

1. Uvod

1.1. Problem istraživanja

Danas kada veliku pažnju posvećujemo zaštiti okoliša i ekologiji, jedan od glavnih negativnih elemenata prisutnih u svakom dijelu čovjekova okoliša pa tako i u prometu jest buka. Zračni promet najmlađa je grana prometa, koja se počela razvijati pedesetih godina, a za njen nagli rast zaslužno je uvođenje turbo-mlaznih motora. Uvođenje takvih motora u zrakoplovstvu, rezultiralo je gradnjom većih, sigurnijih i bržih zrakoplova. Zračni promet je najsigurnija grana prometa sa visokom razinom točnosti. Obzirom na veliku snagu turbo-mlaznih motora, kao popratni efekt pojavila se buka, a naglim povećanjem zračnog prometa buka je postala učestala i nesnošljiva.

Zrakoplov kao izvor buke koja se odražava na zemlji, stvara buku u nekoliko segmenata kao što su polijetanje, slijetanje i vožnja po tlu. Najveća razina buke vezane uz zračni promet nalazi se u blizini zračnih luka te u području prilaznih i odletnih putanja.

Istraživanja buke zračnoga prometa započinju krajem pedesetih godina s ciljem istraživanja karakteristika izvora buke, utjecaja okoliša na njeno širenje te subjektivno ljudsko doživljavanje iste. Glavnu ulogu u praćenju buke imaju mjerenja. Ona moraju obuhvaćati sve elemente koji utječu na nastajanje i širenje buke u zračnom prometu.

Obzirom na kandidaturu članice Europske unije, Republika Hrvatska bi se svojim zakonima trebala prilagoditi zakonima Europske unije. Jedan od tih zakona je i regulativa vezana za mjerenje buke zrakoplova na području Republike Hrvatske. Zagreb, glavni grad sa glavnom međunarodnom zračnom lukom koja godišnje ima najveći broj operacija, najveći je segment u prilagodbi zakona, jer se na tom području nikada nije u cijelosti definirala razina buke u samoj zoni zračne luke i u naseljenim dijelovima oko nje.

Tema ovog rada su mjerenja i istraživanja provedena na području Zračne luke Zagreb i u zoni oko nje te odgovor na pitanje da li je Zračna luka Zagreb izvor negativnog utjecaja buke u odnosu na ljudski faktor oko same zračne luke te zadovoljava li ona sve potrebne uvjete EU

regulative. Rezultati istraživanja i analize biti će dobra podloga koja će u budućnosti biti temelj izrade urbanističkog plana u blizini zračne luke.

1.2. Svrha i cilj istraživanja

Temelj ovog istraživanja je definicija metoda reduciranja nastale buke u odnosu na njenu razinu u okviru standarda Europske unije. Cilj istraživanja je doći do rezultata koji će pokazati da li buka na Zračnoj luci Zagreb prelazi dozvoljene granice izdane pravilnicima te završnu tvrdnju potkrijepiti izradom karte kontura buke. Karta kontura buke mora sadržavati sve tipove zrakoplova koji vrše operacije slijetanja i polijetanja na Zračnu luku Zagreb, podatke o veličini buke koju stvaraju ti zrakoplovi, putanje kretanja zrakoplova u fazi slijetanja i polijetanja te plan određivanja mogućih novih lokacija za postavljanje dodatnih mjernih stanica. Ovaj bi rad trebao doprinijeti odgovoru na pitanje jesu li dosadašnja operativna reduciranja buke zrakoplova glede mjesta na zemlji sa sigurnosne strane prihvatljiva, obzirom na kutove poniranja i krivolinijske putanje pri slijetanju zrakoplova.

1.3. Osvrt na dosadašnja istraživanja

Prateći potrebe i uvažavajući zahtjeve koje postavljaju standardi Europe i Sjedinjenih Američkih Država, zračne luke Republike Hrvatske krenule su sa projektima praćenja buke koju stvaraju zrakoplovi. Iako su unutar Republike Hrvatske neke zračne luke, kao npr. zračna luka Split krenule sa pilot projektima praćenja buke, danas ne postoji niti jedna za koju se sigurno može reći da ima potpunu studiju o redukciji buke. Članice Europske unije prihvatile su zakon koji definira buku zrakoplova. Kandidaturom Republike Hrvatske u članstvo EU i ona preuzima obvezu poduzimanja konkretnih mjera glede praćenja buke zrakoplova, a to znači izrađivanje karata buke te minimaliziranje buke u zonama zračnih luka.

1.4. Znanstvene metode

Sa znanstveno-metodološkog stajališta u pripremi i izradi magistarskog rada kombinirat će se veći broj aplikativnih istraživačkih metoda. Kompozicija i struktura najvećeg dijela rada temeljiti će se na statističkoj i analitičkoj metodi istraživanja. U dijelu rada o teorijskom definiranju problematike primjenjivat će se metoda deskripcije kojom će se predstaviti izvori i način praćenja buke u zračnom prometu, metoda komparacije kojom će se nastojati usporediti postojeće znanstvene spoznaje i činjenice s obrađivanog područja i podaci dobiveni istraživanjem, metode analize i sinteze kojima će se u skladu s prikupljenim informacijama i podacima predložiti optimalno rješenje. Tekst će biti potkrijepljen tabličnim i grafičkim elementima.

1.5. Obrazloženje strukture magistarskog rada

U uvodnim će se razmatranjima izložiti predmet istraživanja, odrediti će se svrha i ciljevi istraživanja, dati pregled i ocjena dosadašnjih istraživanja te naznačiti konkretne metode istraživanja uz opis kompozicije rada.

Drugo poglavlje „*Izvori buke u zračnom prometu*“ prikazati će izvore buke na Zračnoj luci Zagreb, koji proizlaze iz različitih operacija zračnog i kombiniranog prometa. Također će biti iznesen povijesni pregled usavršavanja pogonske skupine i strukture zrakoplova u svrhu redukcije buke.

U trećem poglavlju „*Mjerne veličine i jedinice za mjerenje buke zračnog prometa*“ definirati će se mjerne veličine te pojmovi koji se koriste za mjerenje buke u zračnom prometu. U ovom će prikazu biti dan pregled pojmova koji su bitni za praćenje zvuka i definicije pojedinih zvučnih vrijednosti. Također, poglavlje će obrađivati važne elemente koji utječu na širenje buke u atmosferi, a to su temperatura, vlaga, tlak i vjetar.

Četvrto poglavlje „*Međunarodna regulativa buke u zračnom prometu*“ prikazati će međunarodne regulative koje se odnose na praćenje i redukciju buke u zračnom prometu. U regulativama su definirane restrikcije, naplate i kazne koje se provode u svrhu redukcije buke.

Peto poglavlje „*Mjerenje buke na Zračnoj luci Zagreb*“ obrađivati će implementaciju sustava za mjerenje buke zrakoplova na Zračnoj luci Zagreb. Prikazati će se princip mjerenja buke, princip obrade i analiza dobivenih podataka te identifikacija zrakoplova koji je prešao dozvoljenu granicu buke. Slijedi izrada karte kontura buke prema podacima postojećeg prometa.

Šesto poglavlje „*Načini smanjenja buke*“ dati će rješenja za redukciju buke zrakoplova u tehničkim i operativnim uvjetima te sustave za izoliranost izvora buke. Predložena rješenja za redukciju buke zrakoplova zasniva se na sustavima za prigušenje buke na motorima i poboljšanje strukture zrakoplova, kako bi se smanjio otpor koji također proizvodi buku. U operativnim uvjetima – u fazi polijetanja i slijetanja, definirati će se moguća promjena koridora koja omogućava maksimalnu redukciju buke.

1.6. Očekivani rezultati istraživanja

Interdisciplinarnost pristupa te brojni čimbenici koji utječu na primarni predmet istraživanja uvjetuju da se u istraživanju uz željeni rezultat mogu očekivati i niz popratnih rezultata.

Općenito, očekivani rezultati su slijedeći:

- Dobivene vrijednosti mjerenja buke na pragovima uzletno sletne staze
- Dobivene vrijednosti mjerenja veličine buke kojoj je izložen terminal
- Detektiranje mogućih problema pri mjerenju buke na poziciji mjerne stanice 1 (Noise Monitoring Terminal - NMT1)
- Obrada baze podataka Zračne luke Zagreb i analiza zrakoplova koji vrše operacije polijetanja i slijetanja
- Dobivene vrijednosti analizom Flight Airport Information System (FAIS) sustava Zračne luke Zagreb o prosječnim vrijednostima operacija u polijetanju i slijetanju u danu.
- Kategorizacija zrakoplova prema doletu
- Izračun ekvivalentne razine buke za razdoblje dan, večer, noć (L_{den})
- Izrada karte buke za razdoblje od 01.01. do 30.09.2008.

1.7. Očekivani znanstveni doprinos

Izrađena je korelacija između reda letenja zrakoplova (operacijama polijetanja i slijetanja) i vrijednostima razine buke dobivene na mjernim stanicama. Ovim postupkom omogućeno je točno definiranje svakog zrakoplova bez obzira na gustoću prometa te detektiranje njegove buke u polijetanju i slijetanju preko Flight Airport Information System (FAIS) i Environmental Noise Model (ENM) programa.

Prikazana je mogućnost lociranja zrakoplova u operacijama polijetanja i slijetanja u odnosu na razinu buke na mjernim stanicama postavljenim na pragovima uzletno sletne staze. Usporedbom grafičkog prilaza iz ENM programa moguće je praćenje buke i određivanje visine zrakoplova pri polijetanju i slijetanju.

Prikazane su vrijednosti razine buke koje su dobivene mjerenjem pri čemu se može ustvrditi ekvivalentna i maksimalna razina buke na svakom od pragova uzletno sletne staze te razina buke na terminalnoj zgradi. Obzirom na kontinuirano mjerenje buke na pragovima uzletno sletne staze može se izraditi usporedba mjerenih podataka zrakoplova koji se prate i onih podataka koji su izmjereni pri certifikaciji zrakoplova u polijetanju i slijetanju te uspostaviti odnos.

Vrijednostima dobivenim mjerenjem buke na mjernim stanicama moguće je odrediti smjer polijetanja i slijetanja zrakoplova preko grafičke analize podataka. Prema razini buke na pragovima uzletno sletne staze može se definirati u kojem je smjeru polijetanje zrakoplova ovisno o razini buke pri preletu mjerne stanice.

Redukcija buke u prilazu s obzirom na instrumentalni prilaz i ravnu putanju operativnim postupkom moguća je uvođenjem procedure Continuous Descent Approach (CDA). Ova je tvrdnja potkrepljena usporedbom konvencionalnog prilaza i CDA prilaza. U svrhu dodatne redukcije buke iznesen je prijedlog implementacije CDA procedure. Uvađanje iste i njeni benefiti prikazani su izradom karte buke za obje procedure gdje je vidljiva razlika područja izloženog bukom.

Izrađena je usporedba dobivenih vrijednosti mjerenjem buke i propisanih ekoloških normi u svrhu prilagodbe Zračne luke Zagreb propisima EU. Prema svim dobivenim rezultatima s obzirom na kandidaturu Republike Hrvatske u EU i prilagodbu EU ekološkim regulativama napravljena je analiza i ustvrđeno je da Zračna luka Zagreb trenutno zadovoljava sve ekološke norme vezane za buku.

Izvršeno je mjerenje u fazama polijetanja i slijetanja izvan zone Zračne luke Zagreb, na području Donje Lomnice u svrhu provjere ekvivalentne razine buke.

1.8. Primjena rezultata istraživanja

Mjerenja te obrada dobivenih podataka osnovni su element u sustavu zaštite od buke. Na temelju podataka dobivenih istraživanjima izrađena je karte buke kojoj je osnovna namjena prikazati razinu izloženosti buke te koja će biti temelj za daljnje akcijske planove vezane za zaštitu od buke pri:

- Izradi procjena o utjecaju buke na okoliš
- Izradi prostornih planova
- Određivanju posebnih uvjeta gradnje u smislu zaštite zgrada od buke
- Određivanja granica tihih zona
- Određivanja zona osjetljivosti na buku
- Utvrđivanja broja stanovnika izloženih prekomjernim razinama buke
- Izrade akcijskih planova za područja na kojima je u karti buke utvrđeno prekomjerno izlaganje stanovništva određenim razinama buke.

Nadalje u magistarskom radu napravljen je izračun vrijednosti ekvivalentne razine buke u 24 sata (L_{den}) za mjesec listopad te se točno vidi njegova razina za sve operacije zrakoplova na Zračnoj luci Zagreb u vremenskom periodu od mjesec dana. Mjerna veličina L_{den} osnovni je element koji se u svim regulativama navodi kao presudni za početak izrade akcijskih planova u svrhu redukcije buke, daljnjem prostornom planiranju te zoniranju površina u krugu oko zračne luke.

2. Izvori buke u zračnom prometu

2.1 Uvod

Buka na zračnoj luci proizlazi iz različitih operacija zračnog i kombiniranog prometa. Na zračnoj se luci izdvajaju dva izvora aerodromske buke: buka koja nastaje operacijama letova i buka koja nastaje operacijama na zemlji. Kada se promatra zrakoplov u letu glavni izvori buke su pogonska grupa i struktura zrakoplova te njihovo međusobno djelovanje. Gledano u prošlost od 1950-tih i prvih mlaznih motora, pogonska skupina bila je glavni i nepodnošljiv izvor buke. Takav mlazni pogon imali su zrakoplov Comet te Boeing 707-100. Kod tih zrakoplova najveća je bila buka mlaznica, turbine i komore za izgaranje. Gledano sa strane aerodinamičnog oblika, struktura zrakoplova stvarala je veliku buku zbog opstrujavanja zraka pri slijetanju. Buka koju proizvodi struktura zrakoplova počela se proučavati 1970-ih godina. Redukcija buke i proučavanje aeroprofila naročito se razvijalo u SAD-u, točnije NASA centru gdje je protok zraka uz strukturu i stajni trap ispitivan u zračnim tunelima. Zbog negativnog utjecaja buke zrakoplova, dizajn zrakoplova koji bi svojom strukturom stvarao najmanje buke postao je izazov za sve dizajnere. U posljednjim desetljećima buka zrakoplova se radikalno smanjila zahvaljujući razvoju tehnologije koja je to omogućila.

2.2 Izvori buke u području zračne luke

Zračna luka također je izvor buke koju čine prijevozna sredstva koja tamo prometuju i sama infrastruktura. Jačina motora vozila je manja, no zbog velike koncentracije buke koju ona proizvode je kontinuirana. Danas izdvajamo dva izvora aerodromske buke: buka nastala operacijama letova i buka nastala operacijama na zemlji. Ukoliko se želi izračunati doprinos buke zrakoplova najprije se mora odrediti izvor ukupne aerodromske buke, dok standardna meteorološka stanja mogu biti pretpostavljena. Polje buke koje se širi od zrakoplova na zemlji (rad motora pred uzletanje ili rad motora kod održavanja) može se izračunati. Ovisno o tipu operacije (na primjer, fiksna pozicija za rad motora zrakoplova) za uzorak pojedinog izvora, može se pretpostaviti da je orijentiran u specifičnom smjeru. Za uzlijetanje ili slijetanje zrakoplova, širenje buke kod svake točke njegova leta mora biti razmotreno.

Velika količina informacija neophodna je za računanje buke koja proizlazi iz mnogih izvora kod zračne luke, uključujući operativne podatke kao na primjer vrijeme, operacije leta, oznake motora i snage motora, podaci o atmosferskom prigušivanju i iskorištavanju piste i operativni podaci zračne luke. Za kontrolu buke i svrhu planiranja, detaljni pristup pojedinačnom zrakoplovu i pristup iskustvom za prosječnu energiju je koristan i može biti kombiniran u optimalnu korist.

Područje zračne luke možemo podijeliti na dva glavna dijela s obzirom na izvore buke. Prvi dio je zračna strana (engl. *airside*) koja, u širem smislu, obuhvaća terminalni zračni prostor i aerodromske površine kao što su uzletno-sletna staza (USS), staze za vožnju, stajanka itd. Na tome dijelu glavni izvori buke su zrakoplovi, vozila prihvata i otpreme zrakoplova te infrastrukturne građevine koje proizvode određeni nivo buke. Drugi dio čini zemaljsku, zemnu, ili kopnenu stranu aerodroma (engl. *landside*) koja obuhvaća putničku zgradu ili terminal, zgradu robnog ili cargo prometa, prometnice i parkirališta te druge građevine i površine, a u širem smislu i veze s gradom i područjem koje zračna luka opslužuje. Na zemaljskoj strani glavni izvori buke čine vozila koja se kreću u zoni zračne luke u svrhu dolaska, zadržavanja i odlaska putnika, posjetitelja i zaposlenika zračne luke.¹



Slika 1. Prikaz zračnog područja (*Airside*) i zemljanog (*Landside*) Zračne luke Zagreb

Osim zrakoplova, izvor buke na zračnom dijelu čine vozila koja se kreću u svrhu prihvata i otpreme zrakoplova. U ta vozila ubrajamo: zemaljske agregate (koji mogu biti samohodni ili vučni), putničke stepenice, traktore, utovarivače za širokotrupne zrakoplove, autobuse, vozila za izguravanje i vuču zrakoplova, vozilo za pitku vodu, vozilo za fekalije, zračni starter, liftmobil, catering vozilo, uređaj za klimatizaciju, vozilo za odleđivanje zrakoplova, vozila za

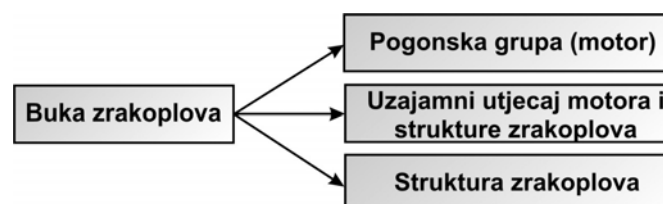
¹ S. Pavlin; **Aerodromi I**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.

startanje i parkiranje zrakoplova te ostala vozila koja se kreću na stajanci, a nisu vezana za opsluživanje zrakoplova. Od navedenih vozila najveći izvori buke su zemaljski agregat GPU (Ground Power Unit) vozila i zračni starter.

Drugi dio buke dolazi sa zemaljske strane zračne luke tj. od prijevoznih sredstava korisnika zračne luke, posjetitelja i putnika koji sa svojim vozilima ulaze na velike parkirališne prostore te time stvaraju veliku količinu buke koncentrirane na jednom mjestu. Problem sa parkirališnom bukom imaju velike zračne luke koje rade 24 sata dnevno te imaju kontinuirane letove u razmacima od samo nekoliko sekundi. Na takvim zračnim lukama koncentracija putnika je velika, a time i broj prijevoznih sredstava. Na Zračnoj luci Zagreb koncentracija dolaska i odlaska putnika kulminira u tri vršna opterećenja u danu. Prvo vršno opterećenje je u razdoblju od 06:00 do 09:30 sati, drugo 11:30 – 15:00 i treće od 20:00 do 21:30. Iz toga proizlazi da je buka nastala kretanjem vozila na zemaljskom dijelu zračne luke u noćnim satima zanemariva s obzirom na rjeđi zrakoplovni promet u te sate.

2.3. Izvori buke kod zrakoplova

Buka zrakoplova može se definirati kao neželjeni zvuk koji proizvodi zrakoplov. Svakim danom buka zrakoplova postaje sve veći problem i širenjem zračnih luka mnoga naselja su pod štetnim djelovanjem te buke. Buka koju proizvodi zrakoplov promatra se posve drugačije od ostalih zagađivača i dijeli se u tri grupe. U prvu grupu pripada buka koju proizvodi pogonska grupa zrakoplova, drugu uzajamni utjecaj između motora i strukture zrakoplova te u treću struktura (oblik) zrakoplova. Ovisno o vrsti operacija, buku zrakoplova možemo podijeliti na buku koja nastaje u fazi polijetanja i slijetanja te buku zrakoplova na zemlji prilikom servisiranja i testiranja motora.



Slika 2. Osnovne komponente buke zrakoplova



Slika 3. Izvori buke na zrakoplovu

Tablica 1. Osnovni izvori buke zrakoplova

Tip zrakoplova	Izvor buke	
	Pogonska grupa	Planer - zmaj
Opća avijacija: sportski, poljoprivredni zrakoplovi	elise, ispušni plinovi iz klipnog motora	zanemarivo mala
Helikopteri	rotor, ispušni plinovi iz klipnog ili mlaz iz TM motora	zanemarivo mala
STOL	ventilator, mlaz iz TM motora	međusobni utjecaj između strujanja zraka i površine planera
Putnički i transportni zrakoplovi	ventilator, mlaz iz TM motora	međusobni utjecaj između strujanja zraka i površine planera
Nadzvučni putnički zrakoplovi	mlaz iz TM motora	međusobni utjecaj između strujanja zraka i površine planera

Izvor: J. Golubić; Promet i okoliš, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

Svaki od gore navedenih izvora sadrži i svoje podgrupe koje zajedno čine cjelokupnu buku zrakoplova. Zvuk koji dolazi od svakoga izvora posebno čini različitu jačinu buke ovisno o režimu leta.

