

Analiza unutarnje buke zrakoplova Cessna Citation CJ2

Mikačić, Petar Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:356857>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA UNUTARNJE BUKE ZRAKOPLOVA CESSNA CITATION CJ2

INTERIOR NOISE ANALYSIS OF CESSNA CITATION CJ2 AIRCRAFT

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Student: Petar Krešimir Mikačić

JMBAG: 0135248638

Zagreb, rujan 2023.

Zagreb, 4. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovne emisije**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7352

Pristupnik: **Petar Krešimir Mikačić (0135248638)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Analiza unutarnje buke zrakoplova Cessna Citation CJ2**

Opis zadatka:

Navesti osnovne karakteristike zvuka i buke. Opisati fiziološke i psihoakustičke utjecaje buke na čovjeka. Identificirati izvore buke na zrakoplovu Cessna Citation CJ2. Izmjeriti i analizirati unutarnju buku tijekom uobičajenih faza leta. Primjenom odgovarajućih algoritama vrednovati utjecaj buke na posadu i putnike.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Tino Bucak

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

ANALIZA UNUTARNJE BUKE ZRAKOPLOVA CESSNA CITATION CJ2

INTERIOR NOISE ANALYSIS OF CESSNA CITATION CJ2 AIRCRAFT

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Student: Petar Krešimir Mikačić

JMBAG: 0135248638

Zagreb, rujan 2023.

SAŽETAK

U ovom radu, provodi se akustička analiza unutarnje buke zrakoplova Cessna Citation CJ2 tijekom normalnih operacija. Objašnjavaju se osnove širenja i nastanka zvuka te kako svaki pojedini dio zrakoplova ima ulogu u stvaranju buke. Kako je čovjek primaran korisnik zrakoplova, objašnjava se osjet sluha te utjecaj buke na fiziološko i psihološko stanje čovjeka. Provodi se analiza unutarnje buke koristeći eksperimentalno prikupljene podatke tokom normalnih operacija leta. Rezultati se prikazuju tablično i grafički te se provode kroz odgovarajuće metrike u svrhu dobivanja objektivne procjene utjecaja buke na akustični komfor.

KLJUČNE RIJEČI: Cessna Citation CJ2; buka zrakoplova; unutarnja buka; analiza

SUMMARY

This paper provides an interior noise analysis of Cessna Citation CJ2 aircraft, with experimentally measured noise levels during normal flight operations. It contains the basics of sound and an explanation of how that noise is made and how each part of the aircraft is the actual noise source itself. As human beings are the main operators of aircraft it is also important to examine how humans perceive sound and how noise affects human beings physiologically and psychologically. Analysis of experimentally measured cabin noise levels during normal operations is performed. Results are presented in a tabular and a graphical way and processed through relevant metrics that provide an objective assessment of the noise on human comfort.

KEYWORDS: Cessna Citation CJ2; Aircraft Noise; Interior Noise; Analysis

SADRŽAJ

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. POJAM ZVUKA I BUKE | 3 |
| 2.1. Osnove zvuka | 3 |
| 2.1.1. Rasprostiranje zvuka | 4 |
| 2.1.2. Fizikalne veličine za opis zvuka..... | 6 |
| 2.2. Pojam buke | 8 |
| 2.3. Glavne metode vrednovanja | 9 |
| 3. UTJECAJ BUKE NA ČOVJEKA | 10 |
| 3.1. Ljudsko uho..... | 10 |
| 3.2. Posljedice utjecaja buke na čovjeka..... | 11 |
| 3.3. Zaštita od buke..... | 14 |
| 3.3.1. Tehničke mjere zaštite od buke | 14 |
| 3.3.2. Osobne mjere zaštite od buke | 15 |
| 4. IZVORI BUKE ZRAKOPLOVA CJ2 | 17 |
| 4.1. Zrakoplov kao izvor buke | 17 |
| 4.2. Tehničke karakteristike zrakoplova CJ2..... | 18 |
| 4.3. Izvori buke na zrakoplovu CJ2 | 19 |
| 4.3.1. Buka pogonske grupe..... | 20 |
| 4.3.2. Aerodinamička buka | 20 |
| 5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA UNUTARNJE BUKE ZRAKOPLOVA CJ2..... | 21 |
| 5.1. Mjerni instrument i postupak mjerenja..... | 21 |
| 5.2. Rezultati mjerenja | 23 |
| 6. VREDNOVANJE UTJECAJA BUKE NA POSADU I PUTNIKE ZRAKOPLOVA CJ2.... | 33 |
| 6.1. Izračun SIL indeksa..... | 33 |
| 6.2. Izračun SII indeksa..... | 35 |
| 7. ZAKLJUČAK | 36 |
| POPIS LITERATURE | 37 |
| POPIS PRILOGA | 38 |

1. UVOD

Cessna Citation CJ2, izvedenica iz obitelji zrakoplova *Cessna Citation Jet*, jedan je najrasprostranjenijih zrakoplova u sektorima privatne i poslovne avijacije gdje svakodnevno obavlja veliki broj zadataka kratkog i srednjeg dometa. Kao i svaki drugi zrakoplov, Cessna Citation CJ2 podliježe nizu regulativa glede tehničkih karakteristika no iako se uvelike regulira pitanje vanjske buke zrakoplova, regulacija unutarnje buke nije striktno propisana, ali svejedno predstavlja značaj utjecaj na ergonomiju putovanja.

Buka je subjektivni pojam zvuka koji je sveprisutan u neposrednoj okolini ljudi i životinja, ali neovisno o tome smatra li netko taj zvuk ugodnim ili ne, izlaganje visokim razinama buke direktno utječe na sluh čovjeka te ugodnost života. Zrakoplovi su izvori visokih razine buke zbog načina rada pogonskog sredstva, no osim opće poznatih izvora buke, važno se upoznati i s drugim izvorima buke poput aerodinamičke buke, uzrokovane strujanjem zraka oko zrakoplova te kako promjene konfiguracije utječu na cjelokupnu razinu buke.

Rad pruža osvrt na tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Cessna Citation CJ2 te prikazuje i opisuje mjerne metode korištene u procesu prikupljanja podataka razina unutarnje buke zrakoplova. Prikazuju se eksperimentalni rezultati mjerenja te se provode relevantne metrike kojim se prikazuje objektivni utjecaj na ergonomiju putnika i posade.

Rad je predstavljen kroz sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Pojam zvuka i buke
3. Utjecaj buke na čovjeka
4. Izvori buke zrakoplova CJ2
5. Analiza rezultata mjerenje unutarnje buke zrakoplova CJ2
6. Vrednovanje utjecaja buke na posadu i putnike zrakoplova CJ2
7. Zaključak

Prvo poglavlje pruža opis tematike i cjelina diplomskog rada.

Drugo poglavlje predstavlja opći pojam zvuka i njegovog rasprostiranja, opisuje fizikalne veličine i njihov međusobni odnos te predstavlja formule koje se koriste za opis istih. Definira se buka i predstavlja način za prikaz složenog utjecaja buka na čovjeka.

Treće poglavlje opisuje slušni organ čovjeka te mjere kojima se utvrđuje stanje sluha. Upoznaje se sa posljedicama izlaganja kratkotrajnoj i dugotrajnoj buci te kako pravilno pristupiti izlaganju istim. Opisuju se tehničke i osobne metode zaštite od buke.

Četvrto poglavlje promatra zrakoplov kao izvor unutarnje buke te se radi podjela na aerodinamičku buku i buku pogonskog sustava. Oba navedena izvora unutarnje buke se opisuju i vizualiziraju.

Peto poglavlje donosi stvarne rezultate mjerenja unutarnje buke zrakoplova. Rezultati se predstavljaju u 5 kategorija, a to su ekvivalentna razina buke, maksimalna i minimalna vrijednost razine buke u segmentu 10 sekundi, A-vrednovana razina izloženosti buci u segmentu 10 sekundi, vršne vrijednost razine buke te se razine buke prikazuju u oktavnom pojasu.

Šesto poglavlje uvodi objektivne parametre za prikaz utjecaja unutarnje buke na svakodnevno obavljanje operacija.

Sedmo poglavlje donosi zaključak i autorov osvrt na rezultate istraživanja.

Cilj ovog istraživanja je prikupiti podatke i upotpuniti bazu podataka o unutarnjoj buci zrakoplova Cessna Citation CJ2 te dobiti akustičnu sliku analize unutarnje buke zrakoplova koja na precizan i jednostavan način prezentira stvarno stanje.

2. POJAM ZVUKA I BUKE

2.1. Osnove zvuka

Zvuk se u fizici definira kao promjena tlaka, napona ili titranja čestica koja se širi kao akustični val kroz elastični medij poput plina, tekućine ili krutine te ga ljudsko uho može percipirati. Titranje se međusobno prenosi s čestice na česticu, a brzina širenja ovisi o mediju u kojem se čestice nalaze.

Razni izvori mogu uzrokovati promjene tlaka ili titranje odnosno stvaranje zvuka u mediju, no ako se taj isti izvor stavi u vakuum on neće biti u mogućnosti proizvesti zvuk zbog nedostatka čestica koje prenose titranje. Stoga se može konstatirati da je brzina širenja zvuka u vakuumu jednaka nuli.

Zvuk se označava mjernom jedinicom Bel [B] odnosno deset puta manjom jedinicom decibel [dB] koja je pronašla širu upotrebu zbog jednostavnosti prikaza.

Decibel je logaritamski omjer dvaju istovrsnih fizikalnih veličina pomnožen sa određenom konstantom, koja u slučaju za zvučni tlak iznosi $k = 20$.

$$\frac{X_1}{X_2} = k \log \frac{X_1}{X_2} \quad (1)$$

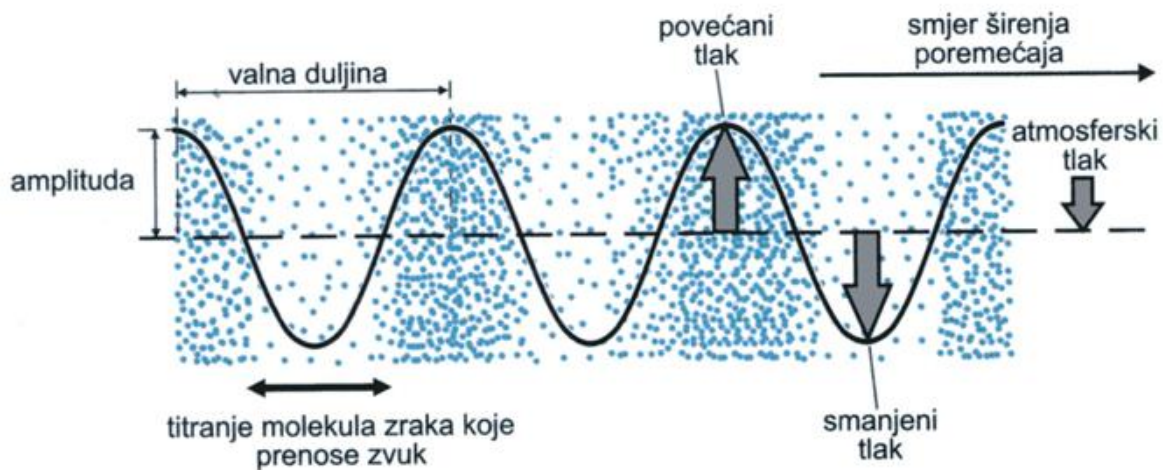
Decibel se koristi iz razloga što su omjeri zvučnih tlakova između praga čujnosti i praga boli iznimno veliki stoga je uporaba logaritamske ljestvice uvelike praktičnija. Za logaritamski odnos se primjenjuje odnos izmjerene vrijednosti zvučnog tlaka, intenziteta i snage u odnosu na referentnu vrijednost [1].

2.1.1. Rasprostiranje zvuka

Zvuk je dio mehaničkog valnog gibanja čija frekvencija leži u rasponu čujnosti ljudskog uha odnosno u rasponu od 20 Hz – 20 000 Hz, sve vrijednosti ispod spadaju u domenu infrazvuka dok sve vrijednosti iznad pripadaju domeni ultrazvuka.

Nastanak valova uzrokovan je pokretanjem čestica u okolini. Ovisno o kretanju čestica s obzirom na pravac rasprostiranja razlikuje se poprečno i uzdužno valno gibanje. Zvuk se rasprostire kao uzdužno valno gibanje te se može rasprostirati kroz čvrste, tekuće i plinovite tvari.

Osnovna fizikalna svojstva zvučnog vala prikazana su na slici 1 [2].



Slika 1. Osnovna fizikalna svojstva zvučnog vala [2]

Valna duljina predstavlja najmanju udaljenost između dvije čestice koje titraju u fazi odnosno udaljenost između dvaju sinusoidnih brjegov vala. Valna duljina se označava grčkim slovom lambda (λ).

Amplituda predstavlja najveću elongaciju od srednje vrijednosti veličine odnosno udaljenost od srednje vrijednosti do maksimuma ili minimuma vala.

Na slici 1. se također može uočiti promjena tlaka čestica i smjer širenja zvučnog vala. Čestice prenose poremećaj s jedne na drugu te predstavljaju "domino efekt".

Brzina rasprostiranja zvuka se naziva i „*brzina zvuka*“ te se definira kao udaljenost koju prijeđe zvučni val u jedinici vremena tijekom propagacije u elastičnom mediju.

Brzina zvuka za plinove se izračunava sljedećom formulom:

$$c = \sqrt{\kappa RT} = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho_0}} \quad (2)$$

Gdje je:

c = brzina zvuka

κ = adijabatski koeficijent (za zrak iznosi 1.4)

R = opća plinska konstanta ($R = 8.3144 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T = apsolutna temperatura plina (T izražena u Kelvinima [K])

p_0 = atmosferski tlak zraka ($p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$)

ρ_0 = gustoća zraka ($\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$)

Uvrštavajući u formulu atmosferske vrijednosti pri uvjetima ISA¹/SL², dobiva se vrijednost brzine zvuka u zraku $c = 343 \text{ m/s}$.

