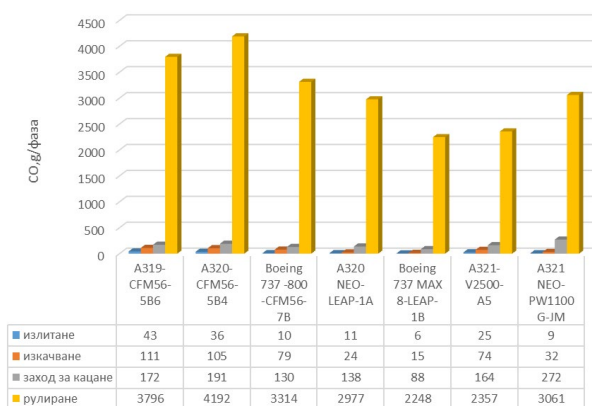
Фиг. 6 представя количеството въглероден оксид (CO) [g/фаза] за различни типове въздухоплавателни средства със съответните типове двигатели по време на стандартния LTO цикъл. Данните ясно показват, че фазата на рулиране е основният източник на CO емисии за всички изследвани въздухоплавателни средства. Например при A320-CFM56-5B4 емисиите при рулиране достигат над 4190 g, докато при излитане са едва 36 g. Подобна зависимост се наблюдава и при останалите типове – при A319-CFM56-5B6 емисиите от рулиране (3796 g) са многократно по-високи в сравнение с фазите на излитане (43 g) и изкачване (111 g). Относително по-ниски стойности се наблюдават при новите модели двигатели (A320- NEO-LEAP-1A и A321-NEO-PW1100G-JM), което подчертава ефективността на съвременните технологии за намаляване на CO емисиите. Въпреки това, дори при тях фазата на рулиране остава доминираща. Общата тенденция показва, че операциите на земята, особено продължителното рулиране, оказват най-съществен принос за емисиите на CO в рамките на LTO цикъла. Това подчертава необходимостта от въвеждане на мерки за оптимизация на наземните операции и прилагане на алтернативни методи за придвижване на самолетите по пистата с цел ограничаване на емисиите и подобряване на качеството на въздуха около летищата.



Фиг. 5. Разпределение на емисиите на HC (въглеродороди) за различни типове двигатели по време на фазите на LTO цикъла.

Фиг. 7 представя количественото разпределение на емисиите на азотни оксиди (NOx) по време на стандартния LTO цикъл за различни типове въздухоплавателни средства със съответните типове двигатели. Данните ясно показват, че най-значителни количества NOx се отделят във фазите изкачване и излитане, когато двигателите работят при високи

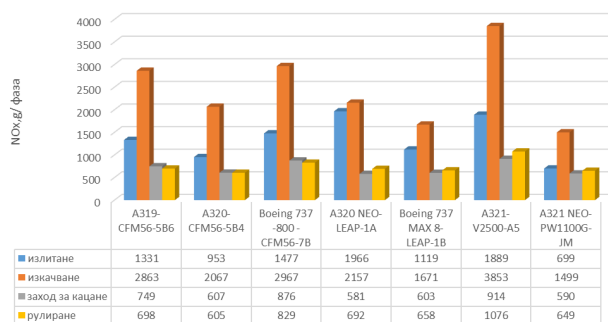
режими на тяга.



Фиг. 6. Разпределение на емисиите на CO (въглероден оксид) за различни типове двигатели по време на фазите на LTO цикъла.

Например, самолетът A321-V2530-A5 регистрира максимални стойности – съответно 3853 g по време на изкачване и 1889 g при излитане. Същевременно фазите рулиране и заход за кацане допринасят сравнително по-малко към общите емисии, въпреки че при голям брой операции техният кумулативен ефект не е пренебрежим.

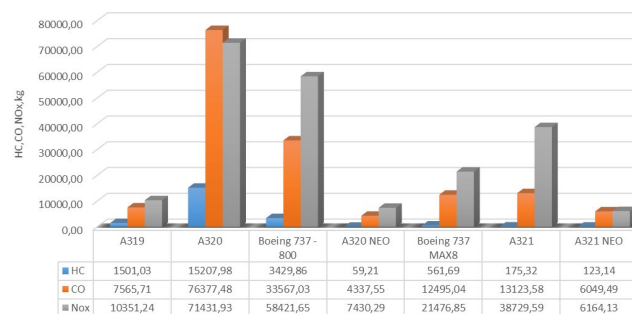
Сравнението между по-старите модели двигатели (напр. CFM56-5B4/5B6) и новото поколение (LEAP-1A/1B и PW1100G-JM) показва отчетлива тенденция за намаляване на емисиите в някои експлоатационни режими, особено при рулиране и заход за кацане.



Фиг. 7 Разпределение на емисиите на NOx (азотни оксиди) за различни типове двигатели по време на фазите на LTO цикъла.

Фиг. 8 илюстрира общото количество емисии на HC, CO и NOx [kg] за най-често използваните типове въздухоплавателни средства, опериращи на летище „Васил Левски“ през 2023 г. Данните показват ясно изразени различия между отделните категории, което отразява както характеристиките на двигателите, така и интензивността на експлоатацията на въздухоплавателните средства.