Dva su certifikata vezana uz buku zrakoplova prema FAA, a to su:

- FAR Part 36
- ICAO Annex 16.9.

Ovi certifikati zahtijevaju da efektni nivo percipirane buke (Effective Perceived Noise Level - EPNL) bude manji od maksimalnog nivoa koji je dozvoljen za svaku lokaciju. Pod tim lokacijama misli se na tri točke na koje se smještaju sustavi za mjerenje buke. Maksimalni

nivoi mijenjaju se ovisno o maksimalnoj težini zrakoplova pri polijetanju (Aircraft Maximum Take-off Weight - MTOW). Tijekom ubrzanja na zemlji i fazi polijetanja dominantni izvor buke je pogonska skupina. Korištenjem novih turboventilatorskih motora i postignuća u tehnologiji razvoja motora, buka motora i buka koja nastaje zbog strukture zrakoplova svedena je na jednaki nivo.

2.3.1. Buka pogonske skupine

Buka zrakoplova je spoj optimizacije zrakoplova kao jedne cjeline. Tu cjelinu čine: mala brzina, buka pogonske skupine (motora), buka strukture i buka u proceduri leta. U pogonsku skupinu spadaju mlazni i elisni motori. Ukoliko se radi kategorizacija unutar pogonskih skupina, zrakoplovi sa elisnim pogonom stvaraju znatno nižu buku u usporedbi s ostalima. Buka koju stvara pogonska skupina klipnih i turboelisnih zrakoplova je zanemariva te je u tome slučaju glavni izvor buke sama elisa. Buka pogonskih skupina je buka uzrokovana svim dijelovima i uređajima koji služe za ostvarenje opstrujavanja zraka oko uzgonskih površina. Kod zrakoplova za tu se svrhu koriste:

- turbo-mlazni pogon,
- turbo-ventilatorski,
- propelerski pogon sa klasičnim ili turbinskim motorom.

2.3.1.1. Turbo mlazni pogon

Zrak ulazi u rotirajući kompresor kroz usisnik zraka. U kompresoru se prije ulaska u komore izgaranja zrak komprimira i pod pritiskom miješa s gorivom. Proces izgaranja dovodi do velikog porasta temperature, a vrući plinovi stvoreni gorenjem prolaze velikom brzinom kroz turbinu i okreću je te kroz ispušnu cijev izlaze iz motora. Turbina pokreće kompresor s kojim je spojena preko osovine. Efikasnost mlaznog motora najviše ovisi o omjeru ulaznog pritiska u kompresor i komprimiranog zraka prije ulaska u komore izgaranja te ulazne temperature na turbinu. Dijelovi mlaznog motora su: usisnik zraka, kompresor, osovina, komora izgaranja, turbina, mlaznica.

Usisnik zraka dio je konstrukcije aviona i motora koji omogućava dovod stabilne struje zraka do kompresora. Kod podzvučnih zrakoplova usisnik je konstrukcijski nezahtjevan. Sastoji se od aerodinamički oblikovanog otvora kako bi stvarao što manji otpor i kako bi što manje remetio strujanje zraka. Zrak koji dolazi do kompresora mora imati manju brzinu od brzine zvuka što kod nadzvučnih aviona zahtijeva konstrukciju usisnika koja će tu brzinu smanjiti na podzvučnu.

Kompresor je dio mlaznog motora koji komprimira zrak. Kompresor koristi niz rotirajućih diskova na kojima su učvršćene lopatice aerodinamičnog oblika, profila sličnog krilima, koje postupno komprimiraju zrak. Nepokretne statorske lopatice smještene su iza svakog rotirajućeg diska te usmjeravaju strujanje zraka na sljedeći rotirajući disk. Prostor prolaska strujanja zraka se smanjuje prema izlazu iz kompresora, smanjuje se brzina i povećava tlak. Brzina ni u kojem dijelu ne smije prijeći brzinu zvuka. Kompresor preko osovine pokreće turbina.

Osovina prolazi gotovo cijelom dužinom motora i spaja turbinu s kompresorom. Broj osovine ovisi o broju turbina. Svaka turbina je sa zasebnom osovinom (jedna kroz drugu) spojena s dijelom koji pokreće i vrti se neovisno raznim brzinama.

Komora izgaranja dio je mlaznog motora koji se nalazi između kompresora i turbine. U njima izgara smjesa zraka i goriva stvarajući vreli plin. Zbog izuzetno visoke temperature na izlaz iz komora izgaranja dovodi se zrak iz kompresora koji smanjuje temperaturu ispušnih plinova. Protok zraka iz kompresora dijeli se na primarni, koji se miješa s gorivom i sagorijeva u komorama izgaranja i sekundarni koji struji oko komora (i jednim dijelom kroz otvore ulazi u komore i zadržava plamen u sredini) spuštajući temperaturu na zadovoljavajuću vrijednost.

Turbina je rotirajući disk na koji su učvršćene lopatice aerodinamičnog oblika. Vreli plin koji izlazi iz komora izgaranja usmjerava se preko statorskih lopatica na turbinske lopatice te ih okreće. Turbina zatim preko osovine pokreće ili elisu ili ventilator ili kompresor. Relativno hladan zrak struji od kompresora i usmjerava na lopatice turbine kako bi se spriječilo njihovo pregrijavanje. Na turbinu se nastavlja mlaznica kojoj je osnovni zadatak dovođenje pritiska ispušnih plinova na atmosferski nivo čime se naglo povećava njihova brzina. Ako brzina ispušnih plinova prelazi brzinu leta, stvoren je pozitivni potisak.

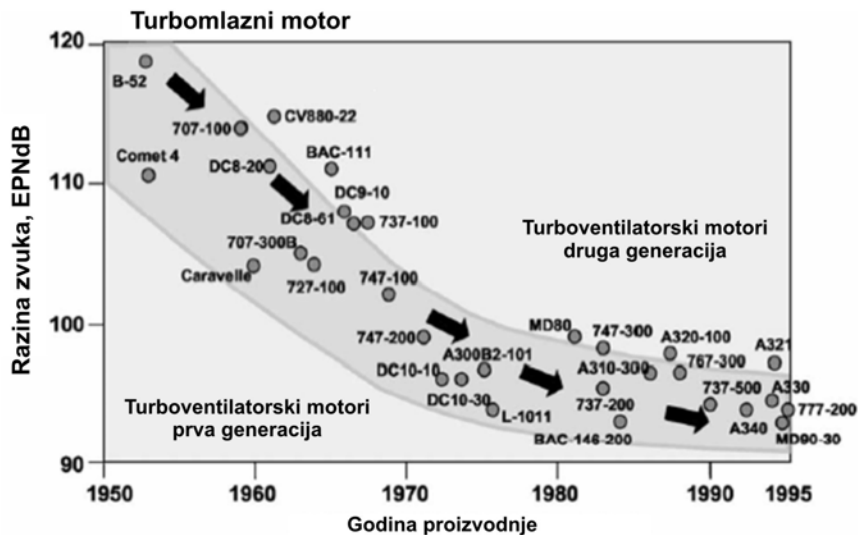
Naknadno izgaranje proizvodi dodatnu snagu dodavanjem goriva u dio ispušne cijevi. Gorivo zbog temperatura koje na tom dijelu vladaju odmah izgara dodatno povećavajući temperaturu i brzinu ispušnih plinova. Naknadno izgaranje koristi se uglavnom kod vojnih zrakoplova radi smanjenja dužine uzletno-sletne staze (USS) važne za polijetanje kao i u letu prilikom potrebe za naglim povećanjem brzine. Zbog velikih temperatura koje se stvaraju, naknadno izgaranje smije se koristiti ograničeno kratko vrijeme.

Ispušna cijev dio je kroz koji vrući plinovi izlaze iz motora. U većini slučajeva konstantnog je promjera. Kod nadzvučnih zrakoplova ispušna se cijev na jednom dijelu sužava povećavajući time brzinu strujanja plinova.

Promatrano s aspekta buke, buka koja je uzrokovana turbo-mlaznim motorom sastoji se od buke kompresora, buke uzrokovane vibracijama kućišta motora i buke izlaznog mlaza. Buka izlaznog mlaza u sebi sadrži i buku turbine i izgaranja goriva, no one su znatno niže od razine buke mlaza. Kod turbo mlaznih motora izrazita komponenta buke je buka usisa. Ta se buka sastoji od širokopolasne buke i tonskih komponenata kojima su izvor lopatice kompresora, a slična je situacija i sa bukom kompresora. Razina buke mlaza je pri normalnim uvjetima korištenja motora znatno iznad ostalih komponenata buke motora. Buka motora uzrokovana je vrtloženjem do kojeg dolazi u području miješanja vrlo brzih i toplih izlaznih plinova iz motora s mirnim hladnim zrakom okoline. U letu je razina buke mlaza 3-5 dB niža od razine za isti režim rada uz mirovanje na tlu. Uzrok toj razlici je manja relativna brzina izlaznog mlaza u odnosu na zrak okoline, a otud proizlazi i manje intenzivno vrtloženje.²

Vremenski gledano buka je bila vrlo veliki problem 1950-tih godina kada su letjeli prvi mlazni zrakoplovi B-52, Comet 4 i Boeing 707-100. Iz slike 4. može se vidjeti tehnološki razvoj i modernizacija motora u vremenu od 1950. do 1995. godine te njihov položaj u odnosu na razinu zvuka. Također može se primijetiti da je najviše modernih zrakoplova nastalo u vremenu od 1980. godine do danas. Svaki od tih zrakoplova što je kasnije konstruiran djeluje tiše i ta tendencija redukcije buke nastavlja se i dan danas.

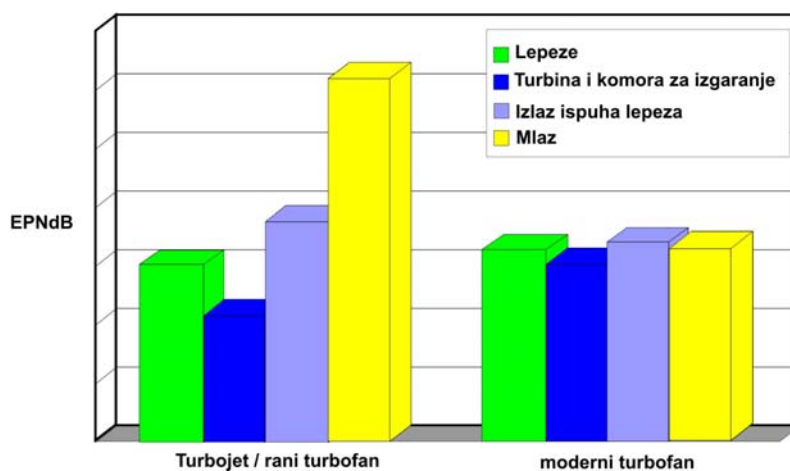
² I. Zorić; **Mjerenje i ocjenjivanje buke zračnog prometa**; Magistarski rad; Sveučilište u Zagrebu; Elektrotehnički fakultet; Zagreb; 1984.



Slika 4. Promjena u redukciji buke zrakoplova u razdoblju od 1950 – 1995. godine

2.3.1.2. Turbo-ventilatorski pogon

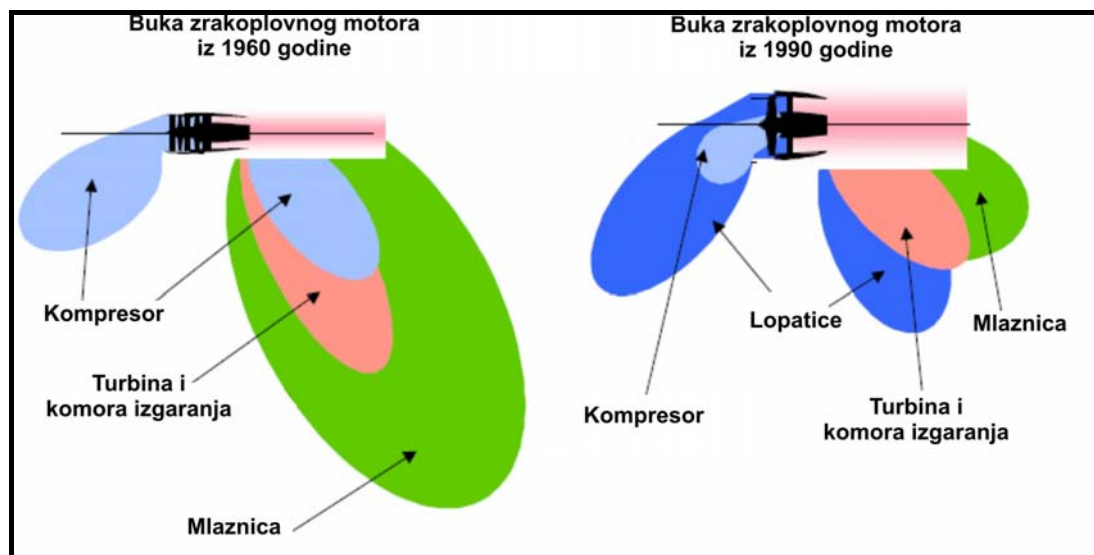
Turbo ventilatorski (turbolepezasti) motor je tip zrakoplovnog motora sličan turbomlaznom motoru. Nastao je kao rezultat nastojanja da se smanji razina buke i poveća stupanj iskorištenja turbomlaznog motora. Sastoji se od lopatica i manjeg turbomlaznog motora koji dolazi u nastavku i pokreće lopatice. Dio zračne struje sa lopatica prolazi kroz motor gdje dodatno sagorijeva i daje potisak. Većina komercijalnih zrakoplova koristi turboventilatorske motore, budući da su veoma učinkoviti i relativno tihi u operacijama. Turboventilatorski motor razlikuje se od turbomlaznog motora u dvije važne točke. Prva točka je da turboventilatorski motor sadrži lepezu koja proizvodi potisak, a druga da taj isti motor proizvodi nižu brzinu mlaznog ispuha.



Grafikon 1. Usporedba buke mlaznice turbojet motora u ranijim godina i danas

Međutim, spektar buke kod turboventilatorskih motora u operacijama maksimalne snage je još dominirao pored široko frekvencijske aerodinamične mlazne buke. Daljnje redukcije mlaznog ispuha buke izvan razina koje su postignute od strane današnjih turboventilatorskih motora mogu se postići u buci drugih mehanizama kao na primjer ventilatora, kompresora, turbine ili procesa izgaranja, dominantnog dijela ukupne buke spektra.

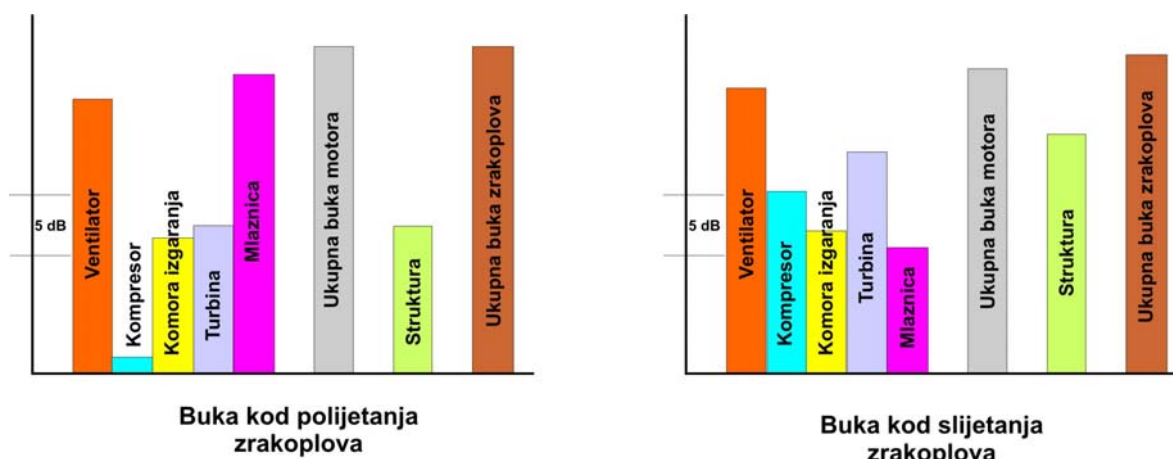
Na slici 5. nalazi se presjek dva turboventilatorska motora iz različitih vremenskih područja. Prvi motor je iz 1960. godine i može se primijetiti da su njegovi najveći izvori buke mlazni ispuh, kompresor i turbina. Kod novijeg tipa turbolepezastog motora iz 1990. godine buka nastala tim elementima se reducirala i ušla u granice praga tolerancija.



Slika 5. Usporedba širenja buke kod zrakoplovnog mlaznog motora iz 1960 (lijeva slika) i 1990 godine (desna slika)

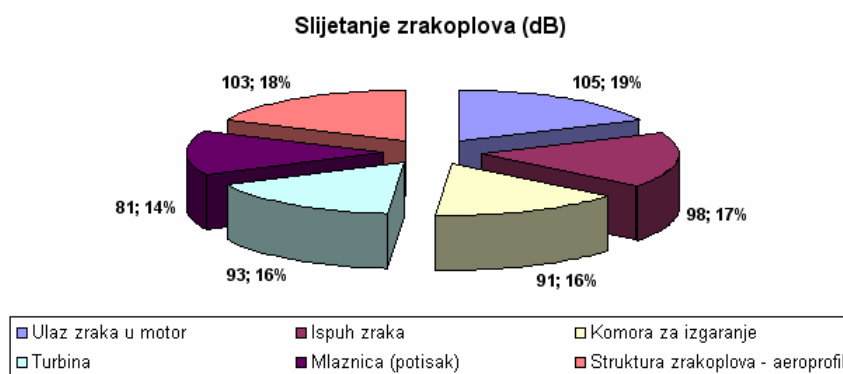
Buka prisutna u procesu polijetanja i slijetanja kod mlaznih motora

Kod svakoga zrakoplova postoji razlika u stvaranju buke u trenutku polijetanja i slijetanja. Kod polijetanja najčešći izvori buke su buka koja nastaje miješanjem potisnog zraka te buka lopatica i komore za izgaranje. Pri slijetanju glavni izvori su buka turbine, lopatica te buka strukture koja nastaje zbog otpora. Na slijedećem grafikonu prikazan je omjer buke na pojedinim elementima u fazama polijetanja i slijetanja zrakoplova.

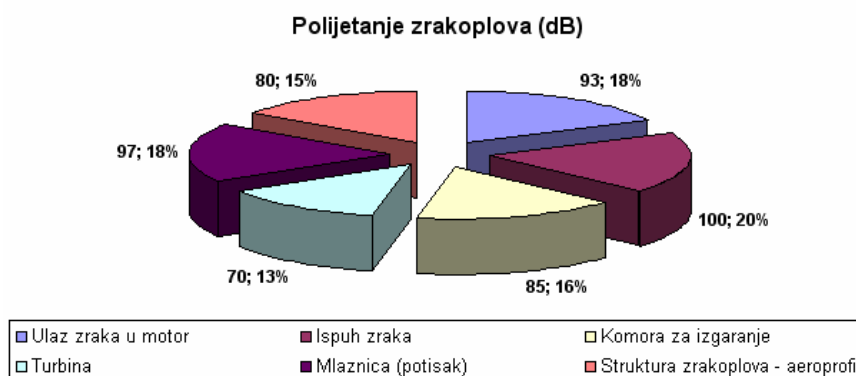


Grafikon 2. Usporedba buke zrakoplova u pojedinim fazama leta

Iz gore prikazanih grafikona vidljivo je da su glavni izvori buke kod zrakoplova u polijetanju buka mlaznika, lopatice, komora za izgaranje i turbina dok sama struktura i kompresor nemaju veliku ulogu u stvaranju buke. U procesu slijetanja povećava se buka lepeza, turbine, kompresora te strukture zrakoplova, dok se buka mlaznica smanjuje. Grafički prikaz prosječne vrijednosti u polijetanjima i slijetanjima prema svim izvorima izgleda ovako:



Grafikon 3. Odnos izvora buke kod zrakoplova pri slijetanju



Grafikon 4. Odnos izvora buke kod zrakoplova pri polijetanju

2.3.1.3. Propelerski pogon

Propelerski pogon u današnje vrijeme nije toliko zastupljen kod komercijalnih zrakoplova. Takva se vrsta pogona koristi uglavnom kod pogona malih zrakoplova generalne avijacije iako se i taj pogon postepeno zbog svog velikog faktora iskoristivosti ponovno vraća kod nekih komercijalnih zrakoplova. Propeler ili elisa definira se kao rotor s najmanje dva kraka koji mogu biti s fiksnim ili promjenjivim korakom. Krakovi su dizajnirani tako da stvaraju područje niskog tlaka s jedne i područje povišenog tlaka sa druge strane ravne rotacije. Rezultirajuće sile pokreću masu zraka uzduž osi rotacije stvarajući potisak. Što se tiče propfan (ventilatorski propulzori) motora, oni su također otvoreni rotori, no u usporedbi s propelerima za dani potisak imaju manji promjer i veći broj krakova. Kod standardnih zrakoplova koristi se suvremeni propeler visoke iskoristivosti za kratke i srednje dolete. Takvi tipovi propelera imaju najčešće od 2 do 6 krakova i optimalno su rješenje za ostvarivanje brzina do oko 0,65 Ma. Ventilatorski propulzori razvijeni su u svrhu poboljšanja karakteristika propelera na većim brzinama. Takvi ventilatori imaju više krakova od 6 do 12 čiji je aeroprofil tanji i uvijen kako bi se odigrale aerodinamičke karakteristike na većim brzinama.