Dodatni primjeri brzine širenja zvuka kroz različite medije:

Tablica 1. Brzine širenja zvuka kroz različite medije [1]

| Medij | Brzina zvuka [m/s] |
|---------|--------------------|
| Zrak | 343 |
| Voda | 1440 |
| Željezo | 5000 |
| Drvo | 3320 |
| Guma | 40-150 |
| Staklo | 3490 |

¹ ISA – engl. *International Standard Atmosphere* – Međunarodna standardna atmosfera

² SL – engl. *Sea Level* – Razina mora

2.1.2. Fizikalne veličine za opis zvuka

Najznačajnije fizikalne veličine za opis zvuka su:

- Zvučni tlak
- Zvučna snaga
- Zvučni intenzitet

Zvučni tlak je devijacija lokalnog tlaka s obzirom na ambijentalni odnosno referentni tlak uzrokovan zvučnim valom. SI mjerna jedinica za zvučni tlak je Paskal [Pa].

$$p = \rho_0 c v \quad (3)$$

Oznaka $\rho_0 c$ predstavlja specifičnu akustičnu impedanciju ($\rho_0 c$ je tipično 410 Ns/m³).

Zvučni tlak L_p se radi jednostavnijeg pregleda zapisuje u obliku razine zvučnog tlaka s mjernom jedinicom dB.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

Vrijednost p_0 prema međunarodnom dogovoru iznosi 2×10^{-5} Pa.

Zvučna snaga P je zvučna energija koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu okomitu na smjer rasprostiranja. SI³ mjerna jedinica za zvučnu snagu je Watt [W].

$$P = \frac{S p^2}{\rho c} \quad (5)$$

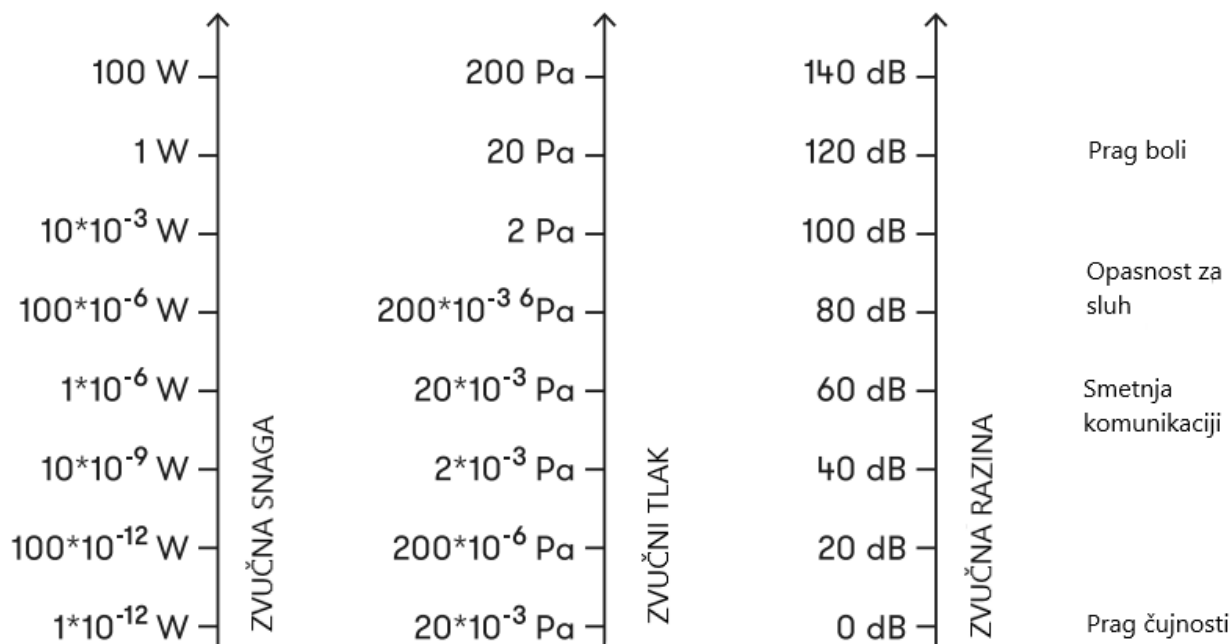
Zvučna snaga se također radi jednostavnijeg pregleda zapisuje u obliku razine zvučne snage L_P , izraženo u decibelima [dB].

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (6)$$

Referenta snaga za zdrav sluh iznosi $P_0 = 10^{-12}$ W.

Zvučna snaga je jedini parametar koji je isključivo svojstvo izvora, što znači da će izvor imati jednaku zvučnu snagu neovisno o uvjetima u kojima se nalazi, npr. otvoreni/zatvoreni prostor, udaljenost i smještaj i slično [3].

³ SI – franc. *Système International d'Unités* – Međunarodni sistem jedinica



Slika 2. Odnos zvučne snage, tlaka i razine [4]

Zvučni intenzitet I je količina energije koja u nekom vremenu prostruji kroz plohu od 1 m^2 postavljenu okomito na smjer rasprostiranja.

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (7)$$

Razina zvučnog intenziteta L_i je prikaz zvučnog intenziteta u decibelima [dB] s obzirom na referentnu razinu od 10^{-12} W/m^2 .

$$L_i = 10 \log \left(\frac{I}{10^{-12}} \right) \quad (8)$$

Važno je napomenuti da se veličine tlaka i snage zbrajaju skalarno, dok se vrijednost intenziteta zbraja vektorski [3].

2.2. Pojam buke

Buka je zvučna pojava koja ometa čovjeka u bilo kojoj fazi. U nekim situacijama i tihi zvuk može predstavljati smetnju pojedincu te se također promatra kao buka.

Bukom se smatra zvuk koji je dovoljno čujan, izdvojen od drugih zvukova te ima određen intenzitet. Kao i svaki drugi zvuk, buka se pojavljuje također i u infrazvučnom i ultrazvučnom dijelu spektra. Infrazvučna buka zbog svoje velike valne duljine može biti vrlo neugodna zbog vrlo velikog dometa, dok ultrazvučna buka, zbog visoke frekvencije odnosno niske valne duljine, nema veliki domet te se lako može izbjeći.

Ekvivalentna razina buke L_{eq} je deskriptor razine buke za određeno razdoblje, a mjeri se standardnim zvukomjerom ili odgovarajućim mjernim uređajem izvedenim u skladu s IEC⁴, te se izražava u A-vrednovanim decibelima. Predstavlja stalnu razinu buke u decibelima koja bi unutar promatranog vremena stvarala isti efekt kao i vremenski promjenjiva razina buke niza događaja.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^2 dt \quad (9)$$

Oznaka p_A predstavlja trenutni A-vrednovani zvučni tlak, dok je p_0 referentni tlak u iznosu od 20 μ Pa.

Buka po trajnosti može biti konstanta ili promjenjiva, stoga je proces procjene štetnog djelovanja buke kompleksan te L_{eq} ima ulogu korisnog alata u tom procesu.

U svrhu usklađenja utjecaja buke na ljudsko uho, uvedeni su karakteristični težinski korekcijski filteri, koji daju pojedinim frekvencijskim opsezima veće ili manje značenje. U ovom radu najznačajnija je težinska krivlja A koja prati invertiranu karakteristiku 40-fonske krivulje, te se mjerenje odvijalo koristeći A-vrednovanje [1].

⁴ IEC – *International Electrotechnical Commission* – Međunarodna elektrotehnička komisija

2.3. Glavne metode vrednovanja

U svrhu dobivanja relevantnih rezultata kod mjerenja buke, koristi se odgovarajuće vrednovanje (ponderacija) odnosno daje se težina određenim frekvencijama ovisno o ciljanim rezultatima. Glavna tri oblika vrednovanja su A, C i Z.

A-vrednovanje je standardno dodjeljivanje težine čujnim frekvencijama zvuka u cilju dobivanja rezultata koji prikazuju odgovor ljudskog uha na zvuk. Ovo je najkorišteniji oblik vrednovanja te se najčešće koristi za prikaz odgovora ljudskog uha na glasnoću. Mjerenja dobivena korištenjem A-vrednovanjem zapisuje se kao dB(A) ili dBA.

C-vrednovanje daje veću težinu odnosno ima veći naglasak na niskim frekvencijama nego A-vrednovanje, a koristi se najčešće za mjerenja viših razina zvučnog tlaka. Mjerenja dobivena korištenjem C-vrednovanja zapisuje se kao dB(C) ili dBC.

Z-vrednovanje je linearno te se definira kao linearni frekvencijski odgovor od 8 Hz do 20 kHz ± 1.5 dB odnosno buka bez težinske vrijednosti za ljudski sluh. Najčešće se koristi u oktavno- i/ili tercno-pojasnim analizama buke. Mjerenja dobivena korištenjem Z-vrednovanja zapisuje se kao dB(Z) ili dBZ [5].

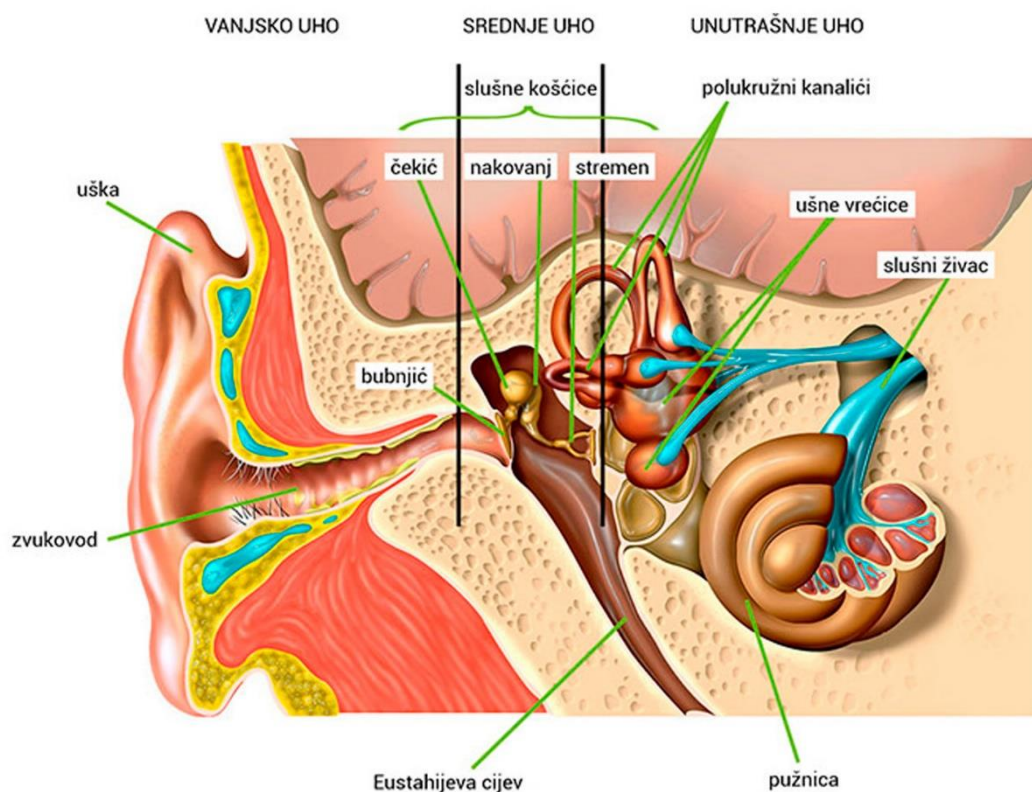
3. UTJECAJ BUKE NA ČOVJEKA

Buka je neizbježna pojava u letaćkim operacijama koja djeluje u obliku vanjske i unutarnje buke. Vanjska buka ima izraziti utjecaj na stanovništvo i životinje u blizini aerodroma dok neki stariji komercijalni i vojni zrakoplovi imaju izraziti utjecaj kroz cijelu svoju trajektoriju. Unutarnja buka ima izričit utjecaj na posadu i putnike, stoga je važno pravilno pristupiti zaštiti od buke da bi se izbjegle dugotrajne posljedice.

3.1. Ljudsko uho

Uho (slika 3.) je primarni slušni organ čovjeka, koji akustičnu energiju pretvara u električnu. Slušni organ dijeli se u tri cjeline: vanjsko uho, srednje uho i unutrašnje uho. Osim uha koje omogućuje aerotimpanalni osjet, postoji i kranijalni slušni osjet koji funkcionira na temelju koštane vodljivosti.

Vanjsko uho se sastoji od uške i zvukovoda. Uška usmjeruje zvučne valove u ušni kanal odnosno zvukovod gdje se zvuk pojačava. Nakon prolaska kroz ušni kanal, zvučni val se susreće s fleksibilnom, ovalnom membranom koja se naziva bubnjić odnosno timpanaska membrana i uzrokuje vibraciju.



Slika 3. Građa ljudskog uha [6]

U srednjem uhu, vibracije s bubnjića pokreću slušne koščice koji dalje proširuju frekvencijski pojas te prigušuju rezonancije. Slušne koščice su najmanje kosti u ljudskom tijelu te se sastoje od čekića, nakovnja i stremena. Slušne koščice povezuju srednje i unutarnje uho te prenose zvučni val na polukružne kanaliće. Na slici 3 se također uočava Eustahijeva cijev čija je svrha ujednačavanje vanjskog tlaka zraka i tlaka zraka unutar srednjeg uha.

Zvučni val ulazi u unutrašnje uho odnosno u pužnicu, koja je svoj naziv dobila zbog oblika. U pužnici se nalazi fluid koji titra kao odgovor na vibracije te svojim pomicanjem utječe na oko 25,000 živčanih završetaka. Vrhovi živaca stvaraju električne impulse kao reakciju na vibracije iz srednjeg uha te kroz slušni živac šalju signal u mozak odnosno centar za sluh u korteksu koji pritom interpretira signal i stvara zvučni percepciju.

Uho nije jednako osjetljivo na sve zvučne frekvencije te da bi se postigao jednaki subjektivni osjećaj glasnoće potrebni su različiti tlakovi pojedinih frekvencija. Razlog tome je razlika u impedanciji uha i zraka s obzirom na frekvenciju. Osim samog čina slušanja, uho ima važnu ulogu u lokalizaciji zvuka odnosno mogućnosti prepoznavanja smjera dolaska zvučnog vala [7].