Най-значителен принос към общите емисии имат A320 и A321, при които стойностите на CO и NOx достигат съответно 76 377,48 kg и 71 431,93 kg за A320, както и 13 123,58 kg и 38 729,59 kg за A321.



Фиг. 8. Годишни емисии на въглеродороди (HC), въглероден оксид (CO) и азотни оксиди (NOx) за най-често използваните типове въздухоплавателни средства, опериращи на летище „Васил Левски“ през 2023 г.

Това се обяснява с широкото им използване в търговските полети и по-високата честота на LTO цикли. За сравнение, емисиите от A319 са значително по-ниски (7 565,71 kg CO и 10 351,24 kg NOx), което отразява по-ограниченото му приложение.

Интересна тенденция се наблюдава при NEO вариантите (A320 NEO и A321 NEO), където стойностите на HC, CO и NOx са най-ниски (например 59,21 kg HC, 4 337,55 kg CO и 7 430,29 kg NOx за A320 NEO). Това потвърждава ефективността на новите технологии за редуциране на вредните емисии и тяхната роля за намаляване на екологичния отпечатък на въздушния транспорт.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази статия са оценени газовите емисии от авиационните двигатели на въздухоплавателните средства по време на цикъла LTO, като се използва методологията на ICAO.

Общите емисии от въздухоплавателните средства по време на цикъла LTO са оценени на 373,78 т/год. (205,14 т/год. за NOx, 148,58 т/год. за CO и 20 т/год. за HC) на летище Васил Левски -София през 2023 г.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите благодарят на „СОФ Кънект“ АД за предоставените оперативни данни.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Masiol and R. Harrison, "Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review," *Atmospheric Environment*, vol. 95, pp. 409–455, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070>
- [2] R. Harrison, M. Masiol, S. Vardoulakis, "Civil aviation, air pollution and human health," *Environ. Res. Lett.* 2015, 10, 041001. DOI: 10.1088/1748-9326/10/4/041001
- [3] D. Lee, D. Fahey, P. Forster, "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018," *Atmospheric Environment*, vol. 244, pp. 117834, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- [4] X. Yang, S. Cheng, J. Lang, R. Xu, and Z. Lv, "Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 72, pp. 198–207, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.01.007>
- [5] J. Stettler, S. Eastham, and S. Barrett, "Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 31, pp. 5415–5424, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.012>

- [6] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 16, Volume II: Aircraft Engine Emissions*. Montreal, Canada: ICAO, 2017.
- [7] ICAO, ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- [8] D. Vujović and N. Todorovic, "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: Transport and Environment*, vol. 56, pp. 85–94, 2017.. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.003>
- [9] A. Tokuslu, "Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport", *Energy*, Volume 206, 1 September 2020, 118219 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118219>
- [10] A. Tokuslu, "Calculation of aircraft emissions during Landing and Take-Off (LTO) cycles at Batumi International Airport, Georgia," *International Journal of Environment and Geoinformatics* 8(2),2021,:186-192 DOI: 10.30897/ijgeo.836780,
- [11] S.Yim, G. Lee, I. Lee, et al. Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *Environmental Research Letters*. 2015, 10, 034001. DOI: 10.1088/1748-9326/10/3/034001
- [12] T. Elbir, "Estimation of engine emissions from commercial aircraft at a midsized Turkish airport," *Journal of Environmental Engineering* Volume 134, Issue 3,2008, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:3\(210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:3(210))
- [13] Летище София, План за ангажиране на заинтересованите страни и за оповестяване на информация, 2024. [https://sofia-airport.eu/wp-content/uploads/2022/10/SEP\\_BG\\_update\\_DEC\\_2024-1.pdf](https://sofia-airport.eu/wp-content/uploads/2022/10/SEP_BG_update_DEC_2024-1.pdf)
- [14] M. Dissanayaka, T. Ryley, B. Spasojevic, S. Caldera, "Evaluating Methods That Calculate Aircraft Emission Impacts on Air Quality: A Systematic Literature Review," *Sustainability* 2023, 15, 9741. <https://doi.org/10.3390/su15129741>

# Estimation of Aircraft Gas Emissions During Standard Landing and Take-off Cycle at Vasil Levski Airport

Nikolay Stoikov, Radina Nikolova

**Abstract**—This study presents a quantitative estimation of aircraft gas emissions during the standard Landing and Take-Off (LTO) cycle at Vasil Levski Airport for the year 2023. The methodology outlined by the International Civil Aviation Organization (ICAO) is applied, covering all four phases of the LTO cycle: taxiing, take-off, climb, and approach. The analysis focuses on the most commonly used aircraft types operating at the airport. Operational data for the year 2023, provided by the airport operator SOF Connect, include detailed information about aircraft types, engine configurations, and monthly aircraft movements. Using ICAO engine emission indices and this operational data, emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, hydrocarbons (HC), and carbon monoxide (CO) are calculated. The aim of the study is to provide a reliable basis for future measures aimed at reducing the environmental impact of aviation at the local level.

**Keywords**—aircraft emissions, ICAO, LTO cycle, Vasil Levski Airport, environmental impact