Što se tiče buke koja nastaje propelerom, izvor polja buke je izrazito frekvencijski tonalno i prostorno usmjeren. Mehanizmi nastanka propelerske buke povezani su poglavito s debljinom krakova propelera i aerodinamičnim tlakovima na krakovima koji stvaraju postojani potisak i zaokretni moment. Turbulencija na graničnom sloju krakova u nadolazećoj struji zraka također je izvor buke, no spektar je širokopojasni, a razina buke općenito niska. Razina i spektarni sustav buke uzrokovane propelerom uvjetovan je nizom čimbenika, kao što su: na propeleru obodna i progresivna brzina vrha kraka, oblik aeroprofila kraka, broj krakova, uravnoteženost rotirajućih dijelova propelera i udaljenost promatrača. Izvori propelerske buke mogu se podijeliti na stalne, promjenjive i slučajne izvore.

Stalne izvore promatrač percipira kao vremensku konstantu i oni proizvode periodičnu buku. Ovi izvori nastaju zbog debljine aeroprofila iz poprečnog periodičnog pomaka zraka zbog prolazećeg kraka propelera. Za umjerene brzine vrtnje propelera, izvori buke zbog debljine i opterećenja su linearni i djeluju na površinu aeroprofila. Ako se brzina opstrujavanja na aeroprofilu propelera približava brzini zvuka, nelinearni efekti mogu postati značajniji, a lokalni efekti u mediju koji okružuje aeroprofile krakova tada postaju izvori intenzivne buke.

Promjenjivi izvori su oni izvori koji vremenski ovise o položaju referentne ravnine rotacije propelera prema nadolazećoj struji zraka, a sadrže periodične i slučajne varijacije opterećenja na krakovima. Tipičan primjer periodičnog opterećenja krakova jest efekt napadnog kuta vratila propelera. Ako je os propelera nagnuta prema pravcu nadolazeće struje zraka, svaki krak osjeća cikličku promjenu u lokalnom napadnom kutu, čija je posljedica promjena opterećenja na kraku tijekom okreta. Opterećenje se može tijekom jednoga okreta promijeniti jednom ili nekoliko puta, što ovisi o razini poremećenosti nadolazeće struje zraka. Promjenjiva opteretna buka posebice je važna kod dvostrukih propelera na zajedničkoj osnovi suprotnog smjera rotacije. Iako ova vrsta propelera ne sadrži dodatne ili posebne izvore buke, aerodinamična interferencija dvaju rotora zamjetno podiže promjenjivu opteretnu buku naročito pri malim brzinama leta, posebice pri polijetanju i slijetanju. Naime svaki prednji propeler ostavlja iza sebe mlaz koji udara u stražnji. Taj mlaz može biti kompleksan te je sastavljen od primjerice niskoga strujanja nastaloga na pojedinim segmentima kraka i vrtloženja na vrhovima krakova.

Slučajni izvori uvelike proširuju spektar buke i tipični su generatori širokopojasne buke. Za propelere su važna dva izvora, ovisno o njihovu dizajnu i operativnim režimima. Prvi izvor širokopojasne buke je interakcija nadolazeće turbulentne struje zraka s napadnim rubovima krakova, dok se drugi mehanizam širokopojasne buke temelji na generiranju promjenjive opteretne buke na izlaznim rubovima krakova zbog razvoja turbulentnog graničnog sloja na njihovim površinama, pri čemu parametri buke ovise o karakteristikama graničnog sloja.

2.3.1.4. Buka koja se proizvodi izgaranjem klipnih motora

Mehanizam nastanka buke koja se proizvodi izgaranjem klipnih motora bitno se razlikuje od mehanizma nastanka buke plinskih turbina. Tijekom procesa izgaranja tlak u cilindrima progresivno raste na stalnom volumenu, a nastali valovi nositelji su akustične energije koja se u konačnici uglavnom apsorbira zbog mase i krutosti klipova te stijenki cilindra. Zbog buke koja nastaje unutar motora dolazi do prigušenja iste pa se može zaključiti da je buka izgaranja klipnih motora gotovo redovito neizravna i nastaje prisilnim izlaskom plinovitih produkata izgaranja tijekom ispušnog radnog takta. Buka izgaranja klipnih motora uglavnom je maskirana bukom propelera zbog učinkovitih prigušivača buke na ispušnoj cijevi motora, ali i činjenice da je propeler vrlo izraženi izvor buke.

Zrakoplov koji se kreće na propellerski pogon pokretan je pomoću plinskih turbina ili pomoću klipnih motora. Plinskom turbinom pokrenut zrakoplov ima obično dva motora dok klipnim motorom pokrenut zrakoplov ima jedan ili dva motora. Propelerom tjeran zrakoplov koristi se za većinu privatnih letova i maleni dio komercijalnog prometa. Pokretačka buka izazvana propelerom tjeranog zrakoplova sastavljena je uglavnom od buke propelera i buke ispušnog sustava motora. Propellerska buka je gotovo uvijek značajnija komponenta i za dani potisak je primarna funkcija brzine vrtnje propelera. Tipični spektar propellerske buke kod statičnih zemljanih testova pokazuje vrh kod frekvencija koje su određene umnožavanjem rotacijske brzine propelera pomoću cjelobrojnih višekratnika broja oštrica. Ispusi stapnih strojeva su bučniji nego kod usporedivih turbo motora, ali buka ispuha stapnih motora može se reducirati upotrebom utišača (hush-kit sustava).

2.3.2. Buka izazvana aerodinamikom zrakoplova

Buka strukture zrakoplova definira se kao neželjeni zvuk koji nastaje prilikom protoka zraka uz aeroprofil. Glavni dijelovi aeroprofila koji stvaraju buku su pokretni sustavi koji se nalaze na krilima te stajni trap. Buka koju proizvodi struktura zrakoplova počela se proučavati 1970-tih godina. Redukcija buke i proučavanje aeroprofila naročito se razvijalo u SAD-u, točnije u NASA centru gdje je protok zraka uz strukturu i stajni trap ispitivan u zračnim tunelima.

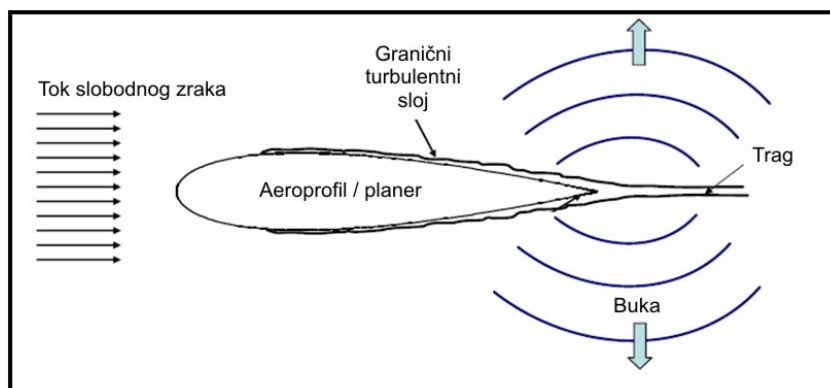
Buka izazvana planerom (aeroprofilom) rezultat je pulsiranja aerodinamičnih sila na krilu, postojanjem turbulentnog graničnog sloja i vrtloga koji se pojavljuje pri opstrujavanju površine krila, trupa i repnih površina, kao i zbog struja oko stajnih organa, zakrilica te raznih izbočina na trupu. Kolebanje tlaka zraka pojavljuje se ondje gdje je strujanje diskontinuirano, naročito u pogonskim sustavima, gdje generiranje potrebne snage zahtijeva znatne promjene u tlakovima i temperaturi. Pri samom polijetanju, nivo buke izazvan planerom je zanemariiv, dok buka izazvana na prilazu ili slijetanju ima velike važnosti i po jačini se može usporediti s bukom pogonskih skupina. Prema ICAO (International Civil Aviation Organization) standardima ANNEX-a 16 kategorija 2, nivo buke planera je propisan od 8-10 EPNdB (efektni nivo percipirane buke - Effective Perceived Noise in Decibels) niži od nivoa ukupne buke, a kod kategorije 3 nivo je propisan na 5-7 EPNdB od ukupne jačine buke. Strukturna buka na zrakoplovu općenito je povezana s diskretnim frekvencijskim komponentama.

Zrakoplov je kao cjelina glavni izvor buke koji utječe na ljude u određenom radijusu oko toga izvora, kao i na posadu i putnike u njemu. Zbog negativnog utjecaja buke zrakoplova, dizajn zrakoplova koji bi svojom strukturom stvarao najmanje buke postao je izazov za sve dizajnere. U posljednjim desetljećima buka zrakoplova se radikalno smanjila zahvaljujući razvoju tehnologije koja je to omogućila. Buku koju stvara planer mogli bi nazvati strukturalnom bukom, a definira se kao buka koja nije prouzročena pogonskom skupinom na zrakoplovu u toku leta. Izvori buke koji čine strukturalnu buku su: stajni trap, predkričica, zakrilca, površina krila koja se pomiče te vertikalni stabilizator zrakoplova. Buka koju proizvode zakrilca proizlazi od vanjskih bridova zakrilca i njihovih bočnih rubova. Pojava vrtloga koji je rezultat između otvorenih i zatvorenih zakrilca glavni je uzročnik za stvaranje buke oko bočnog dijela zakrilca. Iz toga razloga pojavljuje se turbulencija i strujanje tlaka koji povećava buku zrakoplova.

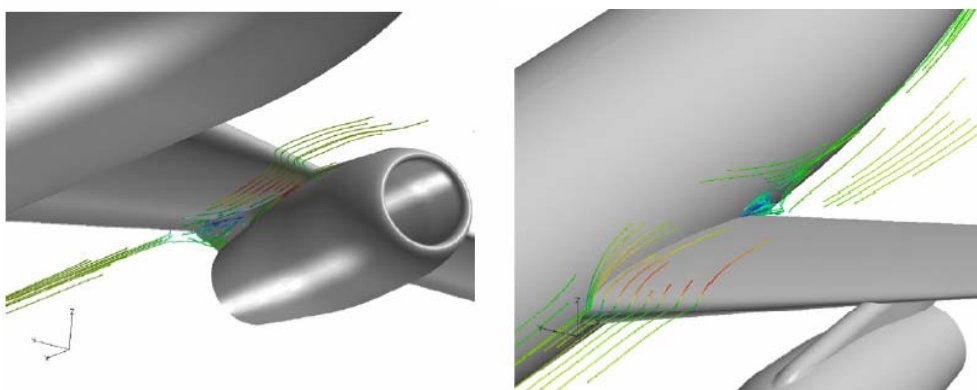


Slika 6. Prikaz izvora buke koju stvara struktura zrakoplova

Jaki vrtlog formira se oštrim prijelazima u polijetanju između podignutih i spuštenih zakrilca te je glavni uzročnik buke koja nastaje na krajevima krila. U blizini ruba zakrilca, razdvojeni zrak stvara turbulenciju i otpor pri protoku zraka što stvara dodatnu buku. Glavni uzročnik buke strukture zrakoplova je nestabilan protok zraka u području zakrilca, predkričica i ostalih pomičnih sistema na krilu.



Slika 7. Širenje buke generirane prelaskom zraka preko aeroprofila krila



Slika 8. Opstrujavanje zraka oko krila

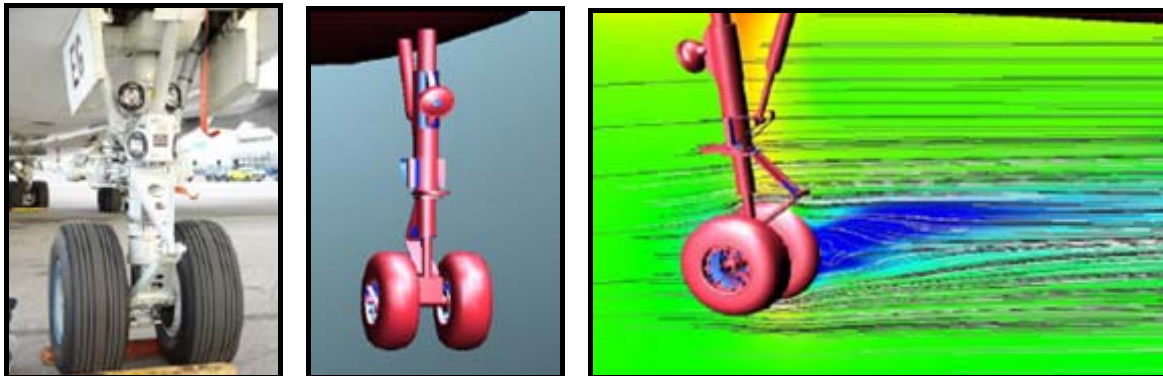


Slika 9. Stvaranje vrtloga koji proizvodi buku

Najveći doprinos stvaranju buke čiji je uzrok oblik zrakoplova čine: krilca, zakrilca i stajni trap. Mjerenja su pokazala da jačina buke koja je nastala od tih elemenata ovisi od zrakoplova do zrakoplova. Dokazano je da svi elementi koji su pomični i djeluju u fazi polijetanja i slijetanja proizvode manju buku kod manjih i srednjih zrakoplova te veću kod većih zrakoplova.

Također jedan od važnih izvora buke strukture je stajni trap. Uzročnik tog buci je protok zraka koji opstrujava oko njega. S obzirom da stajni trap ima mnogo krivina i oštih prijelaza to

dodatno pojačava kompleksnost protoka zraka, a time i povećava buku. Efekt buke koji čini stajni trap pojavljuje se u fazi prilaza i slijetanja, gdje se javlja i najveći otpor oko tih dijelova.



Slika 10. Prikaz računalne analize opstujavanja zraka oko nosnoga kotača Boeinga 747

Stajni trap je kompleksan i ima neaerodinamičan geometrijski oblik te generira veliki turbulentni trag. Dijelovi nosnoga kotača koji najviše utječu na stvaranje buke su: oplata nakon izvlačenja kotača, glavna noga, potpornik, osovina, kotači i kočnice.

Pri slijetanju zrakoplova uvidjelo se da struktura zrakoplova uvelike pridonosi u stvaranju buke te se krenulo u daljnje istraživanje. Istraživanja su pokazala da sve komponente koje jesu izvori buke ne stvaraju buku na svakom zrakoplovu jednako. Dok su pomični dijelovi krila glavni izvori buke kod srednjih zrakoplova, stajni trap postao je glavni izvor buke na velikim zrakoplovima kao što je Boeing 777 ili Airbus A380.

2.4. Izvor buke kod helikoptera

Buka koju proizvodi helikopter na i oko aerodroma je manja od one koju stvara zrakoplov, budući da je njihov broj operacija neusporedivo manji od broja operacija zrakoplova, odnosno operacija polijetanja i slijetanja. Za specificiranje buke helikoptera mora se odrediti njegova pozicija tj. mjesto gdje se čovjek (promatrač) nalazi te krenuti od samoga izvora.

Prva pozicija helikoptera je stvaranje buke pri lebdenju. Ukoliko se buka bilježi s pozicije koja se nalazi neposredno iznad osi vrtnje rotora koji se okreće, percipira se samo jednolični zvuk “šištanja” zraka kako lopatice prolaze kroz zrak. Tu buku primarno stvaraju molekule zraka koje se u graničnom sloju opstrujavanja lopatica rotora ubrzavaju, a potom u

nepravilnom i kaotičnom gibanju bivaju odbačene preko izlazne ivice aeroprofila lopatice. Kako se povećava napadni kut lopatica, a time i uzgon, na njihovim vrhovima pojavljuje se vrtloženje strujnica zraka koje može promijeniti karakteristike buke u nešto grublji zvuk. Dio te promjene je uzrokovan udarima nadolazeće količine zraka koja se stvara kada je helikopter u lebdenju. Zvuk koji stvara turbulentni zrak i zvuk stvoren vrtloženjem strujnica nemaju istu frekvenciju pa se zbog tog razloga takva buka naziva buka širokog spektra ili “bijela” buka zbog bijele svjetlosti koja u sebi sadrži sve frekvencije ili boje spektra. Ukoliko se buka bilježi s pozicije koja se nalazi u neposrednoj blizini rotora, zabilježeni zvuk ima drugačije karakteristike. Sada se pojavljuje i buka uzrokovana rotacijom, pri čemu se čuje svaki prolazak lopatice odnosno viši harmonici te frekvencije. Što su broj okretaja rotora i broj lopatica veći to će i frekvencija prolazeće lopatice bivati sve viša. Kako je ljudsko uho osjetljivije na više nego na niže frekvencije tako se može dogoditi da repni rotor malog promjera s četiri lopatice koje se okreću relativno brzo stvara veću buku od sporije rotirajućeg nosećeg rotora sa dvije lopatice iako kroz njega prolazi manja količina zraka.

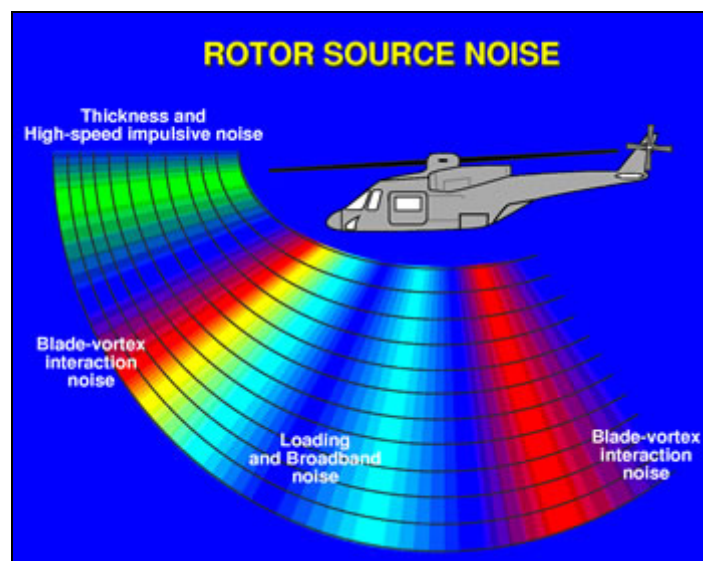
Druga pozicija je horizontalan let u kojem helikopter stvara određenu buku. Ta se buka stvara uslijed okretanja rotora. U ovoj fazi moguće je zabilježiti još jednu karakterističnu vrstu buke pod nazivom “blade slap” ili impulsna buka lopatica. Ona se može pojaviti kao posljedica dva slučaja. U prvom slučaju vrh napredujuće lopatice (lopatice koja se kreće u smjeru leta helikoptera) kreće se toliko brzo da u značajnoj mjeri i vrlo brzo komprimira zrak ispred sebe. To uzrokuje udarne valove koji se projiciraju kao velike promjene u tlaku ispred vrha lopatice. Na maloj udaljenosti zvuk “pucanja” tih impulsa može biti vrlo neugodan. Pri relativno velikom broju okretaja ta se buka pretvara u serije “tupih” udaraca koji se onda mogu čuti na velikoj udaljenosti. Drugi slučaj ili tip impulsne buke nastaje interakcijom između vrtložnih strujnica kada lopatica uđe u vrtložnu struju zraka koja je nastala prolaskom prethodne lopatice. U većini režima leta helikoptera vrtložne strujnice zraka i lopatice ne dolaze u kontakt, ali u nekim manevrima kao što je blago spuštanje ili uvođenje u zaokret ipak dolazi do međusobne interakcije. Struja zraka oko vrtloga stvara iznenadne promjene napadnog kuta i brzine opstrujavanja lopatice što uzrokuje lokalno odvajanje strujnica i mogućnost pojave udarnog vala. Ovdje dolazi do izražaja brzina promjene tlaka zraka koja zbog toga stvara ovu vrstu buke koja se općenito prostire ispred i ispod putanje leta, a neistreniranom uhu može zvučati isto kao i buka uzrokovana velikom brzinom kretanja lopatice.