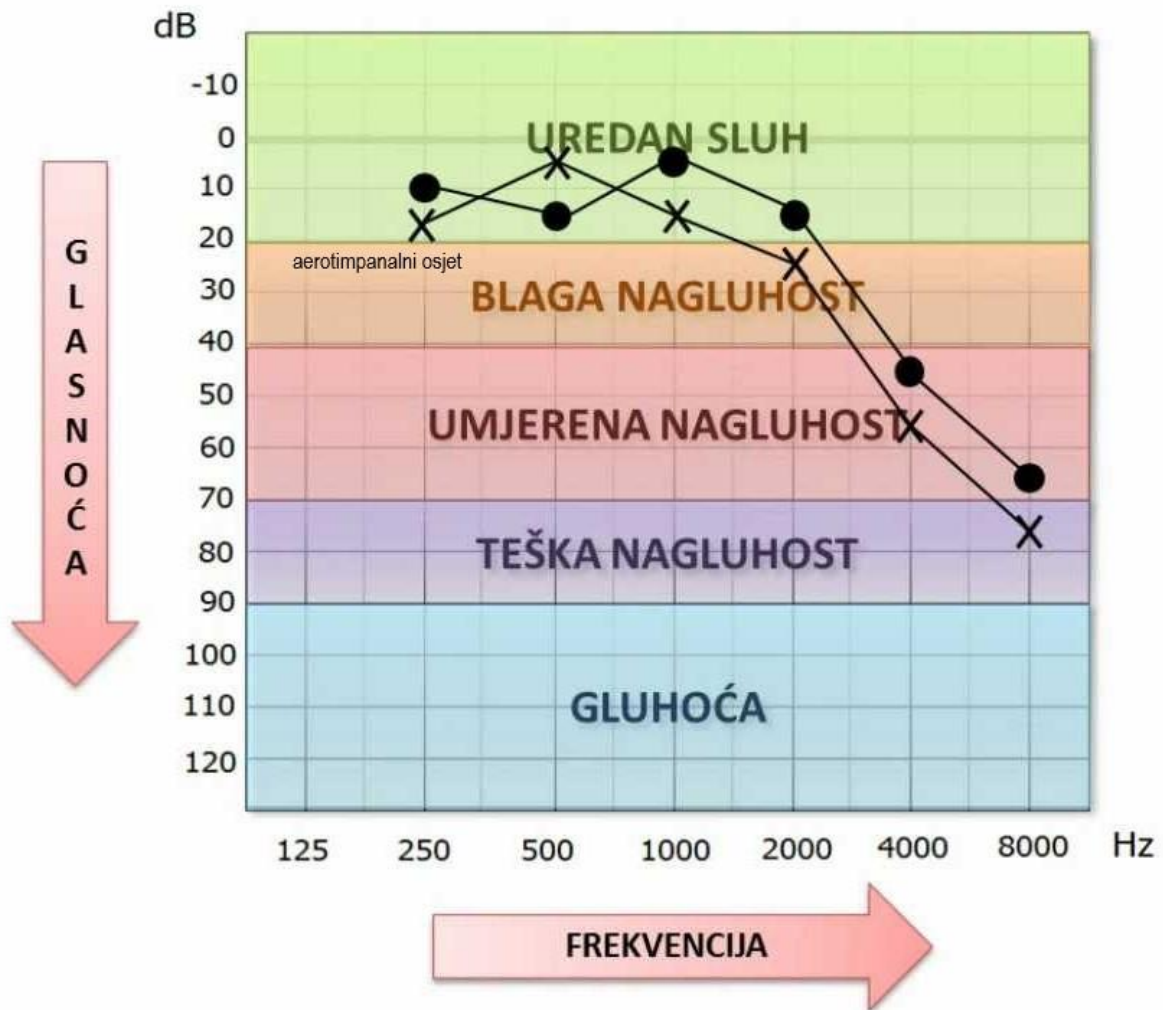
3.2. Posljedice utjecaja buke na čovjeka

Oštećenje sluha je smanjenje mogućnosti slušanja ili razumijevanja govora i zvukova u okolini. Do gubitka sluha može doći u bilo kojem području uha ili živaca koji prenose signal do mozga. U određenim slučajevima gubitak sluha može biti privremen dok u nekima dolazi do trajnog gubitka slušne sposobnosti.

Glasni zvukovi imaju značajan utjecaj na unutarnje uho te jednokratna izloženost zvuku visoke razine može izazvati trajnu štetu. Promjene na unutarnjem uhu ili auditornim živcima u pravilu imaju trajne posljedice.

Do oštećenja sluha dolazi kod izlaganja visokim razinama zvučnog tlaka koji u prosjeku iznosi oko 130 dB i više te varira kod pojedinaca. Kako se oštećenja sluha akumuliraju u unutarnjem uhu, slušatelj nije svjestan gubitka slušnog osjeta na određene frekvencijske pojaseve te ih otkriva provođenjem slušnog testa odnosno audiometrije [8].

Slika 4. prikazuje rezultate audiometrije u obliku audiograma te način interpretacije. Rezultati slušatelja u ovom primjeru prikazuju gubitak slušne sposobnosti u spektru visokih frekvencija te zahtjeva puno veću razinu zvučnog tlaka da bi mogao interpretirati zvuk visoke frekvencije.



Slika 4. Primjer audiograma oštećenog sluha [8]

"Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buke na radu, NN 46/2008-1577" utvrđuje minimalne zahtjeve zaštite radnika od rizika po njihovo zdravlje koji proizlaze od izloženosti buci te propisuje sljedeće [9]:

- granična vrijednost izloženosti:
 $L(EX, 8h) = 87 \text{ dB(A)}$ i $p(\text{peak}) = 200 \text{ Pa}$
- gornja upozoravajuća granica izloženosti:
 $L(EX, 8h) = 85 \text{ dB(A)}$ i $p(\text{peak}) = 140 \text{ Pa}$
- donja upozoravajuća granica izloženosti:
 $L(EX, 8h) = 80 \text{ dB(A)}$ i $p(\text{peak}) = 112 \text{ Pa}$

Osim navedenog utjecaja na sluh, buka također ima negativan utjecaj na psihofizičko stanje čovjeka, ali i na sigurnost letačkih operacija. Neke od posljedica uključuju [1]:

- *Reakcije organizma* – poremećaji organizma, hipertenzija
- *Smanjenje radne sposobnosti* – utjecaj na koncentraciju i percepciju mogućih ugroza tijekom redovnih operacija
- *Abnormalna percepcija glasnoće*
- *Tinitus* – Kontinuirani pištavi zvuk u ušima nakon prestanka djelovanja buke
- *Osjećaj nelagode*
- *Metabolički poremećaji*
- *Ometanje komunikacije u zrakoplovu* – Uvode se indeksi SII⁵ i SIL⁶ koji prikazuju utjecaj buke na razumljivost govora i maksimalnu udaljenost za odvijanje normalnog razgovora

⁵ SII – *Speech Intelligibility Index* – indeks razumljivosti govora

⁶ SIL – *Speech Interference Level* – razina ometanja govora

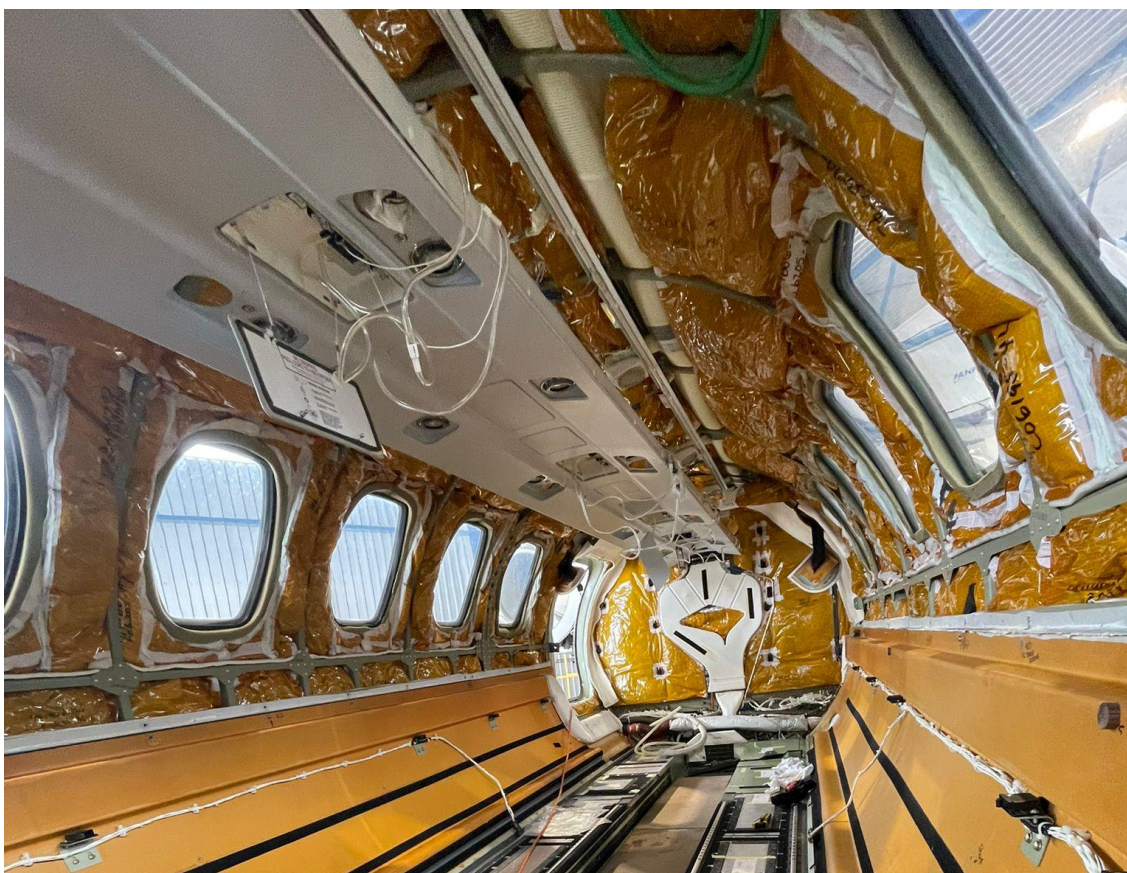
3.3. Zaštita od buke

U svrhu prevencije i umanjenja utjecaja buke na ljude koriste se razne metode zaštite od buke na radu kojima je cilj održati intenzitet buke u granicama tolerancije.

3.3.1. Tehničke mjere zaštite od buke

Tehničkim mjerama zaštite nastoji se smanjiti razina buke u kabini. Primarno se teži smanjiti buku na izvoru, a to kod zrakoplova najčešće podrazumijeva povećanje omjera zaobilaznog zraka i ulazećeg zraka na usisu mlaznog motora i korištenje tehničkih izvedbi koji smanjuju zvučni tlak na izlazu motora, kao što su prigušivači.

S obzirom da se buka na izvoru može smanjiti samo do određene mjere, potrebno je pristupiti i metodama izolacije kabine te korištenju komponenata koje apsorbiraju zvučne valove i vibracije. Za navedeno su koriste razni porozni materijali poput kamene i staklene vune ili spužvasti materijali. Postavljaju se unutar oplata kabine i imaju značajan utjecaj u smanjenju kabinske buke.



Slika 5. Tehničke mjere za umanjenje buke kabine zrakoplova CJ2 (autorska fotografija)

Vibracije se prenose kroz strukturu kabine zrakoplove. Da bi se smanjile vibracije u kabini te postigla određena vibroizolacija, koriste se gumeni ili metalno-elastični elementi za odvajanje izvora od okolne strukture.

Neki zrakoplovi koriste aktivne metode smanjenja buke kabine. Kao primjer se može navesti Dash 8 - Q400, koji koristi ANVS⁷ sustav. Sustav se sastoji od senzora (mikrofona) i odašiljača (zvučnika). Mikrofon aktivno prate frekvencijski spektar buke u kabini uzrokovane propelerom zrakoplova, a zvučnici odašilju zvučni val suprotne faze te na načelu destruktivne interferencije poništavaju (do određene mjere) buku smanjujući cjelokupnu buku kabine [10].

Zrakoplov Cessna Citation CJ2 koristi opciju sinkronizacije motora u svrhu smanjenja unutarnje buke. Navedena opcija izjednačava vrijednosti $\%N_1$ te na taj način eliminira buku nastalu zbog različite brzine vrtnje ventilatora motora.

3.3.2. Osobne mjere zaštite od buke

Osobne mjere zaštite dijele se na vanjske i unutarnje. Prilikom kretanja oko zrakoplova s radećim motorima važno je imati adekvatnu zaštitu. Motori u radu stvaraju razine buke daleko iznad granica tolerancije te izlaganje takvoj buci može imati trajne posljedice na sluh stoga se koriste neke od navedenih metoda:

- Zaštitna sredstva koja se koriste preko uha
- Zaštitna sredstva koja se umeću u zvukovod



Slika 6. Osobne mjere zaštite od vanjske buke [11]

⁷ ANVS – *Active Noise and Vibration Suppression* – Sustav za aktivno prigušenje zvuka i vibracija

Postoje slučajevi kada se razina buke nalazi u granicama tolerancije no svejedno se teži smanjenju utjecaja kontinuirane buke u redovnim operacijama. Na zrakoplovu Cessna Citation CJ2 u praksi se kroz cijelo odvijanje letačkih operacija koriste slušalice za komunikaciju, iako je razina buke na tolerantnoj razini. Korištenjem slušalica s mogućnošću aktivnog prigušenja razine buke postiže se viša razina razumljivosti govora i umanjuje se mogućnost pogrešaka u komunikaciji.

Posada zrakoplova Cessna Citation CJ2 u zrakoplovnoj kompaniji autora rada koristi slušalice Telex Airman. Aktivno prigušenje omogućuje smanjenje razine buke za vrijednost do 12 dB [12].

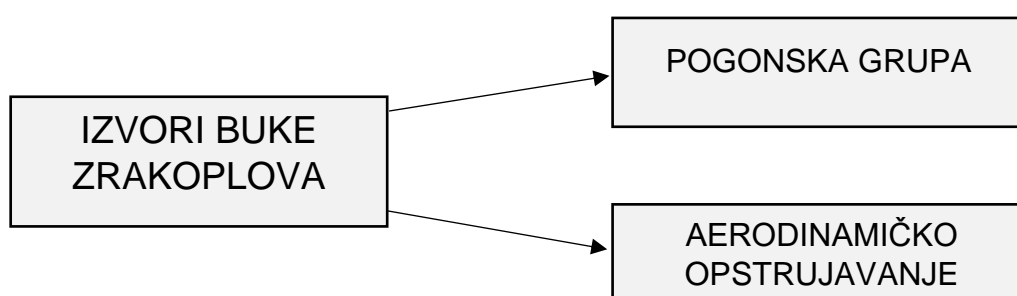


Slika 7. Slušalice Telex Airman (autorska fotografija)

4. IZVORI BUKE ZRAKOPLOVA CJ2

4.1. Zrakoplov kao izvor buke

Buka se definira kao neželjeni zvuk kojeg proizvodi zrakoplov. Zračni promet se svakodnevno razvija te je sve veći utjecaj zrakoplovnih emisija na ljude i atmosferu. Zrakoplovna buka kao jedan od faktora zrakoplovnih emisija značajno se regulira u području tehničkih preinaka pa sve do reguliranja putanja zrakoplova u svrhu izbjegavanja osjetljivih područja. Buka koju proizvodi sami zrakoplov dijeli se na unutarnju i vanjsku, ali obje su uzrokovane istim izvorima, slika 8. [1].



Slika 8. Izvori buke zrakoplova [1]

Najčešći izvori buke pogonske grupe su kompresor, turbina i ispuh. Ispuh, zbog velikih promjena tlaka na izlazu, ima najveću razinu buke te je primarni subjekt vanjske buke.

Buka aerodinamičkog opstrujavanja uzrokovana je turbulentnim graničnim slojem, strukturom zmaja, pozicijom stajnog trapa te pozicijom zakrilaca i pretkrilaca.

U režimu polijetanja su najviše razine buke. Uzrok tome je visoka postavka snage, nadzvučna brzina vrhova lopatica i udarni valovi. Zbog nejednolike geometrije dolazi i do cikličnih varijacija amplitude, frekvencije i faze koje dovode do pojave specifičnog zvuka na usisu motora poznatog pod nazivom „*buzzsaw noise*“.

U režimu krstarenja, postavka snage je značajno niža te je i sama razina buke uzrokovane pogonskom skupinom niža. U krstarenju je manji utjecaj aerodinamičkih površina na cjelokupnu sliku aerodinamičke buke zbog činjenice da su stajni trap i aerodinamičke površine uvučene, ali zbog velike brzine zrakoplova pojavljuje se velika komponenta uzrokovana turbulencijom zraka u graničnom sloju oplata koja ima znatan utjecaj na unutarnju buku.

U režimu slijetanja, postavka snage je niska no dolazi do povećanja unutarnje buke zbog izvlačenja zakrilaca i stajnog trapa što osjetno smanjuje ugodnost putnicima.

4.2. Tehničke karakteristike zrakoplova CJ2

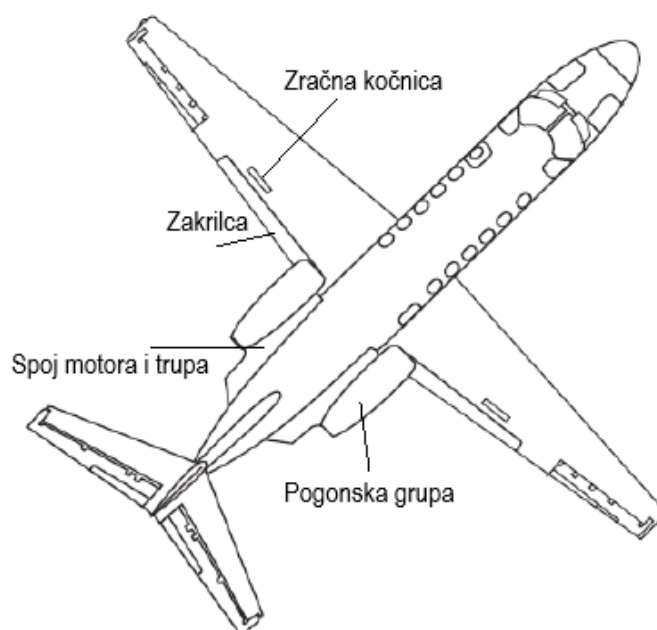
Cessna Citation CJ2 je poslovni zrakoplov lake kategorije, namijenjen je za letove kraće udaljenosti do 1500 NM. Idealan je zrakoplov za letove unutar europskog zračnog prostora zbog niže cijene eksploatacije te nudi mogućnosti slijetanja na kratke piste i teže dostupne aerodrome. Osnovni tehnički podaci prikazani su u Tablici 2. [13].

Tablica 2. Tehničke karakteristike zrakoplova Cessna CJ2 [13]

| | |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Proizvođač | Cessna Aircraft / Textron Aviation SAD |
| Posada | Pilot Kopilot |
| Putnička sjedala | 6+1 |
| Pogonska skupina | 2 turbomlazna motora Williams/Rolls Royce FJ44-2C |
| Operativna brzina | 412 kn / Mach 0.72 |
| Operativna visina | 45000 ft / 13.7 km |
| Dolet | 1500 NM |
| Masa | BOM – 3543 kg MTOM – 5613 kg MRM – 5670 kg |
| Dimenzije | Raspon krila – 15.09 m Duljina – 14.53 m Visina – 4.24 m |
| Duljina polijetanja | SL – 1040 m 1500 m NV – 1520 m |
| Duljina slijetanja | SL – 800m |

4.3. Izvori buke na zrakoplovu CJ2

Kao i kod drugih zrakoplova, izvori buke (Slike 9. i 10.) dijele se na dvije skupine. Prva skupina je buka pogonske grupe, uzrokovana radom Williams FJ44-2C motora, koji osim visokih razina buke proizvode i vibracije koje se prenose na trup zrakoplova. Druga skupina je aerodinamička buka koja također ovisi o fazi leta, npr. u određenim fazama leta koriste se dodatne aerodinamičke površine te se povećava utjecaj aerodinamičke buke. Svaki izvor buke sadrži i podskupine koje zajedno stvaraju cjelokupni učinak buke. Razine buke ovise o fazi leta te svi vanjski izvori uzajamno, prolaskom kroz oplatu, tvore unutarnju (kabinsku) buku.



Slika 9. Izvori buke na zrakoplovu CJ2 [13]



Slika 10. Podjela izvora buke zrakoplova CJ2 (autorska fotografija)

4.3.1. Buka pogonske grupe

Buka pogonske grupe nastaje radom uređaja za stvaranje potiska odnosno motora zrakoplova. Motori predstavljaju izvor visokih razine buke iz razloga što u procesu stvaranja potiska odnosno pretvaranja kemijske u toplinsku energiju dolazi do velikih promjena tlakova i temperatura u motoru što na ispuhu motora stvara veliku buku. Osim same buke koja nastaje radom motora, također dolazi do stvaranja vibracija koje se prenose putem nosača motora na oplatu zrakoplova i pridonose unutarnjoj buci zrakoplova.

Zrakoplov Cessna CJ2 s motorima FJ44-2C je klasificiran prema *ICAO Annex 16, Volume 1, Chapter 3*. U Tablici 3. su prikazane razine buke, izražene u EPNdB, za kategorije polijetanje, prilaz i lateralno [13].

Tablica 3. Razine buke zrakoplova Cessna CJ2 [13]

| Razine buke (EPNdB) | | |
|---------------------|-----------|--------|
| Polijetanje | Lateralno | Prilaz |
| 74.5 | 88.8 | 91.4 |

4.3.2. Aerodinamička buka

Aerodinamička buka zrakoplova nastaje zbog vrtložnih strujanja zraka koja nastaju prolaskom zraka oko trupa i aerodinamičkih površina zrakoplova. Izvlačenje konfiguracije zakrilaca i stajnog trapa uvelike povećava otpor zraka te dolazi do značajnog porasta aerodinamičke buke.

Strukturalna buka se širi u unutrašnjost zrakoplova putem same oplate, praćeno vibracijama. Navedena buka stoga doseže svoje maksimalne vrijednost pri maksimalnoj brzini leta i punoj konfiguraciji za slijetanje. Izvori aerodinamičke buke su prikazani na Slici 10.

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA UNUTARNJE BUKE ZRAKOPLOVA CJ2

5.1. Mjerni instrument i postupak mjerenja

U svrhu mjerenja koristi se mjerni instrument *Nor 140*. Navedeni zvukomjer se koristi za globalno i profilno mjerenje razine zvučnog tlaka odnosno intenziteta. Funkcije zvukomjera omogućavaju segmentno mjerenje te pohranjivanje podataka za naknadnu analizu. Sami zvukomjer koristi oktavni i tercni filter te paralelno mjeri i računa veliki broj parametara [14]. Oprema zvukomjera navedena je u Tablici 4.

Tablica 4. Popis opreme mjernog instrumenta Nor 140

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| <i>Torba</i> | <i>Instalacijski CD</i> |
| <i>Uputstva</i> | <i>AA baterije</i> |
| <i>Zaštitnik od vjetra</i> | <i>GRAS mikrofon</i> |
| <i>USB kabel</i> | <i>Avionski priključak</i> |
| <i>12 VDC izvor</i> | <i>Nor1215 kalibrator</i> |

Tablica 5. Mjerne faze leta

| | FAZA LETA (visina AMSL⁸) | POSTAVKA SNAGE [%] | IAS⁹[čv] / Mach |
|----------|--------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Pokretanje motora | Idle | / |
| 2 | Taksiranje | 30.0 | 20 |
| 3 | Polijetanje | 101.0 | 110 |
| 4 | Penjanje (5000 ft) | 97.3 | 230 |
| 5 | Krstarenje (34000 ft) | 100.0 | 0.70 |
| 6 | Spuštanje (29000 ft) | 98.0 | 260 |
| 7 | Prilaz (3000ft) | 65.0 | 140 |

⁸ AMSL – *engl. Above Mean Sea Level* – Visina u referenci na srednju razinu mora (QNH postavka)

⁹ IAS – *engl. Indicated Airspeed* – Indicirana brzina u čvorovima

U svrhu mjerenja, zvukomjer je postavljen u kokpit zrakoplova u razini glave između pilota i kopilota, sukladno standardu ANSI 5129:2001 (Slika 11.), dok je za snimanje u kabini zvukomjer postavljen u razini glave putnika na sjedalu 6. Snimanje je obavljeno u segmentima od 10 sekundi za određene faze leta. Mjerne faze leta su prikazane u Tablici 5.

Mjerenje razina buke kokpita obavljeno je 10.09.2022. na letu LFMN – LFPB, odnosno Nica – Pariz (Le Bourget).

Mjerenje razina buke kabine obavljeno je 11.-12.09.2022. kroz dva leta. Prvi dio mjerenja odrađen je na letu LDSP – LFMD, odnosno Split – Cannes, dok je drugi dio mjerenja odrađen na letu LYBE – LDZA, odnosno Beograd – Zagreb.



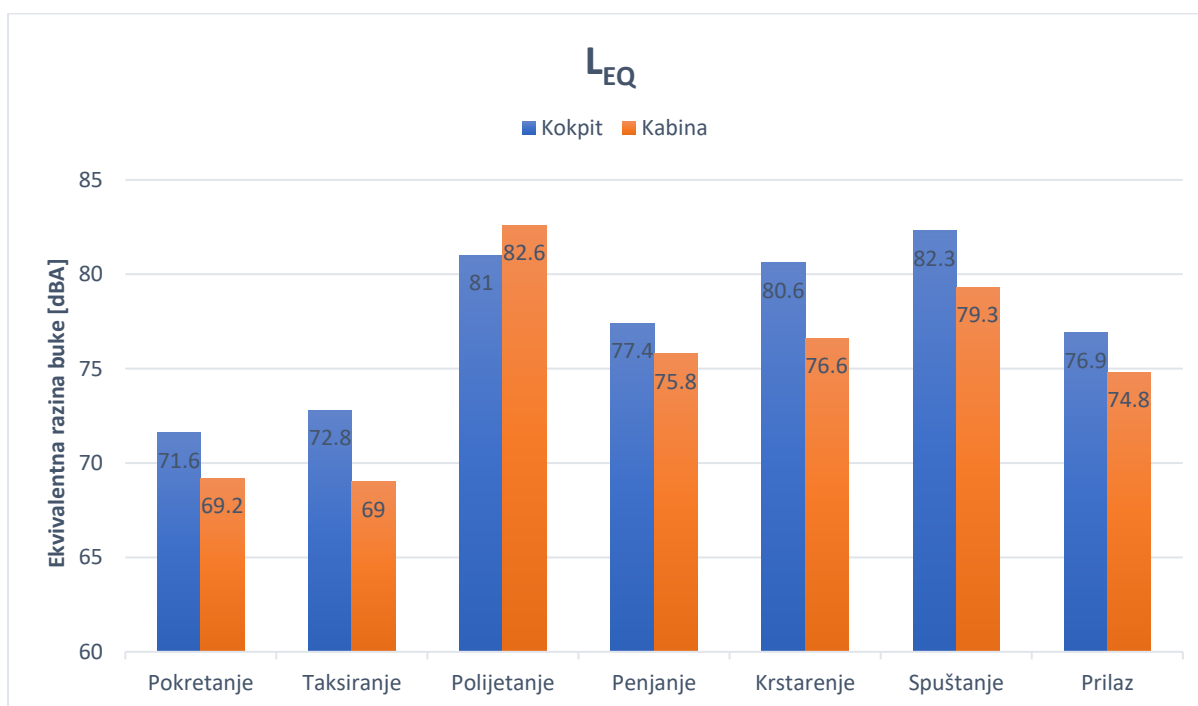
Slika 11. Mjerenje unutarnje buke kokpita zrakoplova Cessna CJ2 (autorska fotografija)

5.2. Rezultati mjerenja

Tablica 6. i graf 1. prikazuju L_{EQ} , odnosno ekvivalentnu vrijednost razine buke A-vrednovanom metodom za sve režime leta. Do najviših razina buke dolazi u polijetanju i spuštanju. Uspoređujući rezultate kokpita i kabine zrakoplova, uočava se da u kokpitu do najvećih razina buke dolazi u fazi spuštanja gdje prevladava aerodinamička buka, zbog činjenice da je kokpit smješten na prednjem dijelu zrakoplova te direktno izložen struji zraka, dok se u kabini najveća razina buke očitava u fazi polijetanja zbog položaja motora na stražnjem dijelu zrakoplova. Rezultati su izraženi u dBA.