Slika 11. Izvori buke kod helikoptera

Gdje su:

- 1 i 2 – glavni i repni zvuk
- 3 i 4 – interaktivni zvuk (rotor/struktura)
- 5 i 6 – zvuk nastao efektom vrtloga – glavni i repni rotor



Slika 12. Širenje buke izazvane rotorom helikoptera

Optimalna metoda smanjenja buke helikoptera je odabir relativno male brzine vrhova lopatica za noseći i repni rotor, što smanjuje buku uzrokovanu okretanjem rotora i minimalizira buku koja nastaje komprimiranjem zraka pri velikim brzinama. Međutim smanjenje brzine vrhova lopatica zahtijeva adekvatno povećanje površine lopatica, a time i teži rotor kako bi se dobile iste performanse. Pri tome se zbog manjeg broja okretaja i veće sile povećava težina transmisije i veličina vratila. Tako je krajnji produkt u konstrukciji uvijek kompromis između

visokih performansi i niske razine buke koji u najboljoj mjeri zadovoljava sve uvjete za koje je namijenjen helikopter. U određenoj mjeri kontrolu nad vanjskom bukom helikoptera ima i pilot, osobito u slučaju buke koja se stvara nailaskom lopatice u vrtložnu struju zraka prethodne lopatice. Helikopteri pri svome letu stvaraju buku koja je uzrokovana:

- radom motora,
- opstrujavanjem zraka pri različitim brzinama leta glavnog rotora,
- nosećeg rotora,
- njihovom međusobnom interakcijom itd.

Najveću buku stvara interakcija vrtložnih strujnica sa lopaticama nosećeg rotora u određenim manevrima i pri određenim uvjetima te se provode razna ispitivanja u svrhu redukcije iste.

2.5 Zaključak

Zahvaljujući razvoju nove tehnologije i njene implementacije u zrakoplovstvo može se reći da su promjene na pogonskim skupinama i sam napredak pri dizajniranju zrakoplova pridonijeli smanjenju buke na prihvatljivu razinu. Također gledano na samu podjelu izvora buke, može se reći da je pri polijetanju glavni izvor buke motor, dok se pri slijetanju buka motora smanjila te izjednačila s bukom koju proizvodi struktura zrakoplova. Danas kada tehnologija to dopušta, prije svake izrade bilo kojega dijela zrakoplova on se posebno testira pri čemu se uzima i veličina buke. Drugim riječima, redukcija buke uzima se u obzir pri projektiranju zrakoplova. Kod klipnih i turboelisnih zrakoplova buka koju stvara pogonska skupina je zanemariva, jer tu buku maskira glavni izvor buke, a to je sama elisa. Kod novih turboventilatorskih motora i postignuća u tehnologiji razvoja motora, buka motora i buka koja nastaje zbog strukture zrakoplova svedena je na jednaki nivo.

3. Fizikalne značajke buke

3.1. Uvod

Akustika je znanost koja proučava zvuk i njegovo ponašanje u prostoru ovisno o vrsti materijala kroz koji se taj zvuk kreće te nastoji riješiti probleme nastale proizvodnjom zvuka, prenošenja zvuka, primanja ili recepcije zvuka te zvučnih efekata. Akustika također proučava vibriranje materijala, jer zvuk predstavlja određenu vibraciju na određenoj frekvenciji te određene gustoće valova frekvencije. Ona proučava zvučne valove iz različitih izvora, kako bi što bolje shvatila zvuk i ta saznanja primijenila u arhitekturi, unutarnjem dizajnu glazbenih dvorana, kazališta, tonskih studija i ostalih raznoraznih prostorija. Akustika je također prisutna i u svim granama prometa te u geološkim proučavanjima zemljine atmosfere i podvodnim istraživanjima različitih vrsta.

Zvuk je periodična promjena tlaka koja se širi elastičnim medijem nekom određenom brzinom. Postoje tri vrste zvuka – čisti zvuk ili ton, složen zvuk i šum.

- **Čisti zvuk ili ton** (*eng. tone*) u akustici predstavlja, pravilan zvuk, koji nastaje titranjem nekog izvora zvuka te se može matematički prikazati sinusnom vremenskom funkcijom. Svojstva su mu visina tona (ovisno o frekvenciji titranja), jakost (ovisno o amplitudi titranja), boja (ovisna o rasporedu harmonijskih frekvencija), titranje, porast i opadanje. Potrebno je naglasiti da se čisti zvuk ne može razložiti.
- **Složeni zvuk** je kombinacija više čistih zvukova pa se on može matematički prikazati kao zbroj više sinusnih vremenskih funkcija različitih amplituda i frekvencije. Kada se složeni zvuk razdvoji na više čistih zvukova, tada se zvuk najniže frekvencije naziva čisti ton ili čisti harmonik, a ostali čisti zvukovi nazivaju se viši harmonici
- **Šum** je nepravilno titranje u kojem nema ni stalnih amplituda niti stalnih frekvencija

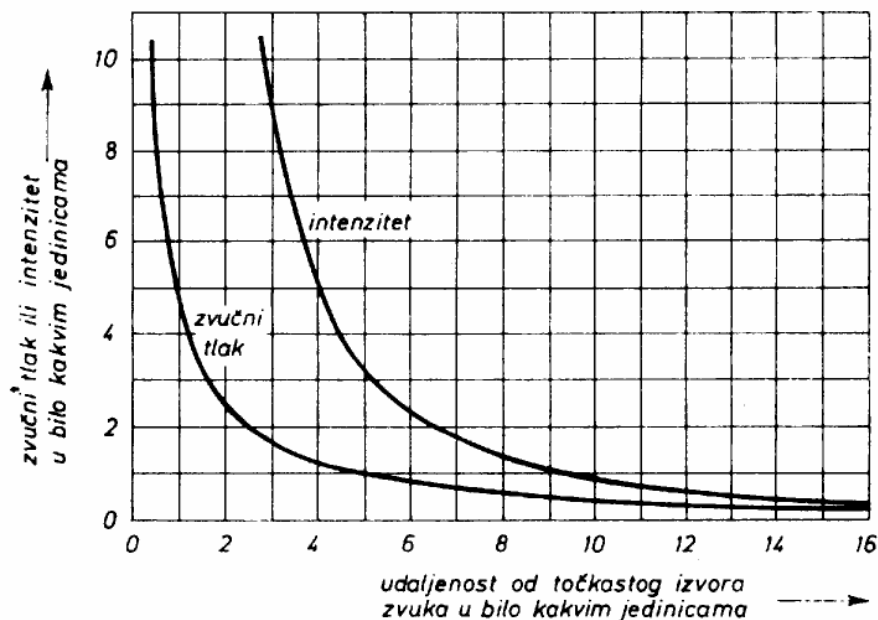
Zvuk se može registrirati osjetom sluha – fiziološkim svojstvima uha i interpretacijom slušnih informacija u mozgu. Njega se može uočiti subjektivno i fizikalno (objektivno).

- **Subjektivno**, zvuk je svaki osjećaj koji prima uho iz vanjske materijalne sredine, dok je objektivno zvuk valno gibanje koje se prostire kroz elastičnu sredinu. Zvuk nastaje brzim oscilacijama čvrstih, tekućih i plinovitih tijela. Da bi zvuk nastao, potrebni su

zvučni izvori i materijalna sredina koja prenosi zvučne valove. Zvučni izvor proizvodi zvučne valove samo onda kada je djelovanjem neke sile pobuđen na osciliranje.

- S **fizikalnog (objektivnog)** stajališta, zvuk predstavlja longitudinalni mehanički val u elastičnom sredstvu (zrak), u području frekvencija od prosječno 20Hz do 20000Hz. Valovi frekvencije ispod 20Hz nazivaju se infrazvukom, a oni frekvencije veće od 20kHz ultrazvukom. Fizikalni parametri zvuka su intenzitet, frekvencija i oblik zvučnog vala.

Zvučni tlak je poremećaj atmosferskog tlaka uzrokovan zvukom. Jedinica za izražavanje atmosferskog tlaka, pa tako i za zvučni tlak zove se *paskal* (Pa). Stara jedinica za tlak je bar, a prema usporedbi veličina paskal je 10 puta veća od mikrobara. Za *bar* postoji još naziv “*atmosfera*”. Najmanji zvučni tlak kojeg ljudsko uho može zamijetiti (čuti kao zvuk) iznosi oko 0.00002 Pa, ili 2×10^{-5} Pa. Ta je vrijednost Internacionalna Standardizacijska Organizacija (ISO) odabrala (tj. standardizirala) kao referentnu veličinu – referentni zvučni tlak. Najveći zvučni tlak kojega ljudsko uho može podnijeti bez oštećenja je milijun puta veći od referentnoga, odnosno 20 Pa (prema $10^6 \times 2 \times 10^{-5}$).



Slika 13. Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti.

3.2. Registriranje zvuka

Dvije su kategorije registriranja zvuka; subjektivni osjećaj zvuka i objektivne metode registriranja zvuka. Subjektivni osjećaj zvuka stvara se u čovjeku pomoću organa sluha (uha) koje je u stanju registrirati zvučne valove frekvencije od 16 Hz do 20 000 Hz, odnosno kod starijih osoba sluh brzo pada i ispod 10000 Hz. Objektivna metoda registriranja zvuka jedna je od najstarijih metoda, a zasniva se na primjeni mehaničkih elemenata koji su u cjelini analogni čovjekovom uhu.

3.3. Zvučni valovi

Zvučne valove izvor zvuka emitira u okolinu. Ako se zvučni izvor nalazi u homogenoj sredini, onda će se zvučni valovi prostirati istom brzinom u svim pravcima. Tu se prenosi mehanički poremećaj sredine koji je nastao u izvoru zvuka. Valovi koji nastaju u zraku od zvučnih izvora su longitudinalni valovi, jer se oscilacija molekula zraka vrši u pravcu prostiranja vala.

3.3.1. Tvari kao prenosioci zvučnih valova

Dokazano je da se zvuk ne prostire trenutno, već je za to potrebno određeno vrijeme, koje ovisi o brzini prostiranja zvuka i duljini puta. Karakterističan primjer je udar groma kod kojega uvijek prije uočimo bljesak, a nakon nekoga vremena čujemo grom. Kako bi se zvuk čuo, između izvora i slušača mora postojati neki element, dok je jedino mjesto kroz koje se zvuk ne prostire - vakuum. Kao što je i ranije spomenuto zvuk se rasprostire kroz plinove, tekućine i čvrsta tijela.

- **Rasprostiranje zvuka kroz plinove** – Plinovi su dobri prijenosnici zvuka. Na navedeno neposredno ukazuje primjer prijenosa zvuka kroz zrak. Kod plinova svojstva prijenosa zvuka ovise o pritisku.
- **Rasprostiranje zvuka kroz tekućine** – Zbog veće gustoće od plinova, tekućine su bolji prijenosnici zvučnih valova. Primjer je udaranje vesla po površini vode ili šum motora motornog čamca.

- **Rasprostiranje zvuka kroz čvrsto tijelo** – Čvrsto tijelo je nekada bolji prijenosnik zvučnih valova od zraka i tekućina. Potvrda tome može se uočiti na primjeru željezničkih tračnica, gdje se pri dolasku vlaka on ne mora vidjeti, ali kroz metalne tračnice zvuk će se brže širiti nego zrakom.

Tablica 2. Brzina zvuka u raznim tvarima

Plinovi		Tekućine		Čvrste tvari	
Zrak (0°C)	331,5 m/s	Aceton	1190 m/s	Aluminij	5104 m/s
Zrak (20°C)	344 m/s	Alkohol	1143 m/s	Bakar	3560 m/s
Zrak (100°C)	366 m/s	Voda (20°C)	1484 m/s	Staklo	5500 m/s
Vodena para	401 m/s	Glicerin	1920 m/s	Guma	54 m/s

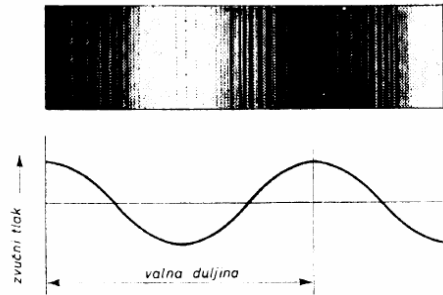
3.3.2. Parametri zvučnih valova

Slično kao i kod mehaničkih valova postoji nekoliko fizikalnih parametara i kod zvučnih valova. Ti parametri su: amplituda valova, period osciliranja (frekvencije), valna dužina, brzina rasprostiranja i jačina zvuka.

- **Amplituda zvučnog vala** (y_0) predstavlja najveću udaljenost neke čestice koja titra od ravnotežnog položaja prilikom prenošenja vala. Obilježava se sa y_0 , a može biti pozitivna i negativna.
- **Period osciliranja zvučnoga vala** (T) predstavlja vrijeme za koje zvučni izvor ili val izvrši jednu oscilaciju. Kao što je poznato, recipročna vrijednost perioda T predstavlja frekvenciju vala f .
- **Valna duljina zvučnog vala** (λ) predstavlja udaljenost između dvije susjedne točke sa najvećim zgušnjem i razrjeđenjem. Valnu duljinu može se definirati i kao udaljenost koju zvučni val prođe za vrijeme dok izvor vala izvrši jednu oscilaciju. Opseg frekvencija zvuka koje su značajne za čovjeka određen je mogućnostima percepcije osjeta sluha. Taj je opseg za zdravi sluh normalan u rasponu od 20 Hz do 20 kHz, a za koji možemo reći da je vrlo širok opseg. Posljedica navedenog je isto tako široki opseg valnih duljina koje se javljaju u zvučnom polju, koje u zraku okružuje čovjeka. Formula izračunavanja valne duljine je :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

gdje je λ duljina zvučnog vala u metrima, c - brzina njegova širenja (m/s) i f - frekvencija osciliranja izvora vala (Hz).



Slika 14. Valna duljina

Tablica 3. Valne duljine zvuka u zraku

Frekvencija	20 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz
Valna duljina	17 m	3,4 m	34 cm	3,4 cm	1,7 cm

Zvuk frekvencije ispod 16 Hz je infrazvuk, a iznad 20 kHz je ultrazvuk.

- **Brzina rasprostiranja zvučnog vala** predstavlja omjer puta x koji val prijeđe i vremena prostiranja t . Bitno je napomenuti da brzina zvuka u svim elementima ovisi i o temperaturi. Brzina zvuka najmanja je u plinovima, veća u tekućinama, a najveća u čvrstim tijelima naročito metalima. Brzina zvuka u plinovima može se prikazati formulom:

$$c = \sqrt{\frac{px}{\rho}} \quad (\text{m/s})$$

gdje je: p - pritisak plina

x - konstanta koja jedino zavisi od broja atoma u molekuli plina

ρ - gustoća plina

Brzina zvuka može se izraziti i preko temperature i to formulom:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad \text{pri } p = \text{const.} \quad (\text{m/s})$$

Iz ovoga slijedi zaključak da je brzina zvuka srazmjerna kvadratnom korijenu iz apsolutne temperature plina.

Brzina zvuka u čvrstim tvarima i tekućinama može se prikazati formulom:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{m/s})$$

gdje je:

E – Jungov modul elastičnosti E_y kod čvrstih tvari ili zapreminski modul elastičnosti kod tekućina (E_V)

ρ - gustoća tvari

Jakost zvuka (Intenzitet zvuka)

Zvučnim se valom prenosi mehanička energija. Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu veličine 1 m^2 , okomito postavljenu na smjer širenja zvuka, naziva se jakost ili intenzitet zvuka. Prema tome jakost i intenzitet, ovako definirani, postaju sinonimi.

Za ravni val je to umnožak tlaka i titrajne brzine:

$$I = p \cdot v, \text{ odnosno } I = \rho_0 \cdot c \cdot v^2 \text{ tj. } I = \frac{p^2}{(\rho_0 \cdot c)}$$

gdje je:

I – jakost zvuka tj. intenzitet zvuka,

p – tlak,

v – brzina,

ρ_0 - gustoća zraka,

c - brzina zvuka.

S obzirom da za zrak umnožak $\rho_0 \cdot c$ iznosi oko 410 Ns/m^3 , formula $I = \frac{p^2}{(\rho_0 \cdot c)}$ se može

pojednostaviti kao:

$$I = \frac{p^2}{410} \quad \text{W/m}^2$$

Prema navedenoj formuli, ako se umjesto zvučnog tlaka p uvrsti referentni zvučni tlak, može se izračunati i referentni zvučni intenzitet, koji iznosi 9.76×10^{-13} , odnosno, približno 10^{-12} W/m^2 . Na isti način, uvrsti li se u formulu za intenzitet maksimalna veličina zvučnog tlaka kojeg čovjek može podnijeti dobit će se zvučni intenzitet od 1 W/m^2 . Treba istaknuti kako je dinamika sluha velika tj. najmanji i najveći zvučni tlak kojeg uho može registrirati odnose se kao $1 : 10^6$, iz razloga što intenzitet zvuka ovisi o kvadratu zvučnog tlaka, a najmanji i najveći zvučni intenzitet odnose se kao $1 : 10^{12}$.

Za kuglasti val u kojem postoji fazni kut φ između tlaka i titrajne brzine formula bi izgledala ovako,

$$I = p \cdot v \cdot \cos \varphi$$

Tablica 4. Zvučni intenziteti i titrajne brzine za odgovarajuće tlakove

Zvučni tlak		Zvučni intenzitet	Titrajna brzina
Pa	μbar	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	mm/s
10^{-4}	10^{-3}	$2,44 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$
10^{-3}	10^{-2}	$2,44 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	10^{-1}	$2,44 \cdot 10^{-1}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$
10^{-1}	1	24,4	$2,44 \cdot 10^{-1}$
1	10	2440	2,44
10	10^2	$244 \cdot 10^3$	24,4

U praksi postoje **objektivan intenzitet zvuka** i **subjektivna glasnoća zvuka**.

- Čovjek promjenu objektivne razine zvuka osjeća u logaritamskom odnosu. Prag čujnosti je onaj intenzitet zvuka koji je potreban da zvuk određene frekvencije izazove u uhu jedva primjetan osjećaj zvuka kod čovjeka. Kod velikih intenziteta zvuka osjećaj zvuka pretvara se u bol, pa se ta granica naziva granica boli. Granica boli je onaj intenzitet zvuka pri kojem čovjek još jasno čuje zvuk uz neugodan subjektivni osjećaj, koji se pretvori u bol ako se jačina zvuka makar i malo poveća. Objektivan intenzitet zvuka može se izračunati putem formule:

$$I = \frac{E}{St}$$

Pri čemu je I – objektivan intenzitet zvuka, E – energija zvučnog vala, t – vrijeme, S – površina. Energija zvučnog vala E je najveća na mjestima najvećeg tlaka i brzine te je time nejednoliko raspoređena u prostoru.