Tablica 6. Rezultati mjerenja buke: Ekvivalentna vrijednost razina buke (L_{EQ})

| Režim | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| Kokpit [dBA] | 71.6 | 72.8 | 81.0 | 77.4 | 80.6 | <u>82.3</u> | 76.9 |
| Kabina [dBA] | 69.2 | 69.0 | <u>82.6</u> | 75.8 | 76.6 | 79.3 | 74.8 |

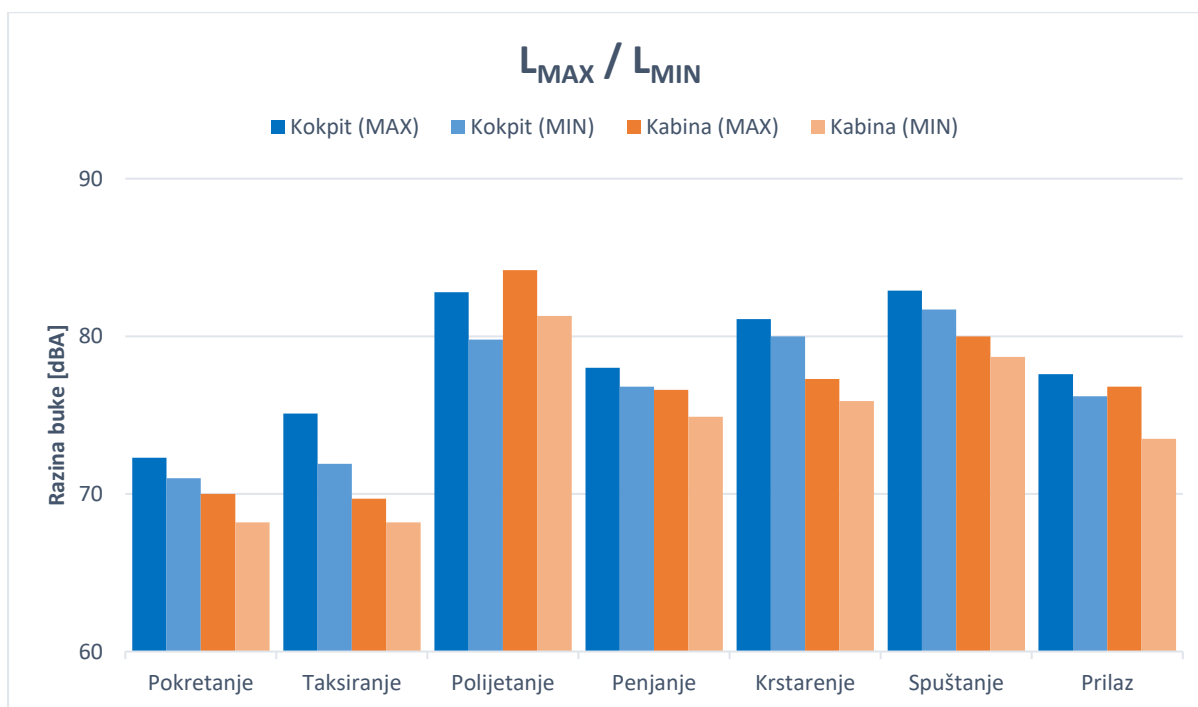


Graf 1. Rezultati mjerenja buke: Ekvivalentna vrijednost razina buke (L_{EQ})

Tablica 7. i graf 2. prikazuju L_{MAX} i L_{MIN} , odnosno maksimalnu i minimalnu razinu buke izmjerenu A-vrednovanom metodom u vremenskom segmentu od 10 sekundi. Do najveće razlike minimalne i maksimalne vrijednosti dolazi u fazi taksiranja i polijetanja zbog tehničkih mana manevarskih površina i uzletno-sletne staze dok su kod ostalih faza rezultati konstantniji.

Tablica 7. Rezultati mjerenja buke: Maksimalne i minimalne vrijednosti razina buke (L_{MAX}/L_{MIN})

| | Režim | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|----------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| KOKPIT | [dBA] _{max} | 72.3 | 75.1 | 82.8 | 78.0 | 81.1 | <u>82.9</u> | 77.6 |
| | [dBA] _{min} | 71.0 | 71.9 | 79.8 | 76.8 | 80.0 | <u>81.7</u> | 76.2 |
| KABINA | [dBA] _{max} | 70.0 | 69.7 | <u>84.2</u> | 76.6 | 77.3 | 80.0 | 76.8 |
| | [dBA] _{min} | 68.2 | 68.2 | <u>81.3</u> | 74.9 | 75.9 | 78.7 | 73.5 |



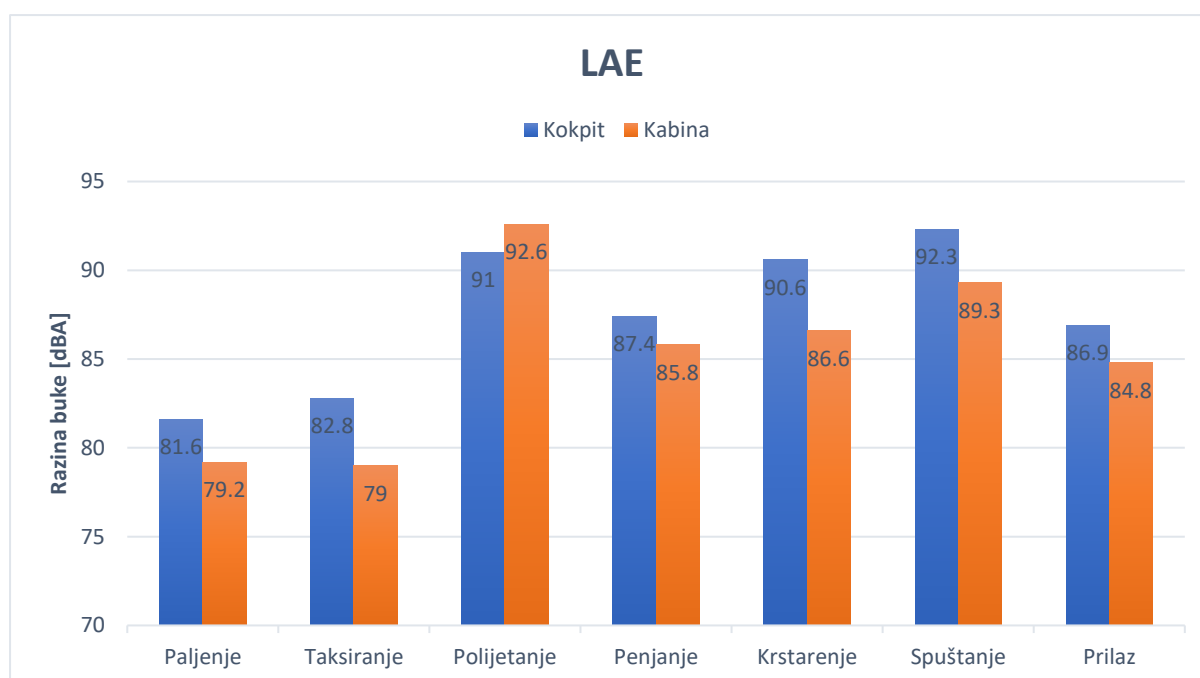
Graf 2. Rezultati mjerenja buke: Maksimalne i minimalne vrijednosti razina buke (L_{MAX}/L_{MIN})

Tablica 8. i graf 3. prikazuju **LAE**, odnosno A-vrednovane vrijednosti razine izloženosti buci. Navedena metoda normalizira ekvivalentu vrijednost razine buke na segment od 10 sekundi. Koristi se za usporedbu energije bučnih događaja koji imaju različita vremena trajanja.

Iz rezultata se uočava velika izloženost buci u kokpitu zrakoplova, pogotovo u fazi spuštanja te se zbog toga preporuča korištenje slušalica u svrhu smanjenja utjecaja buke na posadu.

Tablica 8. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovana vrijednost razine izloženosti buci u segmentu od 10 sekundi (LAE)

| Režim | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| Kokpit [dBA] | 81.6 | 82.8 | 91.0 | 87.4 | 90.6 | <u>92.3</u> | 86.9 |
| Kabina [dBA] | 79.2 | 79.0 | <u>92.6</u> | 85.8 | 86.6 | 89.3 | 84.8 |

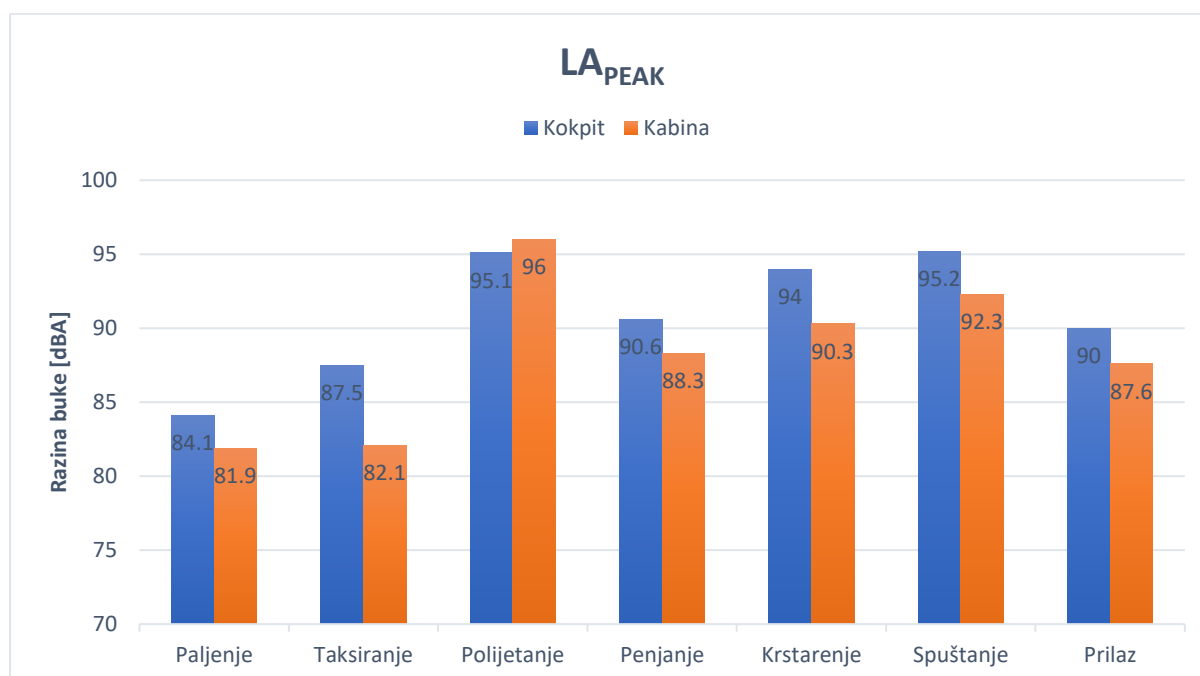


Graf 3. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovana vrijednost razine izloženosti buci u segmentu od 10 sekundi (LAE)

Tablica 9. i Graf 4. prikazuju LA_{PEAK} , odnosno A-vrednovane vršne vrijednosti razina buke. Do najviših vršnih razina buke dolazi u fazama polijetanja i spuštanja dok se najmanja vršna razina buke očitava kod startanja motora.

Tablica 9. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovane vršne vrijednosti razina buke (LA_{PEAK})

| Režim | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| Kokpit [dBA] | 84.1 | 87.5 | 95.1 | 90.6 | 94.0 | <u>95.2</u> | 90.0 |
| Kabina [dBA] | 81.9 | 82.1 | <u>96.0</u> | 88.3 | 90.3 | 92.3 | 87.6 |



Graf 4. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovane vršne vrijednosti razina buke (LA_{PEAK})

Tablice 10. i 11. te Grafovi 5. i 6. prikazuju $L_{FEQ(Oct)}$, odnosno raspodjelu razina buke u oktavnom pojasu u kokpitu i kabini. Uočava se prevladavanje niskih i srednjih oktavnih frekvencija u cjelokupnoj slici unutarnje buke kokpita zrakoplova Cessna CJ2. Maksimalne vrijednosti naglašene su žutom bojom.

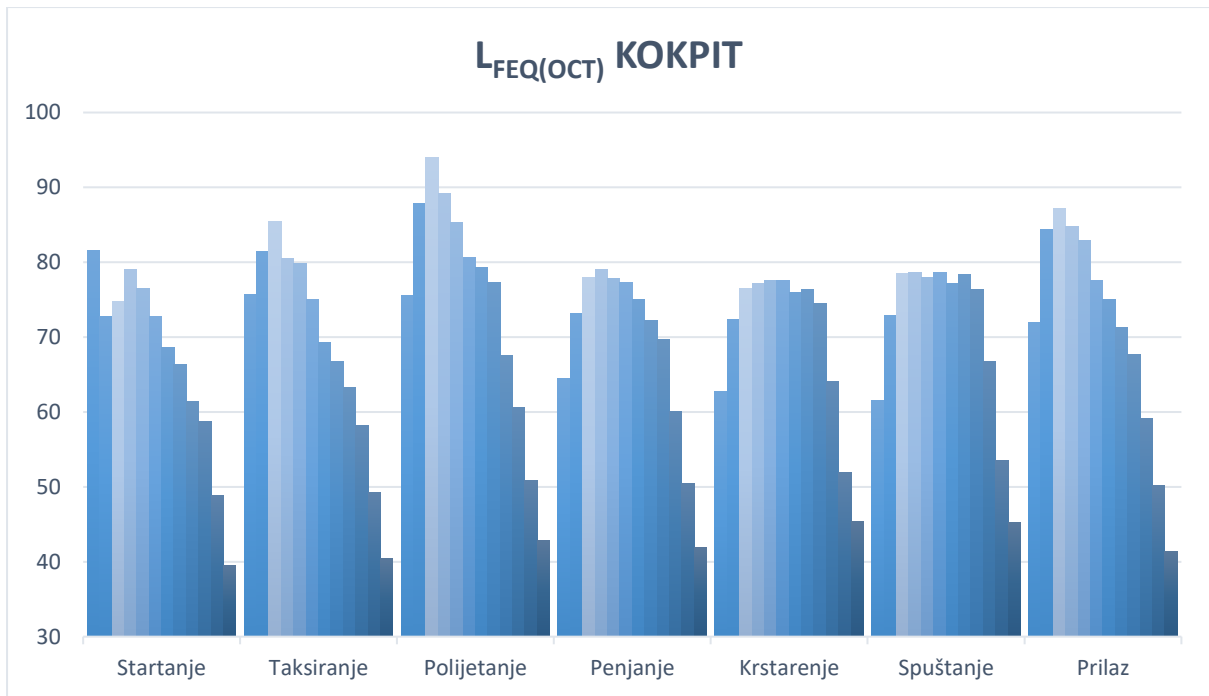
U grafovima od 7. do 13. prikazani su rezultati mjerenja buke u oktavnom pojasu po pojedinim fazama leta u svrhu dobivanja jednostavnijeg i zornijeg prikaza.