- Subjektivna glasnoća zvuka – subjektivni osjećaj glasnoće zvuka ovisi najviše o njegovom objektivnom intenzitetu. Ona se izražava u fonima te predstavlja apsolutnu jakost zvuka. Ista objektivna jačina zvuka različitih frekvencija ne izaziva isti subjektivni osjećaj jačine zvuka, ali ipak subjektivni osjećaj jakosti zvuka ovisi najviše od njegove objektivne jakosti. Naime, ako je objektivna jakost zvuka povećana 10 puta, čovjek neće imati osjećaj da se ona povećala

10 puta, već za logaritam od 10. Ako to promatramo kao dvije objektivne jakosti zvuka I_1 i I_2 , onda je subjektivna jakost drugog zvuka u odnosu na prvi

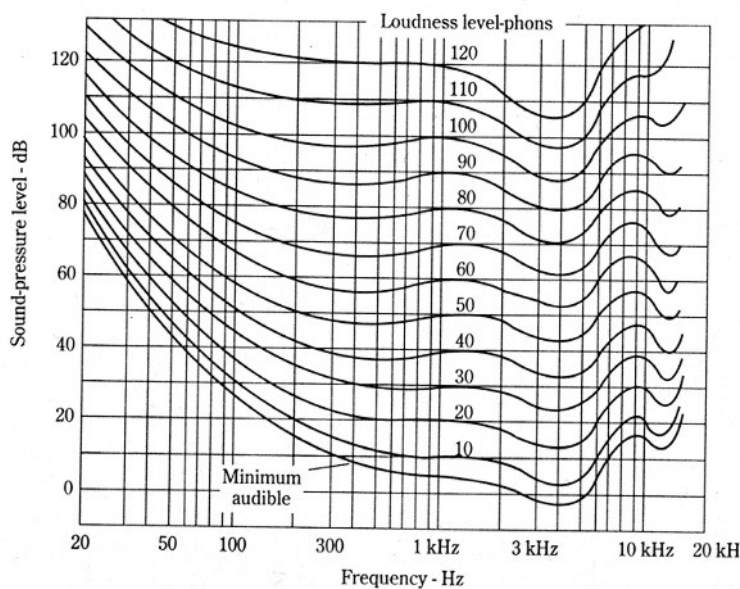
$$L = \log \frac{I_2}{I_1}$$

te se izražava u belima (B). U praksi se koristi 10 puta veća jedinica a to je decibel (dB). I ovakav način izražavanja subjektivne jakosti zvuka (u dB) ima svojih nedostataka, jer znajući da je subjektivna jakost nekoga zvuka npr. 80 dB, ne zna se uvijek u odnosu na koju objektivnu jakost I_1 je ona računata. Iz tog se razloga u praksi kao referentna razina zvuka I_1 uzima jakost zvuka na pragu čujnosti I_{\min} . U tom se slučaju subjektivna jakost zvuka izražava u fonima, oznaka Ph. Na taj način pragu čujnosti odgovara jakost zvuka od:

$$L_{\min} = 10 \log \frac{I_{\min}}{I_{\min}} = 10 \log 1 = 0 \text{ Ph}$$

a granica bola, za frekvenciju 1000 Hz (za koju je $I_{\max}=10^{-12}\text{W/m}^2$, $I_{\min}=10 \text{ W/m}^2$) izračun bi bio:

$$L_{\max} = 10 \log \frac{I_{\max}}{I_{\max}} = 10 \log 10^{13} = 130 \text{ Ph}$$



Slika 15. Audiogram normalnog ljudskog uha

Tablica 5. Subjektivna glasnoća za neke karakteristične slučajeve

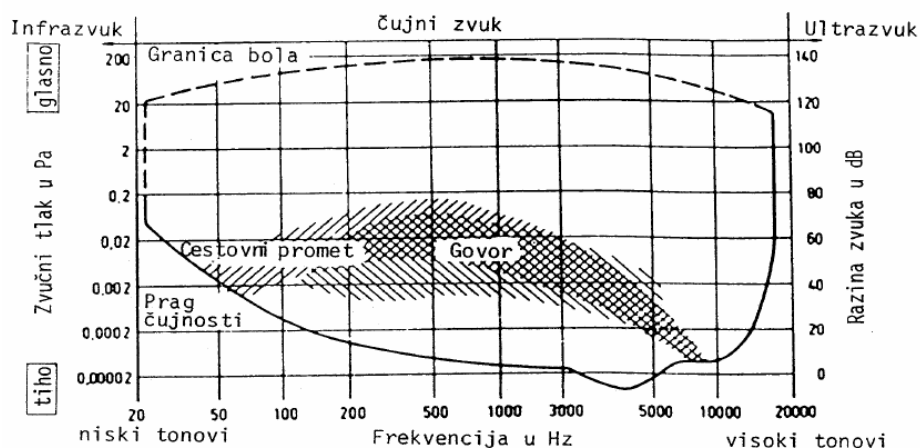
Prag čujnosti	0 Ph
Šum lišća	10 Ph
Šaputanje	20 Ph
Tihi govor	40 Ph
Glasniji govor	60 Ph
Ulična buka	70 Ph
Vrisak	80 Ph
Motocikl	100 Ph
Parni čekić	110 Ph
Zrakoplovni motor	120 Ph
Granica bola	130 Ph

Osjećaj jakosti zvuka

Uho je najosjetljiviji akustični prijemnik u pogledu jakosti zvuka i visine tona. Ono je u stanju razlikovati 300 000 različitih zvukova. Čujno područje ljudskog uha je od 20 Hz do 20kHz, a malo se razlikuje od osobe do osobe. Vrijednost najmanje promjene zvučnog tlaka koje uho može detektirati iznosi oko 20 mikropaskala i naziva se prag čujnosti ljudskog uha. Prag čujnosti na frekvenciji 1 kHz uzet je kao referentna vrijednost i označena je s 0 dB.

Prag čujnosti je ona jačina zvuka koja je potrebna da zvuk određene frekvencije izazove u uhu jedva primjetan osjećaj zvuka kod čovjeka. Kod većih jačina zvuka gornja granica naziva se granica boli.

Granica boli je ona jačina pri kojoj čovjek još jasno čuje uz neprijatan subjektivan osjećaj koji se pretvori u bol ako se jačina zvuka i malo poveća. Razlika minimalne i maksimalne objektivne jačine zvuka, koju čovjek može čuti iznosi 1:1013 te se naziva dinamička čujnost.



Slika 16. Slušno područje ljudskog uha

3.3.3. Snaga zvuka (akustička snaga)

Snaga zvuka (P) definira se kao količina energije koja u sekundi prostruji kroz površinu veličine S te se izražava vatima (W), a računa se kao umnožak intenziteta i veličine površine na kojoj taj intenzitet djeluje.

$$P = I \cdot S \quad [P]=W$$

gdje je P – snaga zvuka (akustička snaga), I – intenzitet, S - površina

Iz toga proizlazi da se snaga izvora zvuka može izračunati na temelju izmjenjenog zvučnog tlaka i podatka o udaljenosti od izvora na kojoj je izmjeren zvučni tlak. O veličini zvučnog tlaka zavisi intenzitet zvuka. Uz pretpostavku kuglastog širenja (u svim smjerovima) zvučnog vala od izvora do mjesta na kojem se mjeri zvučni tlak, površina na koju se ravnomjerno raspoređuje zvučni intenzitet računa se prema formuli za oplošje kugle prema:

$$S = 4r^2\pi \quad [S]=m^2$$

gdje je S – površina na koju se raspoređuje zvučni intenzitet, dok je r – polumjer. Kao primjer tome ukoliko se želi saznati koju zvučnu snagu mora imati izvor zvuka da na udaljenosti od 5 metara da može proizvesti zvučni intenzitet od 1 W/m^2 , treba prvo izračunati koja je površina oplošja kugle radijusa 5 m:

$$S = 4 \cdot 5^2 \pi = 314 \text{ m}^2$$

Prema tome, izvor zvuka mora imati snagu od 314 W, (prema 314×1) da na udaljenosti od 5 metara djeluje intenzitetom zvuka od 1 W/m^2 .

Tablica 6. Primjeri emitirane zvučne snage nekih izvora:

razgovor, srednja glasnoća	oko $7 \cdot 10^{-5} \text{ W}$
vršna snaga ljudskog glasa	oko $2 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
violina	oko 10^{-3} W
klavir	oko $2 \cdot 10^{-1} \text{ W}$
truba	oko $3 \cdot 10^{-1} \text{ W}$
orgulje	1-10 W
bubanj	oko 10 W

Osnovna specifičnost zvučne snage, ako se ista usporedi sa definicijom snage u elektrotehnici, jest da ne postoji način kojim bi se ona direktno mjerila ili na drugi način neposredno pratila. Zvučna snaga nekog izvora može se kvantificirati samo posljedičnim putem koji nastaje u zvučnom polju. Zvučna snaga nekog izvora određena je ukupnim efektom njegovog rada u

okolnom mediju. Ona se može definirati samo preko izračene zvučne energije koju bi pri mjerenju trebalo na neki pogodni način "uhvatiti".

Razina zvučne snage

Iz istih razloga zbog kojih je uvedena razina zvuka kao mjera stanja u zvučnom polju i za zvučnu snagu postoje razlozi da se uvede jedna paralelna logaritamska mjera. Tako je definirana veličina koja se naziva razina zvučne snage koja je, po definiciji:

$$L_w = 10 \log \frac{P_a}{P_{a0}}$$

gdje je:

L_w – razina zvučne snage,

P_a – linearna vrijednost zvučne snage,

P_{a0} – referentna razina zvučne snage

U ovom slučaju referentna vrijednost P_{a0} je 10^{-12} W to jest 1 pW. Očigledno je da zvučnoj snazi 1 W odgovara razine zvučne snage 120 dB. Zvučna snaga realnih izvora u čovjekovom okruženju kreće se u širokim granicama. Ono što je karakteristično je da normalni zvučni izvori koji stvaraju zvukove u svakodnevnom čovjekovom okruženju imaju relativno male zvučne snage. Tako je snaga veličine 1 W veoma velika vrijednost i zvučni izvori koji stvaraju takvu snagu proizvode zvukove u svojoj blizini koje čovjek subjektivno doživljava kao vrlo jake. Istovremeno, zvučni izvori čija je snaga 10^{-6} W i manje proizvode zvukove koji su dovoljno čujni u njihovoj neposrednoj okolini.

Tablica 7. Podaci o zvučnim snagama i razinama snage nekih realnih izvora zvuka

zvučna snaga (W)	Razina snage (dB)	primjer izvora
100.000.000	200	motor najvećih raketa nosača
.....
10.000	160	motori mlaznih zrakoplova
1.000	150	
100	140	
10	130	simfonijski orkestar
1	120	
0,1	110	
0,01	100	automobil na ravnom putu
0,001	90	
0,0001	80	usisivači
0,00001	70	veoma jak ljudski glas
0,000001	60	

0,0000001	50	
0,00000001	40	šapat
0,000000001	30	
0,0000000001	20	najtiši šapat

3.3.4. Interferencija zvučnih valova

Interferencija je karakteristična pojava kod svih vrsta valnog gibanja u mediju, pa tako i kod zvuka. Interferenciju shvaćamo na način da, ako se u prostoru sretnu dva ili više valova, na mjestu dodira, valova nastaje novi val. Taj val odgovara valu koji nastaje zbrajanjem elongacija svih pojedinačnih valova što se sijeku u toj točki prostora. Također možemo reći da je interferencija fenomen koji se pojavljuje kad se dva vala susretnu putujući kroz isti medij, pri čemu je posljedica drugačiji raspored energije, odnosno zvučnog tlaka. Naime, ako se kompresija (visoki tlak) jednog vala susretne s kompresijom drugog vala na istom mjestu u mediju, rezultat je još veći iznos tlaka u toj točki medija. Analogno tome, pri susretu ekspanzija valova (niski tlak) oni se superponiraju te daju dodatno niži tlak. Obje pojave su poznate kao konstruktivna interferencija, za razliku od destruktivne interferencije koju karakterizira susret kompresije jednog vala s ekspanzijom drugog vala. Visoki tlak jednog vala i niski drugog, međusobno jedan drugog isključuju, a rezultat toga je normalan tlak kao da zvučni val uopće nije prošao tom točkom. Ako određeno mjesto u mediju ponovljeno doživljava interferenciju kompresija, koju slijedi interferencija ekspanzija, tada dva zvučna vala kontinuirano ojačavaju jedan drugog i proizvode vrlo glasan zvuk. Glasnoća zvuka posljedica je oscilacije čestica medija na tom mjestu između vrlo visokog i vrlo niskog tlaka.

3.3.5. Rezonancija kod zvuka

Rezonancija je pojava kada na neki sustav, koji može titrati nekom svojom frekvencijom (tzv. vlastita frekvencija), djeluje sila čija je frekvencija upravo jednaka vlastitoj frekvenciji sustava, tj. mogla bi se objasniti i kao pojava koja nastaje kod sustava koji prisilno titra kada se pri određenoj frekvenciji pobude postiže maksimalna amplituda titranja. Rezonancija je karakteristična pojava kod svih mehaničkih oscilacija, a naročito kod zvuka. Izraženost rezonancije ovisi o prigušenju, tj. omjeru energije gubitaka i ukupne energije u sustavu. Istaknuto je da su zvučni izvori mehanički oscilatori, koji se najčešće pobuđuju periodičkim prinudnim silama. Ovakve sile izazivaju prinudne oscilacije zvučnih izvora.

3.4. Buka

Uz zvuk se također vežu dva pojma: buka i udari. Buka (engl. noise) definirana je kao neželjeni zvuk koji smeta čovjeku, a može prouzročiti i zdravstvene tegobe. Ta definicija je prilično subjektivna jer ovisi o pojedincu i njegovoj subjektivnoj percepciji/osjetu zvuka (buke). U nekim vremenskim periodima se buka niti ne primijeti zato jer djeluje konstantno i ujednačeno dok joj negdje razina skače na vrijednosti visine pri kojima se ne može normalno raditi ili komunicirati. funkcionirati. Teško je naći mjesto u urbanoj sredini, a da u blizini nema izvora buke. Međutim, buka nije problem samo zato što iritira pojedinca u njegovu odmoru, poslu i svakodnevnom životu, već je problem zato što ozbiljno ugrožava zdravlje čovjeka. Ona ometa koncentraciju i druge mentalne aktivnosti, među kojima je najvažniji san. Izaziva smetnje kardiovaskularnog i imunološkog sustava, povišen krvni tlak, tjeskobu i depresiju. Buka se može podijeliti na izravnu i neizravnu. Izravna ili direktna buka je određena intenzitetom izvora i njegovom udaljenošću. Neizravna buka ovisi o koeficijentima refleksije poda, zidova, stropa te o poziciji takvih izvora. Razina buke mjeri se u decibelima (dB). Zbog načina na koji funkcionira ljudsko uho, čovjek može primijetiti minimalnu razliku u nivou buke u iznosu od oko 1 dB. Buka se opisuje trima veličinama: razinom buke, trajanjem buke i tipom buke. Tri su osnovne značajke buke:

- **Razina buke** - Kao što je navedeno, decibel je jedinica za mjerenje intenziteta zvuka. Tihi zvukovi nemaju štetnih utjecaja na čovjeka, dok vrlo glasni zvukovi mogu uzrokovati bol u ušima te razne druge štetne posljedice. Između te dvije razine zvuka nalazi se spektar zvukova kojima je čovjek svakodnevno izložen.
- **Trajanje buke** - Štetan utjecaj buke proporcionalan je njenom trajanju. Što je duže osoba izložena buci, to je veća vjerojatnost pojave štetnih posljedica za zdravlje.
- **Vrsta buke** - Postoje različiti tipovi buke ovisno o njihovoj karakteristici;
 - *Isprekidana buka* je ona kod koje se razina zvuka naglo poveća i naglo smanji. Primjer za ovakav tip buke je prolaz jednog vozila ili zrakoplova pored slušatelja. Za svaki ciklus rada stroja kao izvora zvuka, razina zvuka se može izmjeriti isto kao i za kontinuirani zvuk. Razlika u ovom mjerenju jest ta da se ciklus trajanja mora zabilježiti. Svako pojedino prolaženje vozila ili zrakoplova shvaća se kao jedan događaj. Za mjerenje jednoga događaja mjeri se *Sound Exposure Level (SEL)*, kombinirani nivo zvuka i trajanja.
 - *Neisprekidanom bukom* možemo nazvati onaj zvuk koji stvara stroj koji radi bez prekida u istom stupnju, sa istom jačinom zvuka, npr. pumpa i strojevi za

obradu. Ako se čuju tonovi ili niske frekvencije, frekvencijski spektar može se mjeriti za dokumentaciju ili daljnje analize.

- *Impulsna buka* je ona koja se dogodi iznenada i kratkog je trajanja kao npr. eksplozija ili pucanj. Taj zvuk je kratak i jak te stvara veću buku od one koja bi se očekivala. Kod pucnjave se očekuje velika buka, ali možda ne i vrlo visoke vršne razine zvučnog tlaka koje kod petarde na 1 metar od nje mogu iznositi i preko 160 dB. Za kvantificiranje impulsnog zvuka može se koristiti razlika između brze i spore vremenske konstante integracije.
- *Varirajuća buka* je zvuk koji može biti trajan ili isprekidan. To su takozvani „dosadni zvukovi“ koji mogu biti stvoreni na nekoliko načina npr. da ga stvori stroj sa rotirajućim dijelovima kao što je motor i/ili ventilator. Neuravnoteženi i ponavljajući udarci stvaraju vibracije koje se šire zrakom i čuju se kao tonovi. Pulsirajuća tekućina ili plin također mogu stvoriti tonove. Tonovi se mogu određivati subjektivnim ili objektivnim slušanjem koristeći frekvencijsku analizu.

Decibeli (dB)

Decibel se definira kao deseterostruki logaritam omjera dviju veličina. Te veličine u akustici mogu biti npr. tlak, intenzitet, snaga. Tako definirana veličina naziva se *bel* (prema Grahamu Bellu izumitelju telefona), a prikladnija, deset puta veća jedinica zove se decibel (dB). Broj decibela intenziteta izračunava se prema formuli:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [L_I] = \text{dB}$$

gdje je:

L_I – razina intenziteta (vrijednost)

I - mjerni intenzitet

I_0 - referentni intenzitet

Na taj način se dinamika slušnog polja, odnos najjačeg i najslabijeg zvuka kojeg čovjek može čuti, svodi od odnosa $10^{12} : 1$ na 120 dB prema formuli:

$$n = 10 \log \left(\frac{10^{12}}{1} \right) = 120 \text{ dB}$$

gdje je n – dinamika slušanja

Budući da je decibel definiran preko odnosa intenziteta, a intenzitet zvuka ovisi o kvadratu zvučnog tlaka, u slučaju kad se u decibelima želi izraziti odnos dvaju zvučnih tlakova, formula poprima oblik:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

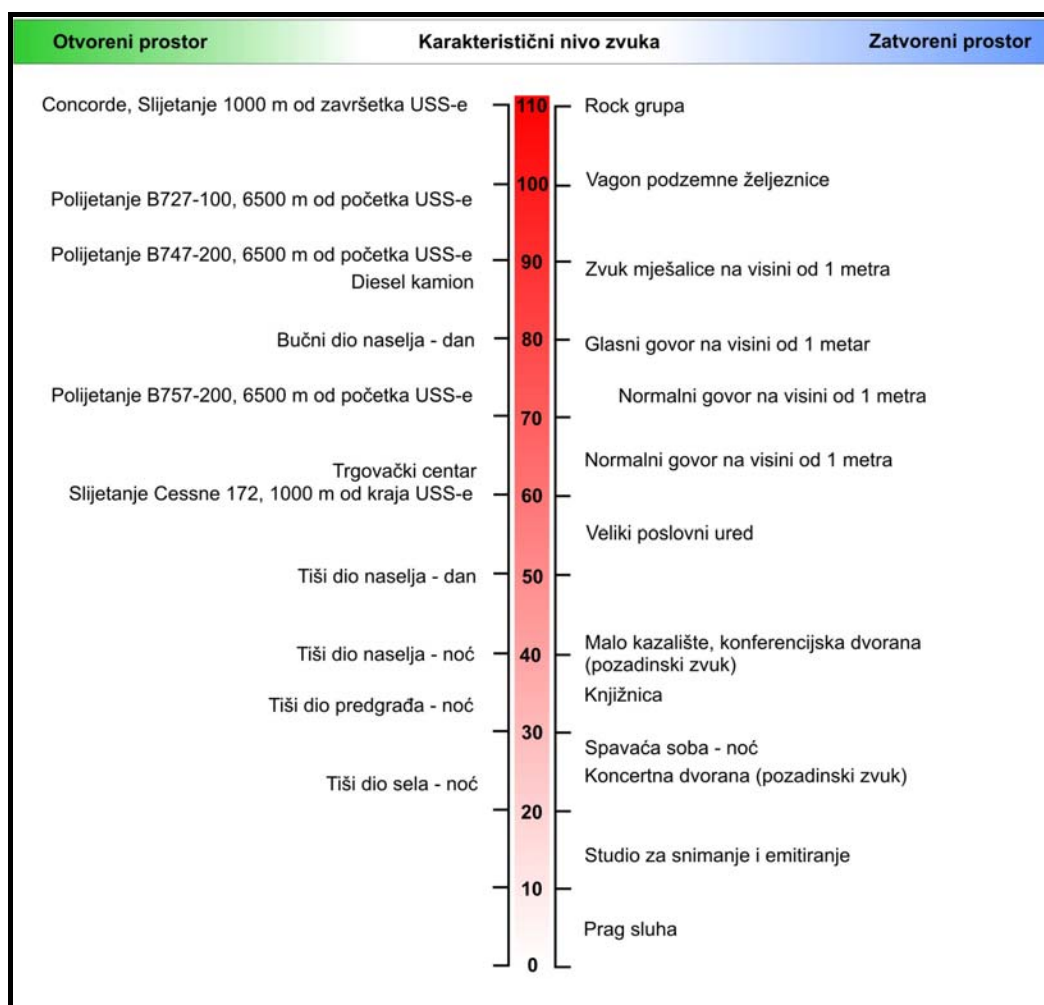
gdje je:

L_p – razina zvučnog tlaka,

p – izmjerena vrijednost zvučnog tlaka,

p_0 – referentna vrijednost zvučnog tlaka ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa)

Iz tog razloga dvostruki intenzitet predstavlja povećanje intenziteta od približno 3 dB, a dvostruki zvučni tlak predstavlja povećanje zvučnog tlaka od 6 dB.