Tablica 10. Rezultati mjerenja buke: Razine buke kokpita u oktavnom pojasu ($L_{FEQ(Oct)}$)

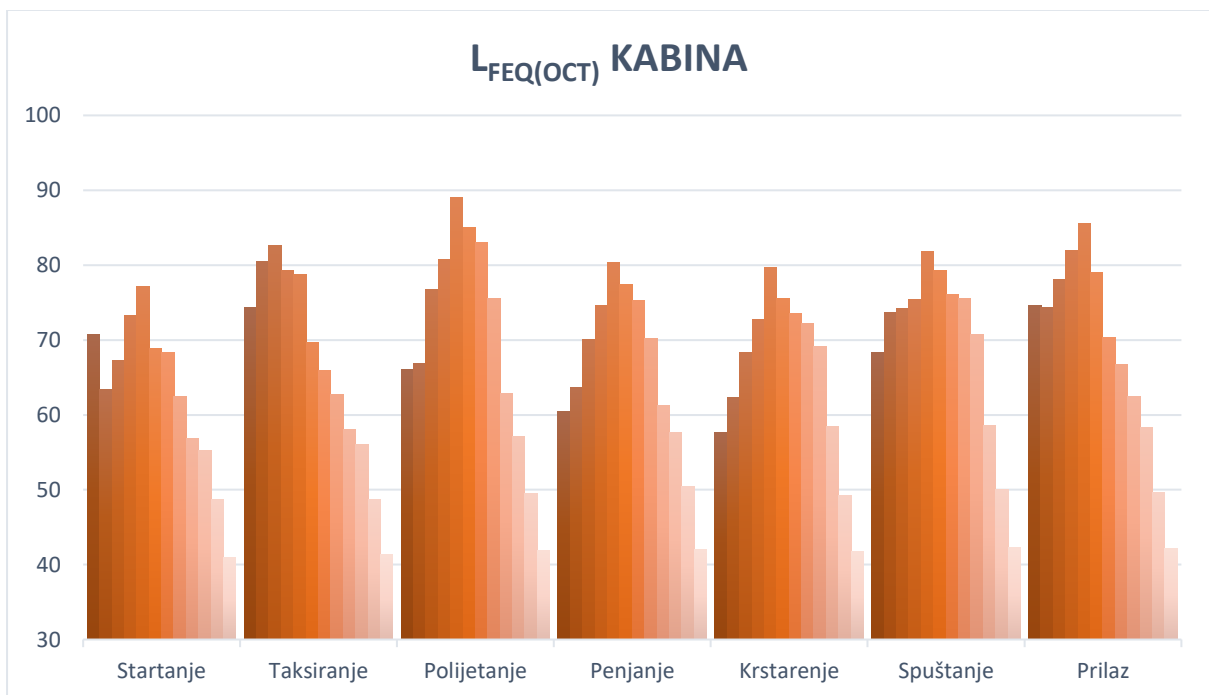
| Režim | KOKPIT [dBA] | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | 8.0 Hz | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1.0 kHz | 2.0 kHz | 4.0 kHz | 8.0 kHz | 16.0 kHz |
| 1 | 81.6 | 72.7 | 74.8 | 79 | 76.5 | 72.8 | 68.6 | 66.3 | 61.4 | 58.7 | 48.9 | 39.5 |
| 2 | 75.7 | 81.5 | 85.5 | 80.5 | 79.8 | 75 | 69.3 | 66.7 | 63.3 | 58.2 | 49.3 | 40.5 |
| 3 | 75.6 | 87.9 | 94 | 89.2 | 85.3 | 80.6 | 79.3 | 77.3 | 67.6 | 60.6 | 50.9 | 42.8 |
| 4 | 64.5 | 73.1 | 78 | 79 | 77.9 | 77.3 | 75 | 72.2 | 69.7 | 60.1 | 50.4 | 41.9 |
| 5 | 62.8 | 72.4 | 76.5 | 77.1 | 77.6 | 77.5 | 75.9 | 76.4 | 74.5 | 64.1 | 51.9 | 45.4 |
| 6 | 61.6 | 72.9 | 78.5 | 78.6 | 78 | 78.7 | 77.2 | 78.4 | 76.3 | 66.8 | 53.5 | 45.3 |
| 7 | 71.9 | 84.4 | 87.2 | 84.8 | 82.9 | 77.6 | 75 | 71.3 | 67.7 | 59.1 | 50.2 | 41.4 |

Tablica 11. Rezultati mjerenja buke: Razine buke kabine u oktavnom pojasu ($L_{FEQ(Oct)}$)

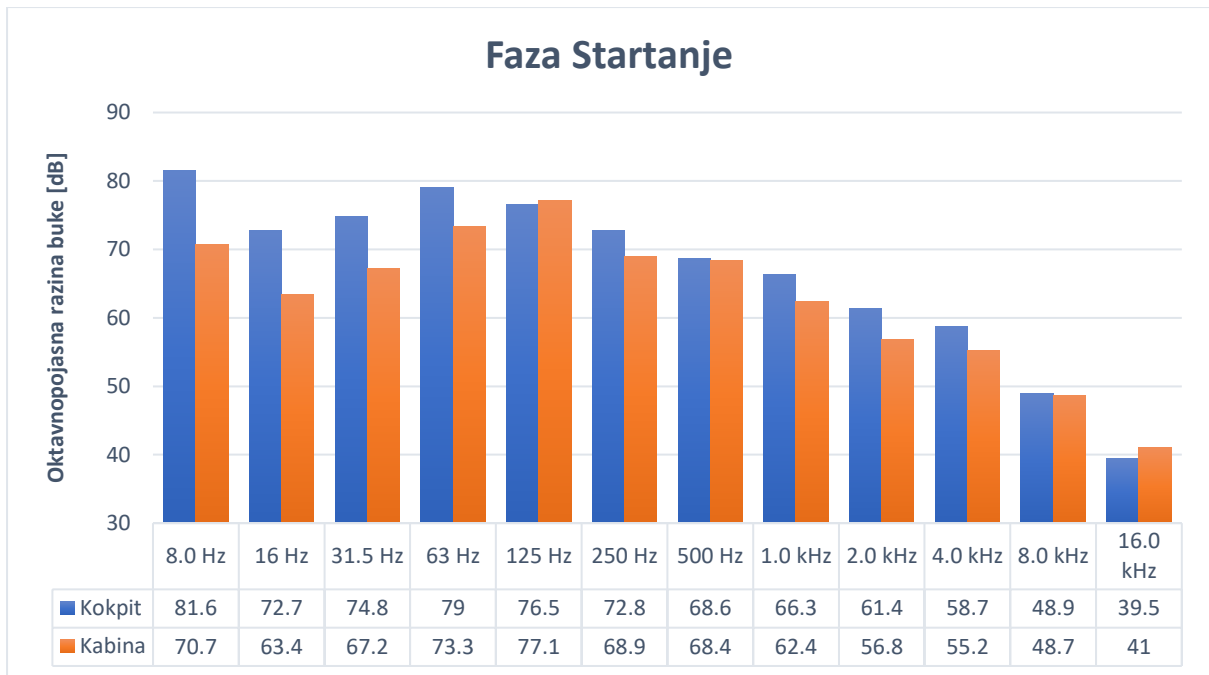
| Režim | KABINA [dBA] | | | | | | | | | | | |
|-------|--------------|----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | 8.0 Hz | 16 Hz | 31.5 Hz | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1.0 kHz | 2.0 kHz | 4.0 kHz | 8.0 kHz | 16.0 kHz |
| 1 | 70.7 | 63.4 | 67.2 | 73.3 | 77.1 | 68.9 | 68.4 | 62.4 | 56.8 | 55.2 | 48.7 | 41.0 |
| 2 | 74.3 | 80.5 | 82.6 | 79.3 | 78.7 | 69.7 | 65.9 | 62.7 | 58.1 | 56.0 | 48.7 | 41.3 |
| 3 | 66.0 | 66.9 | 76.8 | 80.7 | 89.0 | 85.0 | 83.0 | 75.5 | 62.8 | 57.1 | 49.5 | 41.9 |
| 4 | 60.5 | 63.6 | 70.1 | 74.6 | 80.4 | 77.4 | 75.3 | 70.2 | 61.3 | 57.7 | 50.5 | 42.0 |
| 5 | 57.7 | 62.3 | 68.3 | 72.8 | 79.7 | 75.6 | 73.5 | 72.2 | 69.2 | 58.5 | 49.2 | 41.7 |
| 6 | 68.4 | 73.7 | 74.2 | 75.4 | 81.8 | 79.3 | 76.1 | 75.5 | 70.8 | 58.6 | 50.0 | 42.3 |
| 7 | 74.6 | 74.4 | 78.1 | 82.0 | 85.6 | 79.0 | 70.3 | 66.7 | 62.5 | 58.3 | 49.7 | 42.2 |



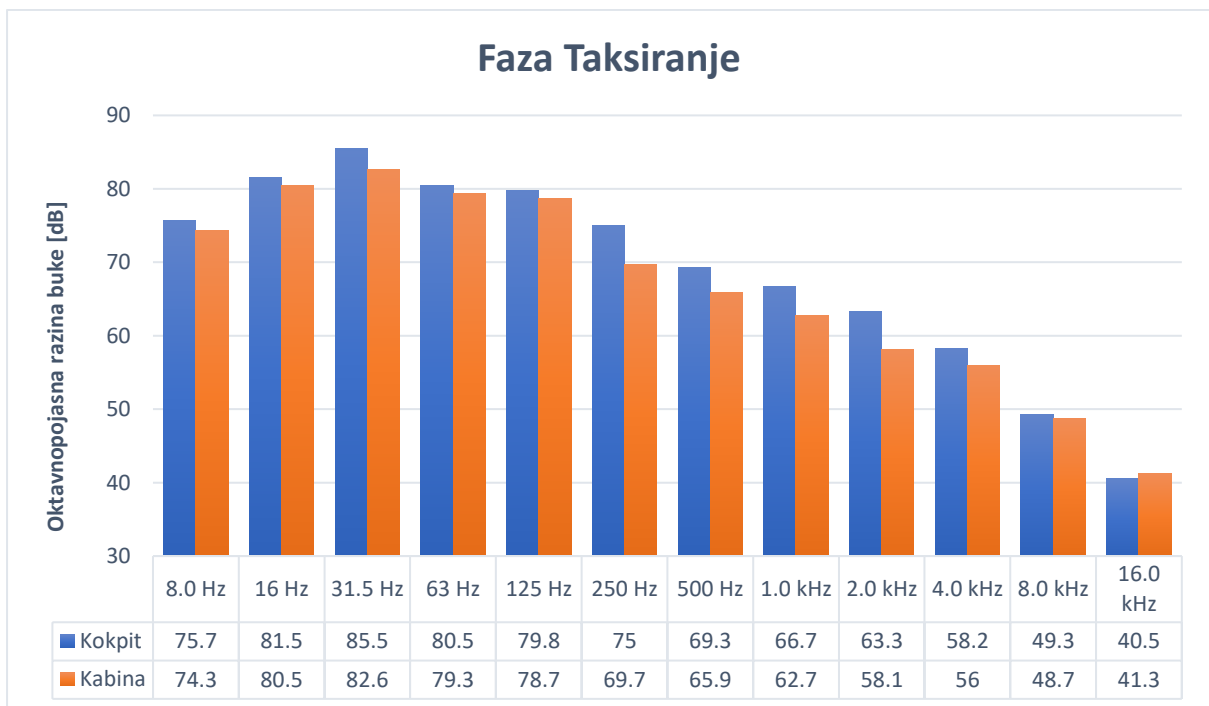
Graf 5. Rezultati mjerenja buke: razine buke kokpita u oktavnom pojasu u dB ($L_{FEQ(OCT)}$)



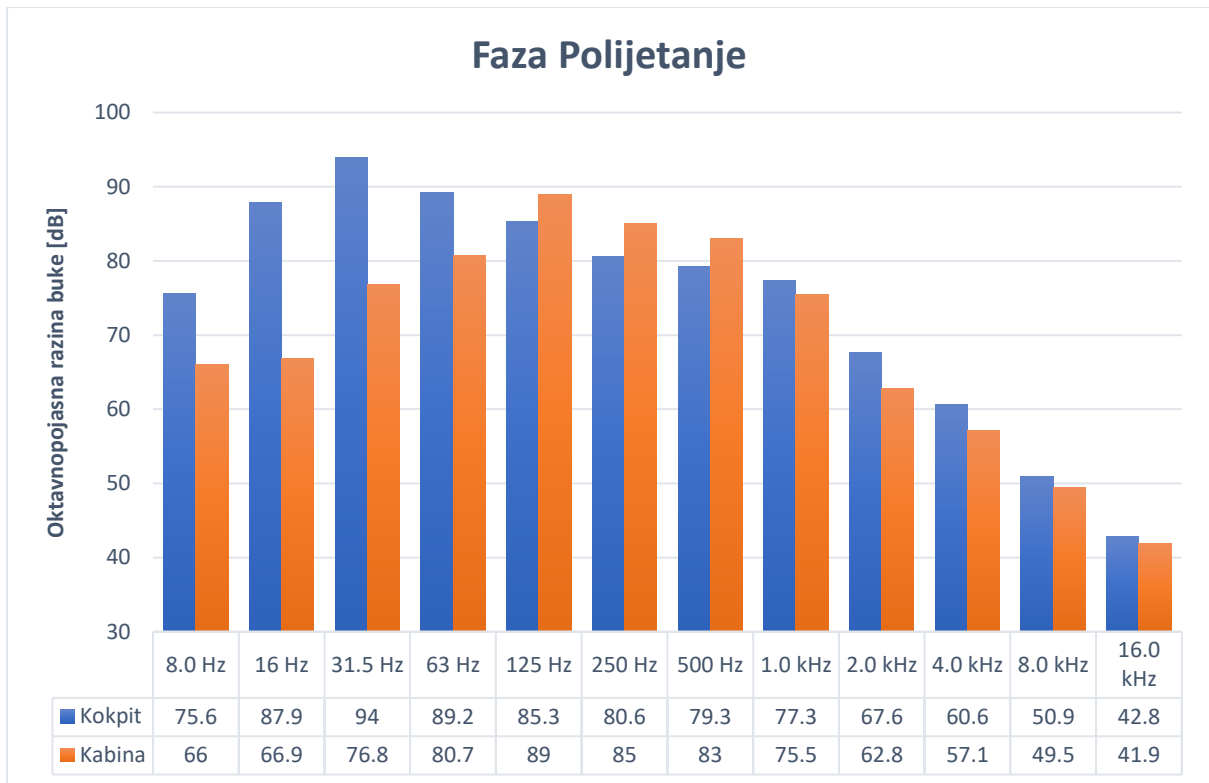
Graf 6. Rezultati mjerenja buke: razine buke kabine u oktavnom pojasu u dB ($L_{FEQ(OCT)}$)



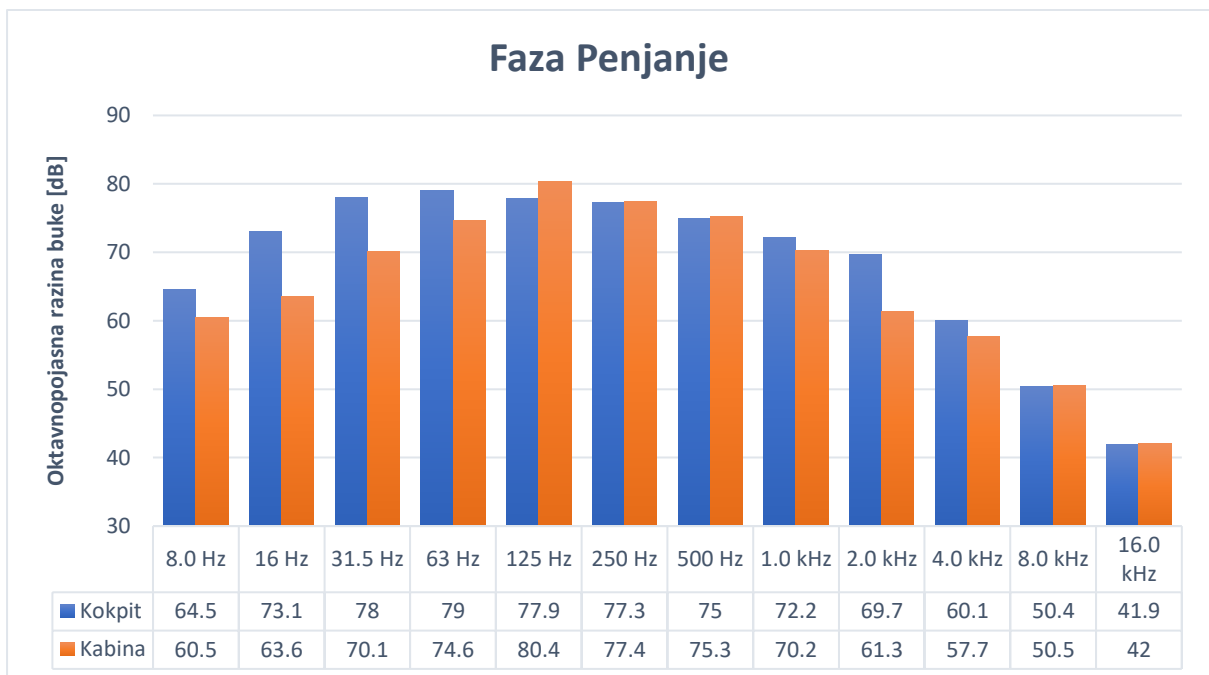
Graf 7. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Startanje"



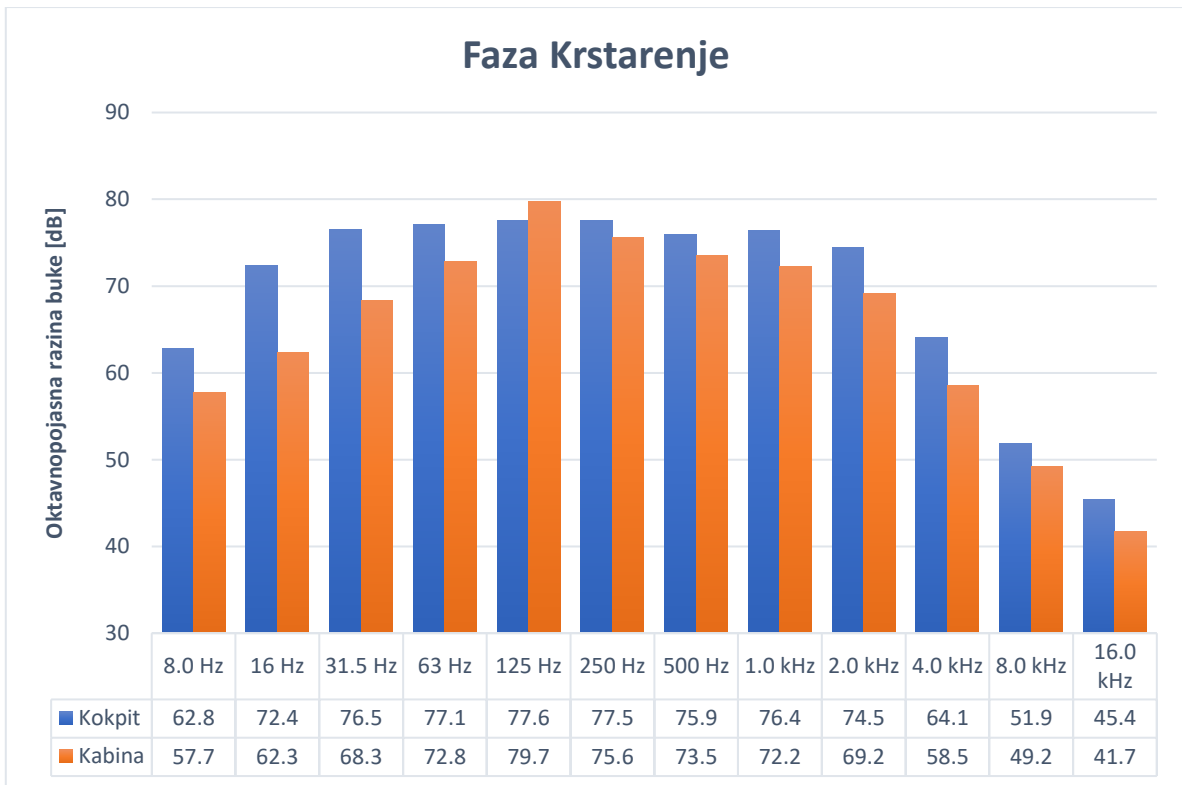
Graf 8. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Taksiranje"



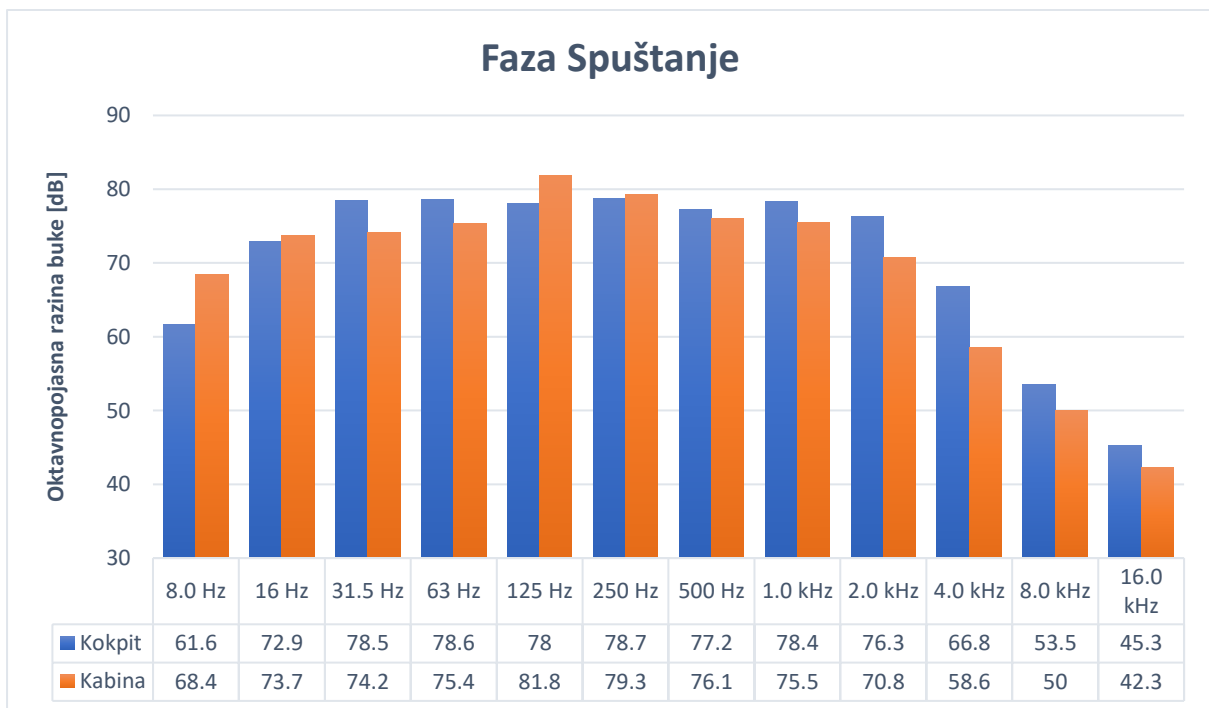
Graf 9. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Polijetanje"



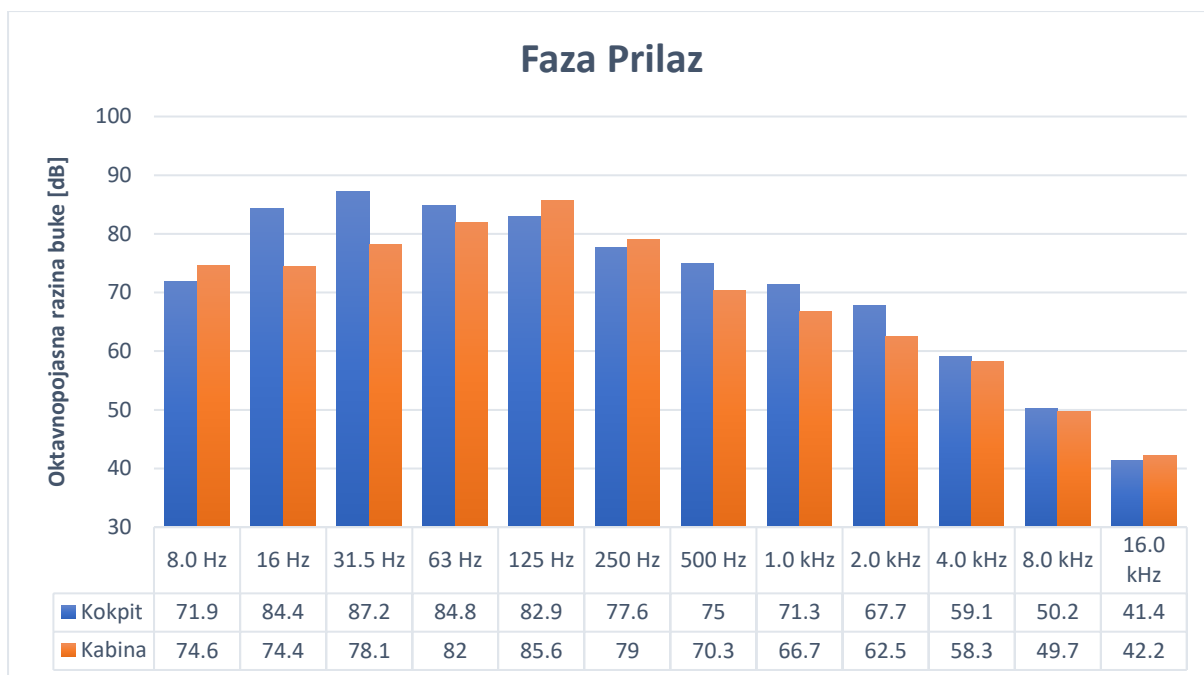
Graf 10. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Penjanje"



Graf 11. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Krstarenje"



Graf 12. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Spuštanje"



Graf 13. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Prilaz"

6. VREDNOVANJE UTJECAJA BUKE NA POSADU I PUTNIKE ZRAKOPLOVA CJ2

6.1. Izračun SIL indeksa

SIL (*engl. Speech Interference Level*) odnosno razina ometanja govora određuje utjecaj okolne buke na normalno odvijanje razgovora. SIL je definiran preko ISO standarda te se izračunava kao aritmetička sredina razina zvučnih tlakova na oktavnim frekvencijama od 0.5, 1, 2 i 4 kHz. Pomoću dobivenih SIL vrijednosti također je moguće, pomoću posebne tablice (Tablica 12.), očitati maksimalnu udaljenost u metrima s koje je moguće razumijevanje govora na zadovoljavajućoj razini [15].

$$SIL = \frac{L_{P500} + L_{P1000} + L_{P2000} + L_{P4000}}{4} \text{ [dB]} \quad (10)$$

Utjecaj buke na kvalitetu komunikacije postiže se usporedbom dobivenih rezultata SIL indeksa (Tablica 13) s referentnim vrijednostima iz Tablice 12. koja prikazuje maksimalnu udaljenost govornika pri normalnom (A) i povišenom (B) glasu pri određenim SIL vrijednostima na kojim je razumljivost komunikacije na prihvatljivoj razini [16].