Slika 17. Karakteristične razine zvuka u rasponu od 0-110 dB na otvorenom i zatvorenom prostoru

3.5. Udar

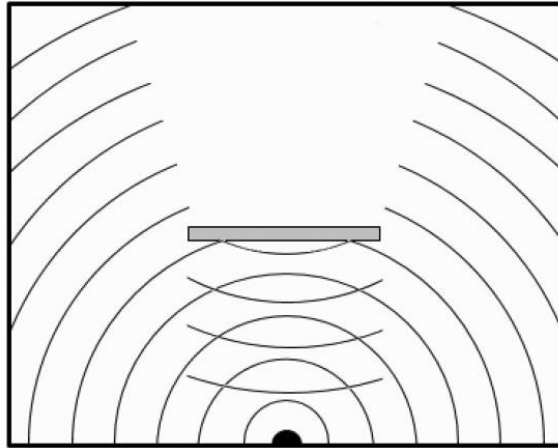
Udar je jači zvuk kratkoga trajanja, koji kod ljudi izaziva vrlo neugodan osjećaj. Zvučni udar može nastati npr. pri pucanju iz puške, udaru groma ili probijanju zvučnoga zida zrakoplova. Pri udaru, amplituda zvučnog vala naglo naraste do vrlo visokih vrijednosti i brzo padne na nulu. Osnovna svojstva buke i udara pokazuju da su njihovi frekvencijski spektri izrazito neperiodičke funkcije, što znači da sadrže veliki broj harmonika.

3.6. Fizikalne osnove širenja zvuka u otvorenom prostoru

3.6.1. Refleksija zvuka

Refleksija zvuka je pojava nagle promjene pravca prostiranja jednog dijela energije zvučnog vala. Do refleksije dolazi pri nailasku vala na fizički diskontinuitet u sredini kojom se širi. Pojam diskontinuiteta ovdje podrazumijeva svaku naglu promjenu fizičkih svojstava sredine na koju nailazi zvučni val u svom kretanju. Najdrastičniji oblik diskontinuiteta je kada val, šireći se kroz zrak, nailazi na prepreku od masivnog, tvrdog materijala kao što je npr. zid. Postoje nekoliko oblika refleksije, a to su refleksija u ravnini, refleksija u kosoj incidenciji i refleksija od neravnih površina.

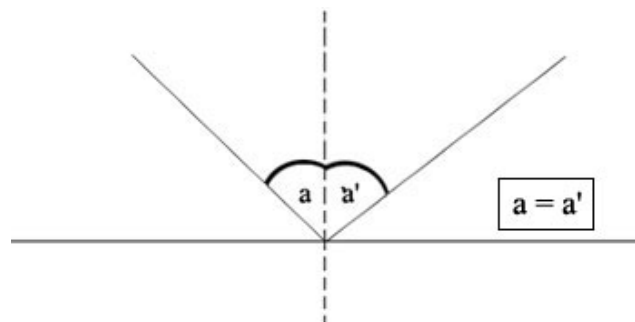
- **Refleksija u ravnini** je pojava kod koje se energija ravnog vala, koji pri prostiranju nailazi na diskontinuitet, jednim dijelom reflektira i vraćati nazad (reflektirani val) dok ostatak energije nastavlja sa širenjem kroz drugu sredinu. Na slici 18. prikazan je primjer refleksije zvučnih valova kod kojeg je prepreka puno većih dimenzija od njihove valne duljine. Valovi se potpuno odbiju od zapreke i iza nje ostaje prostor bez zvučnih valova, tzv. „zvučna sjena“. Kod slučaja kada prepreka nije puno većih dimenzija od valne duljine zvučnog vala, iza prepreke se zvuk nesmetano nastavlja.



Slika 18. Prikaz refleksije vala

Kao i u optici, izlazni kut reflektiranog vala odgovara upadnom kutu, ako se radi o glatkoj površini.

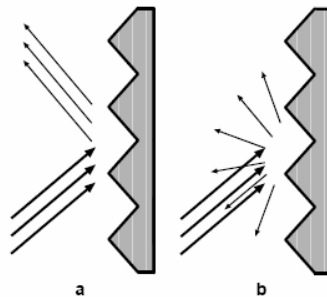
- **Refleksija pri kosoj incidenciji** - U realnom je vremenu pojava normalne incidencije u zvučnom polju izuzetak, odnosno vjerojatnost nailaska vala pod pravim kutom u odnosu na prepreku je mala. U općem slučaju kut incidencije može biti proizvoljan. Kada val nailazi na prepreku pod nekim proizvoljnim kutom, kao što je prikazano na slici 19. refleksija se odvija po geometrijskom zakonu. Reflektirani val nastavlja se kretati pod istim tim kutom pod kojim je naišao upadni val. To je pravilo koje važi za sve valne pojave. Intenzitet reflektiranog vala biti će umanjen za utjecaj apsorpcije reflektirajuće površine.



Slika 19. Refleksija zvučnog vala pri kosoj incidenciji

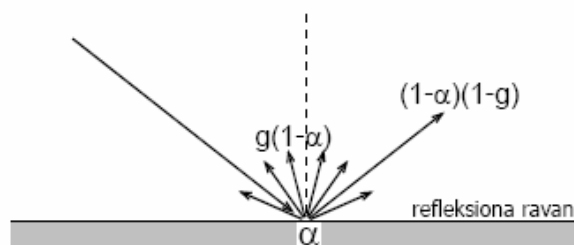
- **Refleksije od neravnih površina** - Kada zvučni val naiđe na površinu koja nije ravna, već sadrži neravnine (reljef), pojava refleksije je znatno složenija. Ako se pretpostavi da je i reljefna površina na koju nailazi val beskonačna, kao što je pretpostavljeno i u slučaju kada je granična površina bila ravna, proces refleksije ovisi o odnosu veličina neravnina i valne dužine zvuka. Kada su neravnine po svojim veličinama manje od

valne duljine, val ih pri refleksiji "ne primjećuje", što znači da se refleksija tada odvija na način kao u slučaju potpuno ravne površine. Međutim, kada su neravnine svojom veličinom usporedive sa valnom duljinom, pri refleksiji dolazi do raspršivanja zvučne energije po pravcima, odnosno dolazi do takozvane difuzne refleksije. U takvim okolnostima jedan dio reflektirane energije kreće se po geometrijskim pravilima u pravcu određenim upadnim kutom, a ostatak zvučne energije usmjerava se na sve strane. Pogođena zona djeluje kao novi izvor zvuka koji s nekim usmjerenjem zrači u poluprostor.



Slika 20. Refleksija od neravne površine: a - kada su neravnine mnogo manje od valne duljine, b - kada su neravnine po dimenziji usporedive sa valnom duljinom

Pri difuznoj refleksiji dolazi do podjele energije upadnog vala. Jedan dio energije reflektira se po geometrijskom zakonu, a ostatak se rasprši u svim smjerovima. Postotak upadne energije koja se pri refleksiji rasprši ovisi o odnosu strukture reljefne površine, njegove dubine i geometrijske forme te valne dužine. Difuzne refleksije se modeliraju uvodeći veličinu koja se naziva koeficijent difuznosti refleksija g . Taj koeficijent ima vrijednost u intervalu od 0 do 1 i definira dio upadnog vala koji se reflektira difuzno. Kada je $g = 0$, nema raspršivanja, već se sva energija reflektira pravilno geometrijski u jednom pravcu. Kada je $g = 1$ pri refleksiji se sva reflektirana energija raspršiva.



Slika 21. Prikaz difuzne refleksije sa raspršivanjem dijela reflektirane energije

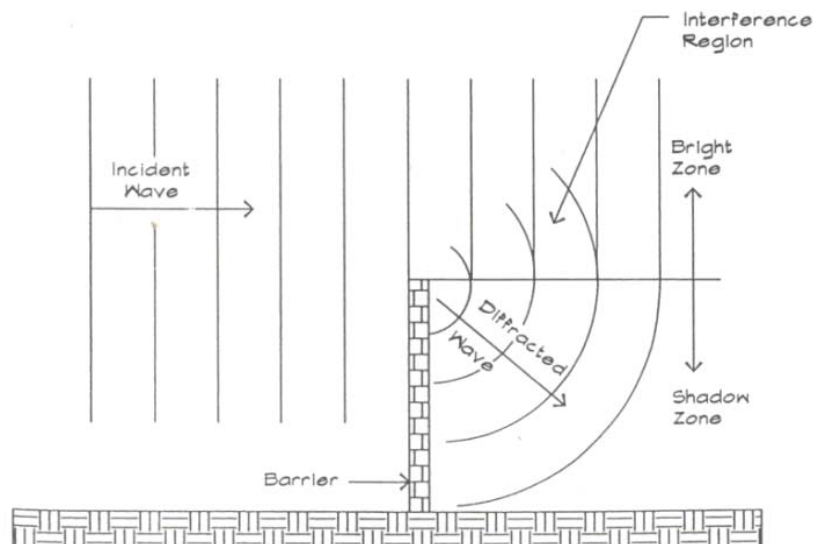
Ako se zvuk pri svom širenju kroz medij susretne s nekom preprekom, najčešće je to granica dva medija; nastaju različite pojave koje ovise o valnoj duljini zvučnog vala, veličinama

prepreke ili fizikalnim svojstvima susjednog medija. Na granici dva medija dolazi do pojave koja se zove refleksija. Ovisno o odnosu veličine λ i veličina prepreke razlikuju se :

- *geometrijska refleksija* - dimenzije prepreke su mnogo veće, odnosno površinska hrapavost manja od veličine λ te se refleksija ostvaruje po zakonu optike $\alpha = \alpha'$ (kut odbijanja jednak je kutu upada)
- *difuzna refleksija* – površinska hrapavost je veća od λ , zvučni valovi se reflektiraju u svim mogućim smjerovima.

3.6.2. Difrakcija

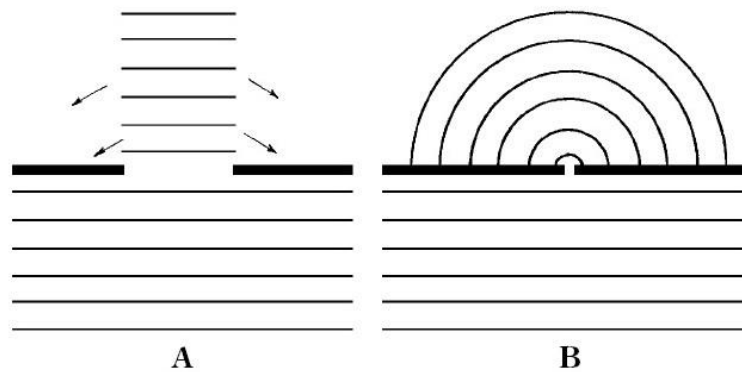
Difrakcija je promjena smjera zvučnog vala pri prolasku kroz otvor ili oko prepreke te je ovisna o valnoj duljini. Karakteristična je za sve valne pojave, pa i za zvuk. Zahvaljujući difrakciji dio energije vala dopire iza prepreke, u zonu koja se naziva "zvučna sjena", iako tu ne postoji optička vidljivosti sa izvorom vala. Difrakcija se objašnjava na način da rubni dio prepreke pogođen valom postaje novi zvučni izvor, koji zrači u okolni prostor pa i u prostor iza prepreke. Polje u zoni iza prepreke, rezultanta je superponiranja zračenja svih rubova prepreke koje su pogođene dolazećim valom. U takvim okolnostima u zvučnoj sjeni razina zvuka je niža nego što bi bilo da prepreke nema. Razina zvuka u zoni sjene funkcija je geometrijskih parametara prepreke i valne dužine zvuka. U slučaju λ manje od dužine prepreke ili veličine otvora difrakcija se ne pojavljuje.



Slika 22. Prikaz pojave difrakcije

Difrakcija je veća što je veći omjer valne duljine prema dimenzijama pregrade, a što je veća difrakcija to je veće i prigušenje. Prilikom prolaza kroz otvore koji su puno veći od valne

duljine zvučnog vala, dio vala udara prepreku i reflektira se, dok ostatak bez velikih gubitaka prolazi kroz veliki otvor i predstavlja smanjeni novi izvor. Ti se valovi dalje šire kao iz manjeg linijskog izvora koji raspršuje zvuk i u područje u „zoni sjene“ što je prikazano strelicama na slici 23 . U slučaju kad je otvor malen u usporedbi sa duljinom zvučnog vala, zvuk koji prođe na drugu stranu predstavlja mali točkasti izvor koji raspršuje zvuk u polukrug.



Slika 23. Prolaz zvuka kroz veliki i mali otvor

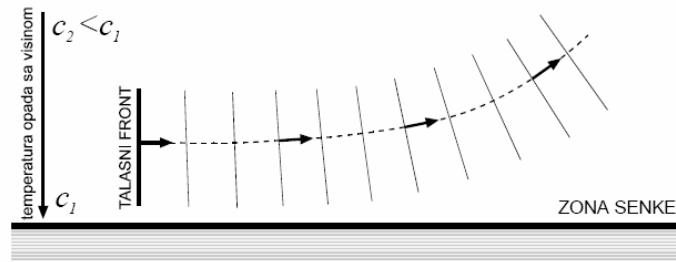
3.6.3. Refrakcija

Refrakcija je pojava savijanja valne fronte, odnosno pojava kada val pri svom širenju odstupa od pravolinijskog kretanja. Refrakcija nastaje kada postoji nehomogenost sredine kroz koju se val prostire, pri čemu nehomogenost podrazumijeva pojavu različitih brzina prostiranja zvuka po zapremini medija. Razlika u brzinama prostiranja zvuka u prostoru može nastati uslijed pojave gradijenta temperature po visini od tla ili pri pojavi vjetra. U zraku gradijent temperature po visini posebno je izražen ujutro i navečer, jer je tada najveća razlika u temperaturama tla i zraka. Kada temperatura opada sa visinom, a to znači da sa visinom opada i brzina zvuka, valna fronta pri zemlji kreće se brže od valnog fronta u visini, zbog čega se javlja skretanje vala naviše. Pri refrakciji u kojoj valna fronta skreće naviše na izvjesnom rastojanju od izvora pojavljuje se takozvana “zvučna sjena”. Tako se naziva zona u koju zvuk ne dopijeva, jer val skreće u vis. Pri ovakvoj refrakciji zvuk se ne može čuti na udaljenostima koje su veće od granice sjene, bez obzira na snagu izvora i sve druge njegove osobine.

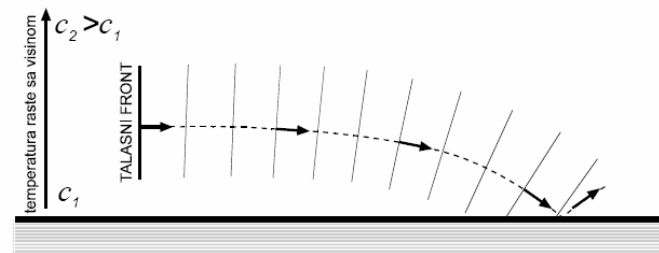
Veličina promjene smjera ovisi o odnosu brzina širenja zvuka u pojedinom mediju, tj. o Snellovom zakonu koji glasi:

$$\sin \alpha : \sin \beta = c_1 : c_2$$

gdje je α kut upadne zrake, β kut izlazne, c_1 brzina širenja zvuka u prvom mediju, a c_2 brzina širenja zvuka u drugom mediju

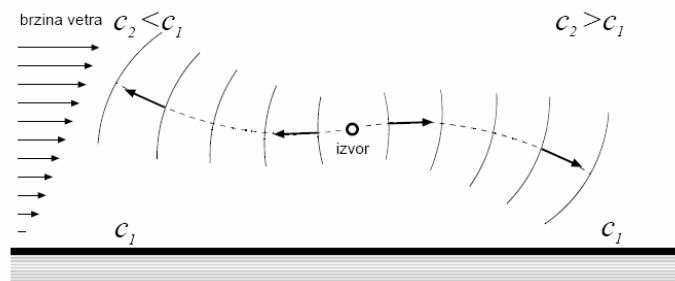


Slika 24. Refrakcija uslijed negativnog gradijenta temperature



Slika 25. Refrakcija uslijed pozitivnog gradijenta temperature

Kretanjem zračne mase uz prisustvo vjetra, brzina prostiranja zvučnog vala je rezultat brzine kretanja zraka i brzine prostiranja zvuka. Zbog prepreka na tlu i viskoznosti zraka uobičajeno je postojanje gradijentne brzine vjetra, pri čemu je uvijek brzina kretanja zračne mase u vjetru najmanja pri zemlji, a sa visinom raste. Iako je brzina zvuka znatno veća od uobičajenih brzina kretanja zraka kada puše vjetar, varijacije rezultantne brzine prostiranja zvučnog vala po visini mogu dovesti do pojave savijanja njegove putanje. Pri kretanju zvuka niz vjetar, javlja se savijanje valne fronte prema tlu, jer je brzina kretanja valne fronte na visini veća od brzine pri tlu. U smjeru nasuprot vjetru, valna fronta se savija naviše, jer je brzina širenja pri tlu veća nego u visini.



Slika 26. Refrakcija pri nailasku vjetra

3.7. Utjecaj atmosferskih prilika na širenje zvuka

Širenje zvuka u otvorenom prostoru promatra se kao model izvor-put-prijemnik, gdje izvor opisuje razina zvuka i usmjerenost, dok je put karakteriziran sa raznim mehanizmima prigušivanja kao što su udaljenosti i barijere. Prijemnik je lokacija gdje se razina zvuka mjeri ili gdje treba ispuniti određeni kriterij. Kako se izvor udaljava od prijemnika, sve više mehanizama prigušenja dolazi do izražaja. Na velikim udaljenostima u prvi plan dolaze utjecaji okoline kao što su prigušenje tla, smjer vjetra i temperatura. Osnovni akustički pokazatelji atmosfere su brzina širenja zvuka i jakost (slabljenje) zvuka. Dok je brzina širenja zvuka određena prevaljenim putem zvučnog signala u jedinici vremena, jakost zvuka određena je količinom energije koju zvučni val prenese u jedinici vremena na jedinicu površine okomite na smjer njegova prostiranja. Brzina zvuka (c) u nepokretnoj istorodnoj zračnoj masi prema Laplaceovoj jednadžbi ovisi o gustoći zraka, tlaku i odnosu specifičnih toplina (pri konstantnom tlaku i konstantnom volumenu). U pojednostavljenom obliku za suhi zrak ta jednadžba glasi:

$$c = 20,1 \cdot \sqrt{T}$$

gdje je T - apsolutna temperatura zraka. Ako je npr. $t = 0^\circ\text{C}$ ($T = 273 \text{ K}$), tada je $c = 331.8 \text{ m/s}$. Približna brzina zvuka pri vlažnom zraku, ako se zanemari utjecaj rastezljivosti vodene pare, može se računati formulom: $c = 331 + 0,6 t + 0,07 e$. Pri rasponu temperature od -20°C do $+30^\circ\text{C}$ greška u brzini zvuka nije veća od $\pm 0,5 \text{ m/s}$. Brzina zvuka raste niz vjetar, a pada prema vjetru. S visinom se mijenja temperatura zraka, tlak zraka i elastičnost vodene pare, što utječe na brzinu zvuka. Ako temperatura pravilno pada s visinom, tada i brzina zvuka pada s visinom. Na ograničenom prostoru najveća promjena elemenata od kojih zavisi brzina zvuka bit će po vertikali, pa će se i brzina zvuka najjače mijenjati u tom pravcu. Utjecaj vertikalne podjele brzine zvuka na zvučne zrake promatra se jednako kao i pri širenju svjetlosnih zraka.