Tablica 12. Odnosno SIL indeksa i udaljenosti [16]

| SIL [dB] | A [m] | B [m] |
|----------|-------|-------|
| 35 | 7.5 | 15 |
| 40 | 4.2 | 8.4 |
| 45 | 2.3 | 4.6 |
| 50 | 1.3 | 2.6 |
| 55 | 0.75 | 1.5 |
| 60 | 0.42 | 0.85 |
| 65 | 0.25 | 0.5 |
| 70 | 0.13 | 0.26 |

Prema formuli 10. dobivaju se sljedeći rezultati za zrakoplov Cessna CJ2.

Tablica 13. SIL vrijednosti Cessna CJ2

| Režim | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Kokpit SIL [dB] | 63.8 | 64.4 | 71.2 | 69.3 | 72.7 | 74.7 | 68.3 |
| Kabina SIL [dB] | 60.7 | 60.7 | 69.6 | 66.1 | 68.8 | 70.3 | 64.5 |

Tablica 14. Primjeri maksimalnih prihvatljivih SIL vrijednosti [16]

| Prostorije | Maksimalni prihvatljivi SIL [dB] |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Učionica | 30 |
| Sala za sastanke | 35 |
| Ured | 45 |
| Telefonska govornica | 60 |
| Kabina zrakoplova | 55-70 |

Tablica 14. predstavlja maksimalne prihvatljive razine SIL indeksa za određene prostorije. Usporedbom dobivenih rezultata SIL vrijednosti i usporedbom s prihvatljivim SIL indeksom za kabinu zrakoplova, uočava se povišena razina SIL vrijednosti u kokpitu zrakoplova dok se u kabini SIL vrijednosti kreću unutar prihvatljivih.

6.2. Izračun SII indeksa

SII (*engl. Speech intelligibility index*) odnosno indeks razumljivosti govora je mjera, između 0 i 1, koja predstavlja razumljivost govora pod utjecajem nepovoljnih uvjeta za komunikaciju, Tablica 15. [16].

Za izračun SII indeksa koristi se računalni program "*SII Calculation 1.0 for ANSI S3.5 – 1997*". U program se unose razine unutarnje buke u oktavnom pojasu u rasponu od 0.25 kHz do 8 kHz te se odabire jedna od vrijednosti jačine glasa [17].

Tablica 15. SII rasponi razumljivosti

| Nerazumljivo | Razumljivo | Odlična razumljivost |
|--------------|-------------|----------------------|
| 0 – 0.45 | 0.45 – 0.75 | 0.75 - 1 |

Tablica 16. prikazuje dobivene rezultate SII indeksa za zrakoplov Cessna Citation CJ2. Iz priloženog se uočava potreba za korištenjem glasnog govora u svrhu odvijanja normalne komunikacije u kabini, dok se u kokpitu stvara potreba za vikanjem te korištenje interfona uvelike olakšava odvijanje normalnih operacija.

Tablica 16. SII vrijednosti Cessna CJ2

| Režimi | SII – Kokpit Kabina | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|---------|-------------|
| | Normalan govor | | Povišen govor | | Glasan govor | | Vikanje | |
| 1 | 0.13 | <u>0.24</u> | 0.37 | <u>0.48</u> | 0.60 | <u>0.71</u> | 0.81 | <u>0.84</u> |
| 2 | 0.11 | <u>0.23</u> | 0.35 | <u>0.47</u> | 0.58 | <u>0.70</u> | 0.79 | <u>0.85</u> |
| 3 | 0.01 | <u>0.06</u> | 0.15 | <u>0.21</u> | 0.38 | <u>0.44</u> | 0.60 | <u>0.65</u> |
| 4 | 0.02 | <u>0.07</u> | 0.20 | <u>0.30</u> | 0.43 | <u>0.53</u> | 0.65 | <u>0.74</u> |
| 5 | 0.01 | <u>0.04</u> | 0.10 | <u>0.23</u> | 0.32 | <u>0.46</u> | 0.55 | <u>0.68</u> |
| 6 | 0.00 | <u>0.02</u> | 0.05 | <u>0.16</u> | 0.26 | <u>0.40</u> | 0.49 | <u>0.62</u> |
| 7 | 0.03 | <u>0.11</u> | 0.23 | <u>0.34</u> | 0.46 | <u>0.57</u> | 0.68 | <u>0.78</u> |

7. ZAKLJUČAK

Mjerenja vanjske buke su široko zastupljena u avijaciji, dok unutarnja buka pada u drugi plan iako ima značajan utjecaj kako i na ergonomiju tako i na samu sigurnost obavljanja leta. Ukoliko unutarnja buka prelazi određene razine može uvelike smanjiti ugodnost leta te također ostaviti traga na svakodnevno izložene osobe.

U ovom radu, mjerenje buke podijeljeno je na kokpit i kabinu jer je subjektivno uočena osjetna razlika. Cjelokupna slika prikazuje da se unutarnja buka zrakoplova Cessna Citation CJ2 kreće oko gornjih granica ugodnosti odnosno oko granice od 80 dBA, s vršnim vrijednostima i preko 90 dBA dok se vrijednosti razina izloženosti u segmentu od 10 sekundi kreću se u granicama od 90 dBA.

Kokpit zrakoplova Cessna Citation CJ2 postiže značajne vrijednosti buke u fazama polijetanja i spuštanja. Polijetanje se izvodi pri maksimalnoj snazi motora zrakoplova i sami motori postižu visoke razine dBA, što u kombinaciji s kotrljanjem kotača po uzletno-sletnoj stazi, koja i sama ima tragove korištenja, stvara buku u ekvivalentnim razinama od 81 dBA. Najveće razine buke u kokpitu su ipak postignute u fazi spuštanja, sami razlog tome je visoka brzina zrakoplova kroz zrak, uz činjenicu da je kokpit smješten u prednjem dijelu zrakoplova te prvi dolazi u doticaj sa strujom zraka. Taj podatak se također uočava iz slike oktavnih frekvencija gdje se vidi prevladavanje niskih i srednjih frekvencija uzrokovanim aerodinamičkom bukom.

Kabina zrakoplova je smještena u srednjem dijelu zrakoplova te kao takva nije u direktnoj struji zraka, ali je u blizini stražnje postavljenih motora Williams FJ-22C. Motori zrakoplova nisu u opće poznatom položaju ispod krila, nego u blizini područja repa u ravnini teretnog prostora zrakoplova. Rezultati mjerenja su u skladu s tom konfiguracijom te se uočava najviša razina buke kabine upravo u fazi polijetanja, gdje se osim buke stvorene maksimalnom postavkom snage, osjeća utjecaj vibracija koje se prenose preko strukture u unutrašnjost kabine. Sama faza spuštanja koja, po razinama buke, prevladava u kokpitu ipak nema primarni utjecaj u kabini.

Promatrajući objektivne parametre utjecaja na putnike i posadu, uočava se da su smetnje u komunikaciji pri gornjim granicama no i dalje unutar granica razumljivosti. Sami kokpit prelazi te granice, dok se kabina nalazi u komfornijem području. Promatrajući fazu krstarenja, koja i je najdugotrajnija faza leta, uočava se prihvatljiva razina komunikacije i same ugodnosti putovanja. U prosjeku se komunikacija u kabini povišenom glasnoćom govora, može odvijati na udaljenosti od 40 cm, dok su u kokpitu razine buke dosta više, stoga je preporučeno korištenje interfona da bi se komunikacija odvijala neometano.

POPIS LITERATURE

- [1] Bucak. T.: "Zrakoplovne emisije" autorizirana predavanja, FPZ, 2010.
- [2] Britannica [Mrežno] Dostupno: <https://www.britannica.com/science/sound-physics> [Pristupljeno 22.08.2022.]
- [3] Crocker M.J.: Eyclopedia of Acoustics, New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [4] »AuerSignal« [Mrežno] Dostupno: <https://www.auersignal.com/en/technical-information/audible-signalling-equipment/sound-intensity/#mainnav> [Pristupljeno 20.08.2022.]
- [5] Cirrus Research, A Guide to Environmental Noise Measurement Terminology, 2016.
- [6] »Edutorij« [Mrežno] Dostupno: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/3b8a4b4e-84b0-4580-aa6f-e38efe028ed9/biologija-8/m03/j05/index.html> [Pristupljeno 21.08.2022.]
- [7] HLZ, Medicinski priručnik za pacijente, MSD, 2014.
- [8] »CDC« [Mrežno] Dostupno: https://www.cdc.gov/nceh/hearing_loss/how_does_loud_noise_cause_hearing_loss.html [Pristupljeno 21.08.2022.]
- [9] »Narodne novine« [Mrežno] Dostupno: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_04_46_1577.html [Pristupljeno 22.08.2022.]
- [10] Bombardier Aerospace, Aircraft Flight Manual Dash 8-Q400, 2019.
- [11] »zastitanaradu« [Mrežno] Dostupno: <https://zastitanaradu.com.hr/novosti/Buka-i-zastita-na-radu-14> [Pristupljeno 22.08.2022.]
- [12] »Telex« [Mrežno] Dostupno: <https://products.telex.com/na/en/airman-850/> [Pristupljeno 22.08.2022.]
- [13] Textron Aviation, Aircraft Flight Manual Citation Jet, 2004.
- [14] Norsonic, Nor140 Instruction Manual, Norway, 2008.
- [15] Acoustical Society of America »ASA Standards« [Mrežno] Dostupno: <https://asastandards.org/terms/speech-interference-level/> [Pristupljeno 10.09.2022]
- [16] Bucak T., Bazijanac E., Juričić B.: »Correlation between SIL and SII in a light aircraft cabin during flight,« Proc. *ICVS14*, Cairns, 2007.
- [17] Acoustical Society of America, Methods For Calculation Of The Speech Intelligibility Index, New York: John Wiley & Sons, 1997 (R2017).

POPIS PRILOGA

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Osnovna fizikalna svojstva zvučnog vala | 4 |
| Slika 2. Odnos zvučne snage, tlaka i razine | 7 |
| Slika 3. Građa ljudskog uha | 10 |
| Slika 4. Primjer audiograma oštećenog sluha..... | 12 |
| Slika 5. Tehničke mjere za umanjene buke kabine zrakoplova CJ2 | 14 |
| Slika 6. Osobne mjere zaštite od vanjske buke | 15 |
| Slika 7. Slušalice Telex Airman | 16 |
| Slika 8. Izvori buke zrakoplova | 17 |
| Slika 9. Izvori buke na zrakoplovu CJ2 | 19 |
| Slika 10. Podjela izvora buke zrakoplova CJ2 | 19 |
| Slika 11. Mjerenje unutarnje buke kokpita zrakoplova Cessna CJ2 | 22 |
| | |
| Tablica 1. Brzine širenja zvuka kroz različite medije | 5 |
| Tablica 2. Tehničke karakteristike zrakoplova Cessna CJ2..... | 18 |
| Tablica 3. Razine buke zrakoplova Cessna CJ2 | 20 |
| Tablica 4. Popis opreme mjernog instrumenta Nor 140..... | 21 |
| Tablica 5. Mjerne faze leta | 21 |
| Tablica 6. Rezultati mjerenja buke: Ekvivalentna vrijednost razina buke (L_{EQ})..... | 23 |
| Tablica 7. Rezultati mjerenja buke: Maksimalne i minimalne vrijednosti razina buke (L_{MAX}/L_{MIN}) | 24 |
| Tablica 8. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovana vrijednost razine izloženosti buci u segmentu od 10 sekundi (L_{AE}) | 25 |
| Tablica 9. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovane vršne vrijednosti razina buke (L_{APEAK}) | 26 |
| Tablica 10. Rezultati mjerenja buke: Razine buke kokpita u oktavnom pojasu ($L_{FEQ(OCT)}$) | 27 |
| Tablica 11. Rezultati mjerenja buke: Razine buke kabine u oktavnom pojasu ($L_{FEQ(OCT)}$) | 27 |
| Tablica 12. Odnosno SIL indeksa i udaljenosti..... | 33 |
| Tablica 13. SIL vrijednosti Cessna CJ2 | 34 |
| Tablica 14. Primjeri maksimalnih prihvatljivih SIL vrijednosti..... | 34 |
| Tablica 15. SII rasponi razumljivosti | 35 |
| Tablica 16. SII vrijednosti Cessna CJ2 | 35 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf 1. Rezultati mjerenja buke: Ekvivalentna vrijednost razina buke (L_{EQ})..... | 23 |
| Graf 2. Rezultati mjerenja buke: Maksimalne i minimalne vrijednosti razina buke (L_{MAX}/L_{MIN}) | 24 |
| Graf 3. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovana vrijednost razine izloženosti buci u segmentu od 10 sekundi (L_{AE}) | 25 |
| Graf 4. Rezultati mjerenja buke: A-vrednovane vršne vrijednosti razina buke ($L_{A_{PEAK}}$) | 26 |
| Graf 5. Rezultati mjerenja buke: razine buke kokpita u oktavnom pojasu u dB ($L_{FEQ(OCT)}$) | 28 |
| Graf 6. Rezultati mjerenja buke: razine buke kabine u oktavnom pojasu u dB ($L_{FEQ(OCT)}$) | 28 |
| Graf 7. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Startanje" | 29 |
| Graf 8. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Taksiranje" | 29 |
| Graf 9. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Polijetanje" | 30 |
| Graf 10. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Penjanje" | 30 |
| Graf 11. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Krstarenje" | 31 |
| Graf 12. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Spuštanje" | 31 |
| Graf 13. Rezultati mjerenja buke: Oktavni prikaz razina buke u fazi "Prilaz" | 32 |

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI


Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ **diplomski rad** _____
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom **ANALIZA UNUTARNJE BUKE ZRAKOPLOVA CESSNA CITATION CJ2**, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student:

U Zagrebu, 08.09.2023.

Petar Krešimir Mikačić 
(ime i prezime, potpis)