3.7.1. Prigušenje zraka

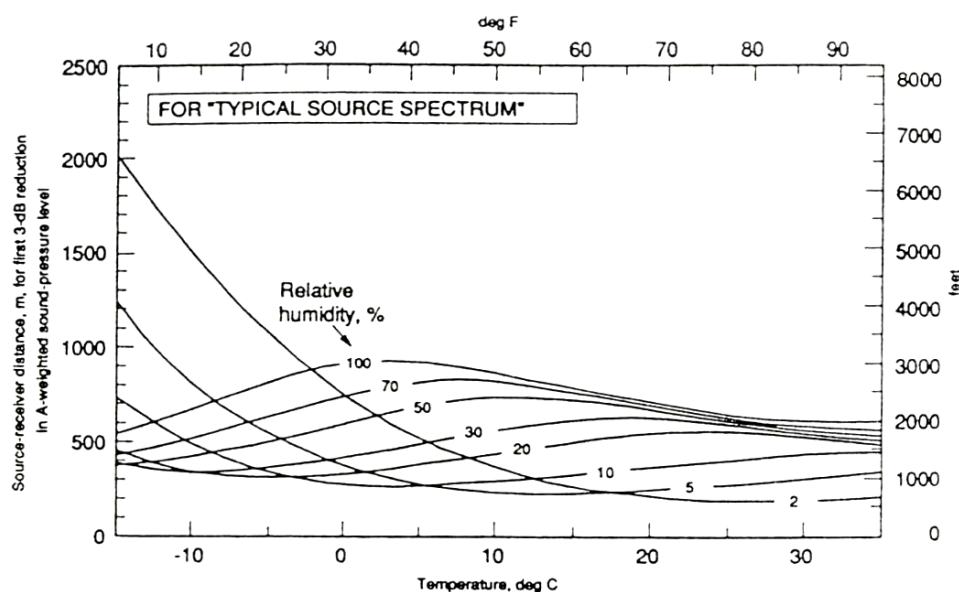
Prigušenje zraka je pojava prigušenja zvuka dok prolazi kroz zrak. Prigušenje je uvijek prisutno te ovisi o vlažnosti, temperaturi i atmosferskom tlaku. Promjene tih parametara su česte no na sreću prigušenje zraka je relativno malo, posebno na visokim frekvencijama koje

utječu na širenje zvuka. U tablici 8. prikazane su izračunate vrijednosti stupnja apsorpcije m u ovisnosti o vlažnosti i temperaturi

Tablica 8. Izračunate vrijednosti stupnja apsorpcije m u ovisnosti o vlažnosti i temperaturi

Relativna vlažnost (%)	Temperatura (°C)	m (dB na 1000 metara)						
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
25	15	0,2	0,6	1,3	2,4	5,9	19,3	66,9
	20	0,2	0,6	1,5	2,6	5,4	15,5	53,7
	25	0,2	0,6	1,6	3,1	5,6	13,5	43,6
	30	0,1	0,5	1,7	3,7	6,5	13,0	37,0
50	15	0,1	0,4	1,2	2,4	4,3	10,3	33,2
	20	0,1	0,4	1,2	2,8	5,0	10,0	28,1
	25	0,1	0,3	1,2	3,2	6,2	10,8	25,6
	30	0,1	0,3	1,1	3,4	7,4	12,8	25,4
75	15	0,1	0,3	1,0	2,4	4,5	8,7	23,7
	20	0,1	0,3	0,9	2,7	5,5	9,6	22,0
	25	0,1	0,2	0,9	2,8	6,5	11,5	22,4
	30	0,1	0,2	0,8	2,7	7,4	14,2	24,0

Na slici 27. vidi se udaljenost koja je potrebna da između izvora i prijemnika razina zvuka tipičnog spektra padne za 3 dB zbog prigušenja zraka, u ovisnosti o vlazi i temperaturi. Nakon prvih 3 dB prigušenja zraka, razina zvuka pada sporije zato što se energija visokih frekvencija već istrošila iz spektra.

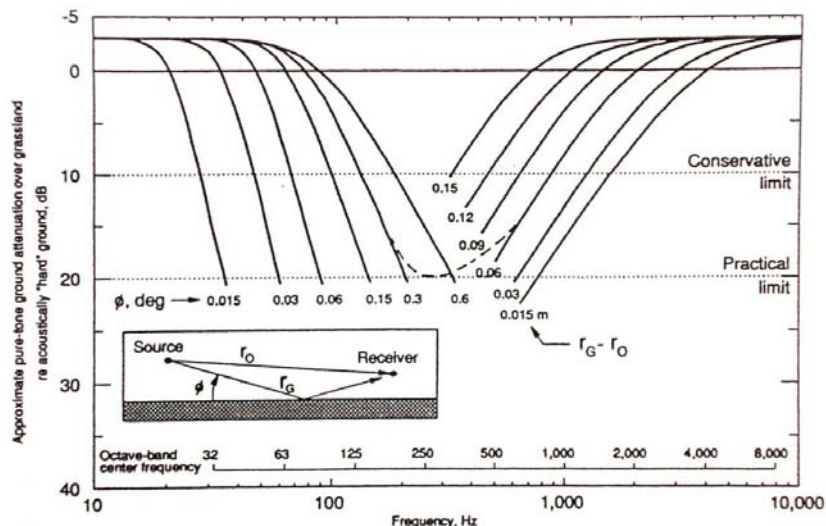


Slika 27. Udaljenost potrebna za pad od 3 dB u ovisnosti o temperaturi i vlažnosti

3.7.2 Prigušenje tla

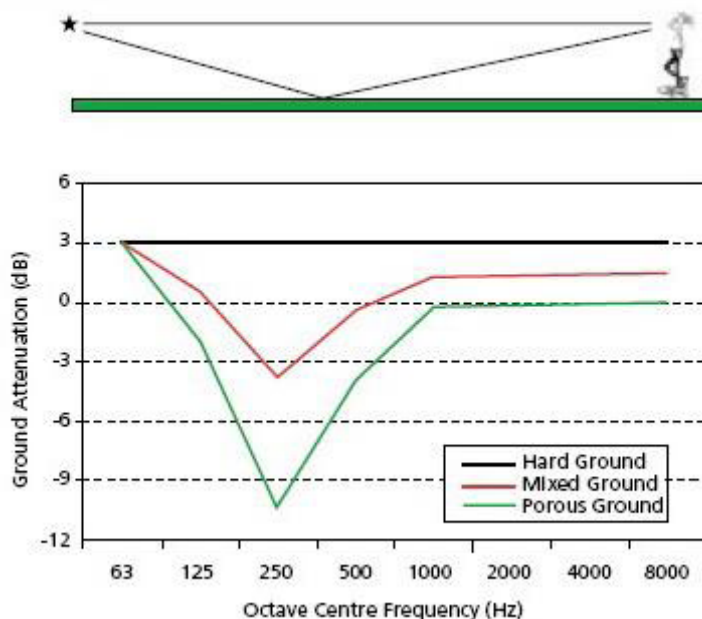
Prigušenje tla je pojava koja se događa kada se zvučni val, putujući od izvora prema prijemniku, pod malim kutom odbije od tla. Putujući od izvora prema prijemniku, zvuk se može reflektirati od tla kao što je prikazano na slici 28. Ako se odbijena zraka pomiješa sa

direktnom, nereflektiranom zrakom, može prouzročiti pojačanje ili prigušenje zvuka, ovisno o fazama zraka. Ako su zraka 180° van faze prigušenje je 20 dB do 30 dB. To se najčešće događa kada zvuk prelazi preko akustički „mekanog“ materijala kao visoke trave, obrađene zemlje i snijega. Pri odbijanju od tvrdih podloga, zrake su u fazi i pojačanje je oko 6 dB.



Slika 28. Prigušenje preko mekog tla u ovisnosti o kutu upada

Prigušenje tla je moguće samo kod malih upada, manjih od 5° . Kako se kut povećava tlo sve više reflektira zvuk. Zvuk je najprigušeniji blizu tla, pa u slučaju da su izvor i prijemnik blizu tla, nalaze se u području koje se naziva „zvučna sjena“. Na slici 29. prikazano je prigušenje u ovisnosti o strukturi i tvrdoći tla. Može se primijetiti da kod tvrdog tla uopće nema prigušenja, a kod mekšeg i poroznijeg tla prigušenje raste.



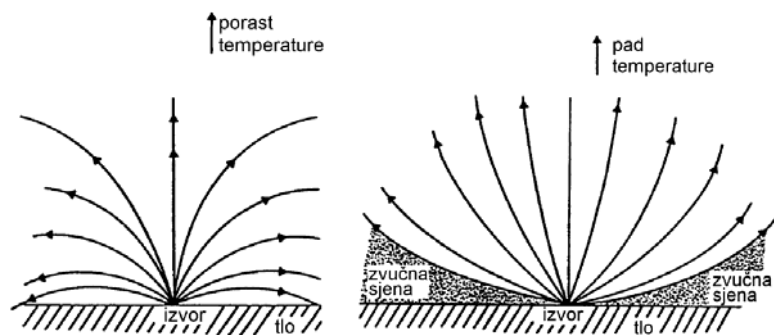
Slika 29. Prigušenje u ovisnosti o strukturi tla

Površine tla mogu se grupirati prema njihovim akustičkim svojstvima:

1. Tvrdo tlo: beton, asfalt, voda, led, stijene, natučena zemlja
2. Meko tlo: trava, obrađena zemlja, gusta vegetacija, snijeg
3. Miješano tlo: mješavina mekog i tvrdog tla

3.7.3. Relativna vlaga i temperatura

Zvuk se širi kroz atmosferu zahvaljujući titranju molekula koje pobuđene na titranje apsorbiraju dio zvučne energije i pretvaraju je u toplinu. Iako znatan, utjecaj temperature nije jednostavno objašnjiv, jer ona utječe i na relativnu vlagu. Ukupno gušenje uzrokovano relativnom vlagom i temperaturom ovisi o frekvenciji: s porastom frekvencije raste i gušenje. Kako bi se moglo odrediti ukupno gušenje za širokopolasne zvučne pojave, poput buke zrakoplova, ono se mora određivati za dijelove spektra. Brzina zvuka ovisi i o temperaturi i o brzini vjetera. Budući da je brzina ovisna o drugom korijenu apsolutne temperature, kada se temperatura smanji sa visinom, zrake zvuka se uvijaju prema gore u svim smjerovima. Ako se dogodi obrnuta situacija, da temperature zraka raste sa visinom, zrake zvuka se uvijaju prema dolje u svim smjerovima.



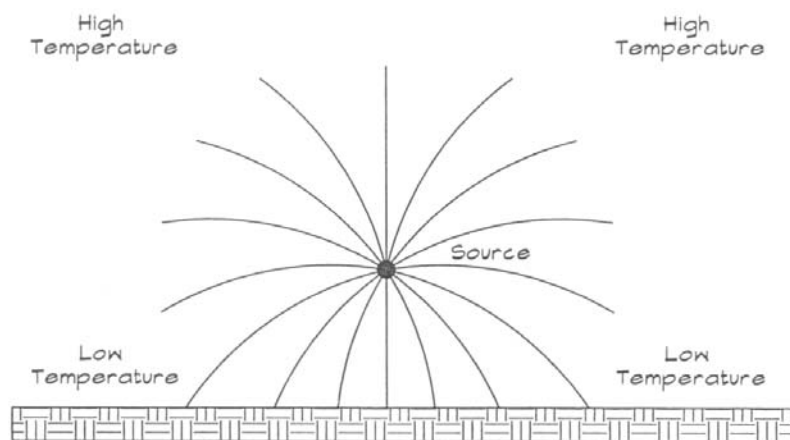
Slika 30. Prikaz utjecaja temperature na rasprostiranje zvuka

3.7.4. Tlak

Utjecaj atmosferskog tlaka na gušenje zvuka prikazuje se putem veličine C krivulje. Pri konstantnoj temperaturi gušenje raste s porastom tlaka, ali su apsolutni iznosi promjena relativno mali.

3.7.5. Vjetar

Put koji prijeđe zvučni val šireći se kroz medij kao što je zrak je onaj kojim treba najmanje vremena da zvuk stigne od izvora do prijemnika. Kako brzina zvuka ovisi o temperaturi i o brzini gibanja medija, put najmanjeg vremena se ne poklapa uvijek sa putem najmanje udaljenosti. Ako se sam zrak giba njegova brzina se vektorski dodaje brzini širenja zvuka kako bi se dobila ukupna brzina zvuka. Ove promjene mogu utjecati na put kojim se kreću zrake zvuka i na razinu zvuka kod prijemnika. Kada vjetar puše uz tlo njegova brzina se povećava sa visinom. Ako se zvučni val širi niz vjetar, gornji dio vala je na najvećoj visini, kretat će se većom brzinom od donjnjeg dijela. Zvuk koji se širi niz vjetar može se kretati duž puta na kojem prigušenje tla pa čak ni barijere nemaju utjecaja. Kada se zvučni val kreće uz vjetar, gornji dio vala je usporen većom brzinom pa se put širenja uvija prema gore. Ako zvuk dolazi iz izvora koji je na određenoj visini iznad tla, put zvuka će biti zaobljen i samo će dodirivati tlo. Iza točke dodira ostat će područje u „zvučnoj sjeni“ gdje teoretski ne dopire zvuk, ali u praksi u tom području može biti više od 20 dB. Vjetar na nižim visinama može povećati zvuk za par dB, ovisno o brzini vjetra, no mjerenje buke vjetra u višim visinama ili bočnoga vjetra može se povećati i preko 20 dB, ovisno o njegovoj brzini i udaljenosti.



Slika 31. Utjecaj temperature na širenje zvuka

3.7.6. Padaline, magla i dim

Često atmosfera nije samo smjesa plinova i sitnih čestica vode, već se zbog padalina u njoj nađu i relativno krupne čestice vode u obliku ledenih kristala, kapljica ili komadića leda. Te se čestice čije su veličina i gustoća sasvim stohastičkog karaktera ne gibaju pod djelovanjem zvučnog polja kao ostale čestice zraka. Zbog toga se javlja dodatno gušenje koje je jedino

moгуće mjeriti u konkretnim slučajevima. Najčešće se mjerenja u takvim meteorološkim uvjetima ne obavljaju. Kod magle i dima gušenje također ovisi o veličini i gustoći čestica.

3.8. Akustične veličine karakteristične za mjerenje buke zrakoplova

Za proces mjerenja buke potrebno je poznavati nekoliko ključnih pojmova i veličina koje se koriste za opisivanje buke koju proizvode zrakoplovi, a to su:

- A-vrednovana razina buke
- D-vrednovana razina buke
- maksimalna razina buke
- razina izloženosti jednog događaja buke
- ekvivalentna razina zvuka
- ekvivalentna razina buke u zajednici

3.8.1 A - vrednovana razina buke

Važna karakteristika zvuka je njegova frekvencija, ili "pitch". To je omjer ponavljanja oscilacija tlaka zvuka kako dopiru do naših ušiju. Analizirajući ukupnu buku bilo kojeg izvora, akustičari često raščlanjuju buku na frekvencijske pojaseve ili "bands" kako bi utvrdili kolika je nisko-frekventna buka, buka srednje frekvencije te visoko-frekventna buka. Ta podjela važna je iz dva razloga:

1. Ljudi reagiraju različito na buku niske, srednje i visoke frekvencije. To je stoga što naše uho bolje čuje srednje i visoke frekvencije, ali je potpuno neosjetljivo na one niže. Zbog toga nas više smeta buka srednje i visoke frekvencije.
2. Tehnička rješenja problema buke su različita za različite raspone frekvencije. Buku niske frekvencije je općenito teže kontrolirati.

Ljudi su najviše osjetljivi na zvuk kad je prevladavajuća frekvencija u rasponu normalnog razgovora, obično oko 1.000 do 2.000 Hz. Psihoakustičari su razvili nekoliko filtara koji ugrubo odgovaraju ovoj osjetljivosti našeg uha i tako pomažu u ocjenjivanju relativne jačine raznih zvukova koji se sastoje od mnogo različitih frekvencija. Takozvana A-vrednovana

krivulja to čini najbolje za većinu izvora okolišne buke. Razine tlaka zvuka mjerene kroz ovaj filter zovu se A-vrednovane razine zvuka (mjerene u A-vrednovanim decibelima, A-weighted decibel ili dBA). A-vrednovani filter značajno smanjuje one dijelove ukupne buke koji se pojavljuju na nižim frekvencijama (ispod približno 500 Hz) i također kod vrlo visokih frekvencija (iznad 10.000 Hz) koje slabije čujemo. Filter ima vrlo mali učinak, ili je gotovo „ravna“ u sredini raspona frekvencija između 500 i 10.000 Hz gdje je naš sluh najosjetljiviji. Budući da se ovaj filter općenito poklapa s osjetljivošću naših ušiju, zvukovi koji imaju više A-vrednovane razine zvuka ocjenjuju se glasnijim nego oni s nižim A-vrednovanim razinama zvuka, odnos koji inače možda ne bi bio istinit. To je razlog zbog kojeg se A-vrednovane razine zvuka obično koriste za procjenu glasnoće izvora okolišne buke.

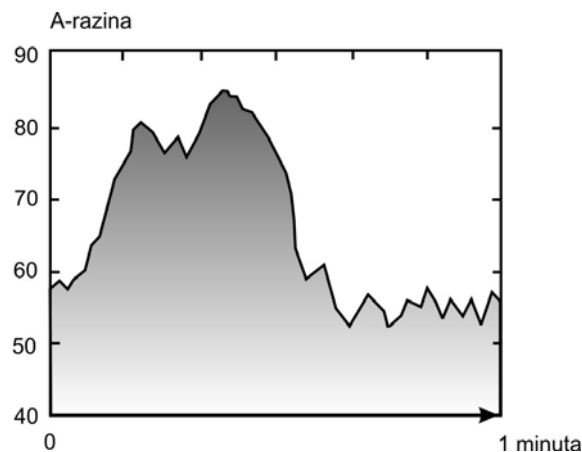
3.8.2 D-vrednovani Decibel, dBA

D-vrednovana razina zvučnoga tlaka ili D-razina je razina zvučnoga tlaka koja je frekvencijski filtrirana tako da reducira utjecaj niske frekvencije i prepoznaje smetnje na visokim frekvencijama. D-razina se mjeri u decibelima, a stvorena je kao jednostavna aproksimacija PNL-a (Perceived Noise Level) u ocjenjivanju zrakoplovne buke.

3.8.3 Maksimalna razina zvuka, L_{max}

Dodatna dimenzija okolišne buke je da A-vrednovane razine variraju s vremenom. Na primjer, razina zvuka se pojačava kako se zrakoplov približava, zatim pada i uklapa se s pozadinom kako se zrakoplov udaljava (iako se i pozadina mijenja zbog zvuka vjetra ili vozila u prolazu). Zbog ove varijacije, često je prikladno opisati određeni „događaj“ zvuka njegovom maksimalnom razinom zvuka (Maximum Noise Level), skraćeno kao L_{max} . Međutim, maksimalna razina opisuje samo jednu dimenziju jednog događaja; ne daje informacije o izloženosti kumulativnoj buci koju generira neki izvor zvuka. Drugim riječima, dva događaja s identičnim maksimalnim razinama mogu proizvesti vrlo različite ukupne izloženosti. Jedan može biti vrlo kratkog trajanja, dok se drugi može nastaviti duži period i može se smatrati zvukom koji puno više smeta. Formula za izračunavanje maksimalne razine zvuka je:

$$L_{\max} = \max(L(t)|_0^T) \text{ ili u drugome obliku } L_{\max} = \max(L_i(t)|_{i=1}^n)$$

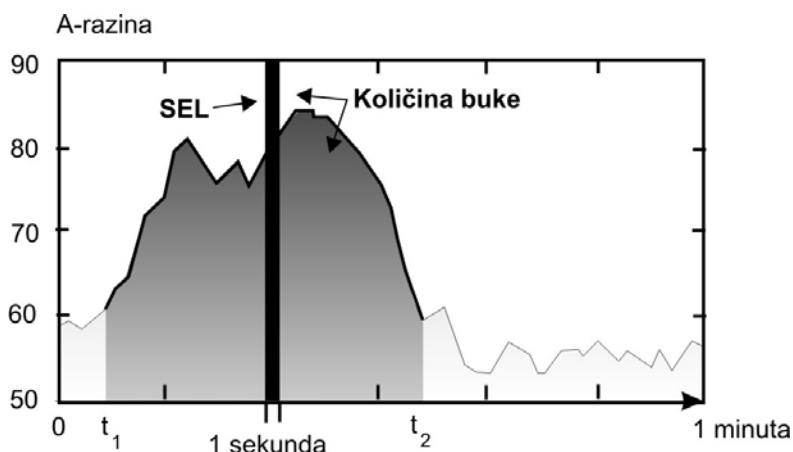


Slika 32. Varijacija A-vrednovanog zvuka kroz vrijeme

3.8.4 Razina izloženosti buci jednog događaja, SENEL/SEL

Mjera izloženosti kumulativnoj buci za jedan zrakoplov koji prelijeće je razina izloženosti buci jednog događaja, ili SENEL (Single Event Noise Exposure Level). SENEL se može smatrati akumulacijom energije zvuka za vrijeme trajanja nekog događaja, gdje je trajanje definirano kao period otkad razina A-vrednovanog zvuka prvi puta prijeđe razinu praga do kad razina zvuka padne natrag ispod praga. SENEL je sličan metrici razine izloženosti zvuka SEL. Za mjerenja SENEL-a, prag je 30 dBA ispod gornje granice SENEL-a koja ovisi o tipu zrakoplova i udaljenosti bilo od početka rulanja za polijetanje ili praga slijetanja. Za SEL se prag referira na razinu pozadinske buke. Ove dvije metrike su funkcionalno iste. Za većinu preleta aviona, SEL je u redu veličine od 7 do 12 dBA viši nego L_{\max} . Također, činjenica da je to kumulativna mjera znači ne samo da glasniji preleti imaju viši SENEL u usporedbi sa tišim, nego i preleti duljeg trajanja imaju veći SENEL u odnosu na kraće prelete. S ovom metrikom, sada postoji osnova za uspoređivanje događaja buke koja se uglavnom poklapa s našim doživljajem zvuka – što je viši SENEL, to će vjerojatno i više smetati. Osim toga, SENEL omogućava opsežan način za opis događaja koji će se koristiti u modeliranju izloženosti buci. Formula za izračunavanje razine izloženosti buke:

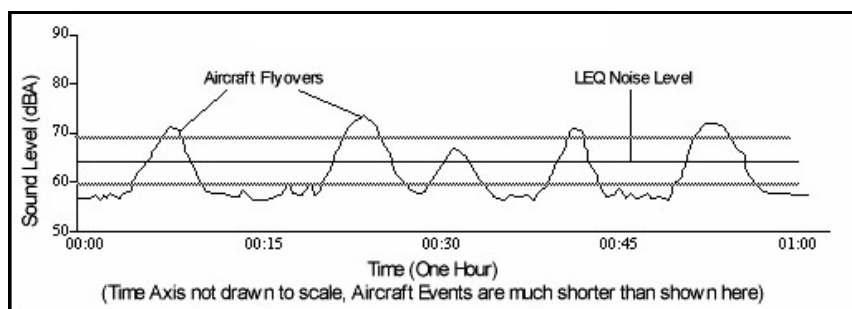
$$SEL = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$



Slika 33. Razina izloženosti jednog događaja

3.8.5 Ekvivalentna razina zvuka, L_{eq}

Ekvivalentna razina zvuka (Equivalent Sound Level), skraćeno L_{eq} , mjera je izloženosti koja rezultira iz akumulacije A-vrednovanih razina zvuka tijekom određenog perioda, na primjer, jedan sat, osmosatni školski dan, noć, ili puni 24-satni dan. Međutim, budući da duljina perioda može biti različita ovisno o vremenskom okviru od interesa, primjenjiv period uvijek treba biti identificiran ili jasno razumljiv kad se razgovara o metrici, a to se postiže tako da se dobivena akumulirana vrijednost buke podijeli s vremenskim periodom mjerenja. L_{eq} se može promatrati kao konstantna razina zvuka tijekom perioda koji sadrži toliko energije zvuka kao i stvarna razina zvuka koja se mijenja s vremenom. Ekvivalentna razina je, na neki način, ukupna energija zvuka koja se pojavila za vrijeme promatranog perioda, ali jednoliko raspoređena u tom vremenskom periodu. To je način dodjeljivanja jednog broja razini zvuka koja se mijenja s vremenom. Budući da L_{eq} obuhvaća svu energiju zvuka, na nju jako utječu glasniji događaji. Što se tiče primjene na probleme buke zračne luke, L_{eq} se često prikazuje za jednosatne periode koji slijede jedan za drugim kako bi se prikazalo kako se satna doza buke podiže i pada tijekom 24-satnog perioda te kako na neke sate značajno utječe nekoliko glasnih aviona.



Slika 34. Prikaz linije L_{eq} obzirom na kretanje zvuka

Formula za izračunavanje ekvivalentne razine zvuka

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \right) \text{ ili } L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)$$

Tablica 9. Usklađenost korištenja zemlje sa prosječnom razinom zvuka dan-noć

Namjena zemljišta	Godišnja prosječna dnevno-noćna razina zvuka (L_{eq}) u dB					
	ispod 65	65-70	70-75	75-80	80-85	Iznad 85
Stambeno područje						
Stambene kuće, zgrade	✓	✗ (1)	✗ (1)	✗	✗	✗
Stambene prikolice	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Privremena konačišta	✓	✗ (1)	✗	✗ (1)	✗	✗
Javne ustanove						
Škole	✓	✗ (1)	✗ (1)	✗	✗	✗
Bolnice	✓	x	x	✗	✗	✗
Crkve, koncertne dvorane	✓	x	x	✗	✗	✗
Državni uredi, vlada	✓	✓	x	x	✗	✗
Prijevozna sredstva	✓	✓	✓(2)	✓(3)	✓(4)	✓(4)
Parkirališta	✓	✓	✓(2)	✓(3)	✓(4)	✗
Poslovni prostori						
Uredi, poslovni prostori	✓	✓	x	x	✗	✗
Veleprodajni i maloprodajni materijali	✓	✓	✓(2)	✓(3)	✓(4)	✗
Maloprodaja – općenito	✓	✓	x	x	✗	✗
Komunalije	✓	✓	✓(2)	✓(3)	✓(4)	✗
Komunikacije	✓	✓	x	x	✗	✗
Proizvodnja						
Proizvodnja, općenito	✓	✓	✓(2)	✓(3)	✓(4)	✗
Fotografski studio	✓	✓	x	x	✗	✗
Poljoprivreda (ne uključuje stočarstvo), šumarstvo	✓	✓(6)	✓(7)	✓(8)	✓(6)	✓(8)
Stočarstvo, farme	✓	✓(6)	✓(7)	✗	✗	✗
Rudarstvo i ribarstvo	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rekreacijska područja						
Sportska igrališta na otvorenom	✓	✓(5)	✓(5)	✗	✗	✗
Pozornice za koncerte na otvorenom, amfiteatri	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Prirodni ekspanati, ZOO	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Parkovi, kampovi	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Golf igrališta, hipodromi, kupališta	✓	✓	x	x	✗	✗

Izvor: <http://www.nonoise.org/library/ane/ane.htm>

Objašnjenje pojmova u tablici

- (1) Kada zajednica odluči moraju se uvesti vanjska ili unutarnja mjerenja u naseljima ili školama kako bi se vidjela razina buke.
- (2) Mjerenje buke i smanjenje od 25 dB mora biti uključeno u projektiranje objekta
- (3) Mjerenje buke i smanjenje od 30 dB mora biti uključeno u projektiranje objekta
- (4) Mjerenje buke i smanjenje od 35 dB mora biti uključeno u projektiranje objekta
- (5) Zahtjevi za dodatne izolacije na stambenim objektima
- (6) Stambeno okruženje zahtijeva snižavanje buke od 25 dB

- (7) Stambeno okruženje zahtijeva snižavanje buke od 30 dB
- (8) Buka nije dozvoljena u stambenom okruženju
- (x) 25, 30, ili 35 = Upotreba zemljišta i njemu odgovarajućih objekata; mjere koje se postižu 25, 30, ili 35

3.8.6 Ekvivalentna razina buke u zajednici, CNEL

CNEL (Community Noise Equivalent Level) predstavlja koncept razine buke u tijeku 24-satnog perioda. Država Kalifornija je razvila CNEL i objavljene „Standarde buke“ 1970. godine. Razina se povećava kako se zrakoplov približava, doseže maksimum od 85 dBA, a zatim se smanjuje kako zrakoplov prolazi. Okolna A-vrednovana razina oko 55 dBA posljedica je pozadinskih zvukova koji dominiraju nakon što zrakoplov prođe. Važna je napomena ovdje da CNEL tretira večernju buku (19:00 - 21:59) i noćnu buku (22:00 - 6:59) različito od dnevne (7:00 - 18:59). CNEL množi svaku večernju operaciju sa 3 i svaku noćnu operaciju sa 10. Ovo vrednovanje operacija učinkovito dodaje 4.8 decibela A-vrednovanim razinama svake večernje operacije i 10.0 decibela A-vrednovanim razinama koje se javljaju noću. Ovi se dodaci tj. penali dodaju kako bi uzeli u obzir veću osjetljivost ljudi na večernju i noćnu buku. Osim toga, događaji tijekom večeri i noći često više smetaju jer su razine okolišne buke tijekom tih perioda obično niže nego kod dnevnih razina okolišne buke. CNEL metrika buke je vrlo slična metrici prosječnog zvuka razine dan-noć (DNL) koju traži FAA za ispitivanja buke zrakoplova. Razlika je da CNEL metrika primjenjuje vrednovani faktor na večernje operacije; DNL metrika tretira večernje sate isto kao i za dnevne sate. Za zračnu luku s večernjim operacijama, buka mjerena kao CNEL bit će nešto viša nego buka mjerena kao DNL. Veličine CNEL-a se obično mjere standardnom opremom za praćenje ili se predviđaju računalnim modelima. Mjerenja su praktična za dobivanje veličina CNEL za samo relativno ograničene brojeve lokacija i u nedostatku trajno instaliranih sustava za praćenje samo za relativno kratke vremenske periode. Stoga većina ispitivanja buke na zračnim lukama koristi procjene CNEL-a dobivene računalom, određene uzimanjem u obzir sve SENEL-e od pojedinačnih zrakoplovnih operacija koje obuhvaćaju ukupnu dozu buke na određenoj lokaciji na zemlji. Ovo se načelo koristi u svim modeliranjima buke zračne luke. Izračunate veličine CNEL-a obično se odabiru kao konture buke čije su linije iste izloženosti oko zračne luke (vrlo slično kao što topografske karte imaju konturne linije iste povišenosti). Konture obično odražavaju dugoročne (godišnji prosjek) uvjete rada uzimajući u obzir prosječne letove po

4. Međunarodna regulativa buke u zračnom prometu

4.1. Uvod

Početkom 1990. godine počinje intenzivno razdoblje reguliranja buke koju stvaraju zrakoplovi. ICAO donosi rezoluciju 1990. godine kojom se predviđa povlačenje iz uporabe svih zrakoplova svrstanih u kategoriju 2. Američki kongres 1990. također donosi rezoluciju o bučnosti zrakoplova pod nazivom „The Airport Noise and Capacity Act od 1990“. Nakon prihvaćanja ovih rezolucija, one su postale smjernica za smanjenje buke zrakoplova u svijetu. Kako bi se spriječio ekonomski udar, primjena ovih rezolucija trebala je biti provedena u periodu od deset godina. Restrikcija na bučne zrakoplove započela je 1. travnja 1995. godine. Restrikcije su se provodile kroz „clean-up“ račune, naplatu kaznenih taksi te ukoliko je bilo potrebno i zabranom leta.

4.2. Primjena međunarodnih regulativa u svrhu smanjenja buke

Zrakoplovne kompanije u Europskoj uniji trebaju se pridržavati direktiva EU, a one su slijedeće:

- povlačenje iz prometa zrakoplova kategorije 2 starijih od 25 godina u razdoblju od travnja 1995. – travnja 2002. godine, pri čemu ukupan broj takvih zrakoplova u floti ne smije prijeći 10% temeljne flote kompanije u bilo kojoj godini
- zamjena zrakoplova kategorije 2 mlađih od 25 godina, uključujući i širokotrupne zrakoplove, trebala bi biti završena do travnja 2002. godine.
- zamjena zrakoplova kategorije 2 koji pripadaju zrakoplovnim kompanijama u zemljama u razvoju mogu biti zamijenjeni i nakon 2002. godine ako ih one prilagode normama važećim za kategoriju 3.

Pristupi u pronalasku rješenja i prilagodbu flote su različiti. Američki prijevoznici odlučuju se za nabavu i ugradnju kompleta za utišavanje postojećih zrakoplova, dok se europski prijevoznici odlučuju za zamjenu flote. Troškovi modifikacije, tj. ugradnja sustava za utišavanje zrakoplova „hush kit“ iznose od 2,4 do 3,6 milijuna američkih dolara. Razlozi za hitnu promjenu flote i postavljanje sustava za utišavanje zrakoplova su slijedeći:

- zrakoplovima kategorije 2 u Europi naplaćuju se i do 300% veće pristojbe za slijetanje
- u Europi se prijevoznicima sa modificiranom flotom nameću kaznene pristojbe i do 30% veće u usporedbi sa zrakoplovima nove generacije, a postoji i mogućnost zabrane noćnoga leta
- različitost pristupa američkih i europskih prijevoznika proizlazi iz činjenice da je većina europskih prijevoznika izravno ili posredno subvencionirana državnim sredstvima.
- američki se prijevoznici odlučuju na modifikaciju postojeće flote zbog mogućnosti financiranja i ugradnje sustava za utišavanje na više stotina zrakoplova

Politikom reguliranja buke u zračnom prometu posebno su prilagođene zrakoplovne kompanije u Africi, Latinskoj Americi i Istočnoj Europi budući da sadašnju flotu uglavnom čine zrakoplovi 2 kategorije, a ponegdje i zrakoplovi 1 kategorije. One nisu u stanju izdvojiti potrebna sredstva za kupnju nove flote koja ne bi imala restrikcije, ali istovremeno moraju plaćati penale za svaki let u zemlje u kojima su na snazi propisi o buci.

4.3. ICAO - Annex 16

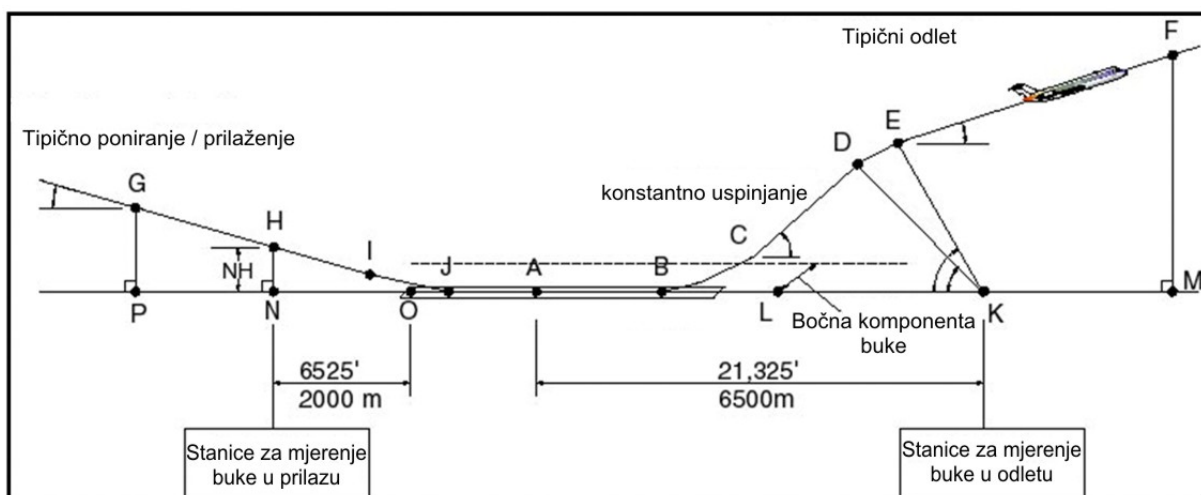
Annex 16, ili na hrvatskom jeziku “dodatak 16“, sastoji se od standarda i preporuka za područje buke zrakoplova, a usvojeno je 2. ožujka 1971. godine prema odredbi članka 37. Međunarodne konvencije civilnog zrakoplovstva. „Dodatak 16“ sadrži regulative vezane za buku zrakoplova u blizini zračne luke. Unutar istog definirane su i metode mjerenja buke zrakoplova kao i dozvoljene granice buke za sve tipove zrakoplova i helikoptera, izrađeni su modeli za certifikaciju zrakoplova prema buci te dane smjernice za operacije polijetanja i slijetanja s obzirom na redukciju buke. Radi lakšega razumijevanja, „dodatak 16“ je uz engleski preveden na francuski, ruski i španjolski jezik. „Dodatak 16“ izrađen je prema ISO standardima i sve mjerne jedinice unutar njega su u SI sustavu.

4.4. FAR 36

FAA (Federal Aviation Administration) izdao je pravilnike o buci sastavljene u više dijelova koji se nazivaju FAR (Federal Aviations Regulations). Jedan od FAR dijelova je FAR 36 koji postavlja standarde buke koji zrakoplov mora zadovoljavati kako bi dobio dozvolu tipa i plovidbenosti. Prvi puta je 1969. godine proveden za civilne podzvučne turbomlazne i velike elisne zrakoplove, a vlada je kasnije dodala propise za nadzvučne zrakoplove i to male elisne i rotorske zrakoplove. FAR 36 također propisuje procedure za proizvođače i ostale za korištenje u mjerenju zrakoplovne buke za potrebe odobrenja. 1977. godine dolazi do klasifikacije zrakoplova u tri kategorije:

- kategorija 1 – zrakoplovi su letjeli prije usvajanja propisa i nisu nikad zadovoljavali ograničenja iako su prva izdana,
- kategorija 2 – zrakoplov odgovara originalnim ograničenjima emisija buke, ali ne i promjenjivim (1977 g.) ograničenjima,
- kategorija 3 – zrakoplovi su noviji, tiši tipovi koji moraju odgovarati primijenjenim ograničenjima.

Svi zrakoplovi koji proizvode buku moraju zadovoljiti standarde buke FAR 36, pri čemu prolaze kroz proces certifikacije zrakoplova na principu mjerenja njihove buke u operacijama polijetanja i slijetanja na mjernim točkama (prikazanim na slici).³



Slika 35. Točke za mjerenje buke u svrhu certifikacije zrakoplova

³ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

Tablica 10. Identifikacija pojedinih pozicija u prilazu i odletu

Pozicija	Opis
A	Početak rulanja za polijetanje
B	Odvajanje od uzletno sletne staze
C	Početak prvoga dijela kontinuiranog penjanja
D	Početak redukcije potiska
E	Početak drugoga dijela kontinuiranog penjanja
Ec	Početak drugoga dijela kontinuiranog penjanja i korekcija putanje
F	Visina na kojoj završava mjerenje buke
Fc	Završetak drugoga dijela kontinuiranog penjanja i korekcija putanje
G	Početak praćenja buke u prilazu – pravilna putanja
Gr	Početak praćenja buke u prilazu – alternativna putanja
H	Pozicija zrakoplova točno iznad mjerne stanice
I	Početak snižavanja visine
Ir	Početak snižavanja visine u referentnom prilazu
J	Dodir uzletno sletne staze
K	Mjerna stanica za polijetanje
L	Lateralna mjerna stanica (nije na USS-i)
M	Kraj certifikacije buke zrakoplova
N	Mjerna stanica na prilazu
O	Prag prilaznom kraju USS-e
P	Početak certifikacije buke zrakoplova

Veličina buke varira ovisno o težini zrakoplova i maksimalnom efektivnom zapažanju buke. Svi manji zrakoplovi, osim poljoprivrednih i vatrogasnih, također moraju zadovoljiti propise buke FAR 36, a ti su nivoi specificirani na preletu zrakoplova iznad mjerne stanice (mikrofona) na visini od 1000 ft. Od 1. siječnja 1980. godine, svi mali zrakoplovi koji prije nisu letjeli moraju zadovoljiti nivo buke FAR 36 kako bi dobili dozvolu za let.

4.5. FAR 91

FAR 91 ograničava operacije civilnih zrakoplova u SAD-u te se temelji na FAR-u 36. Elementi buke FAR 91 prvi su put prihvaćeni 1977. godine. Ovaj pravilnik ograničava operacije civilnih podzvučnih turbo-mlaznih zrakoplova s maksimalnom težinom većom od 75000 lb. Godine 1990. savezna vlada je prihvatila Akt o aerodromskoj buci i kapacitetu, čime se razvijaju propisi za primjenu te politike. Tu se zahtijeva potpuno ukidanje kategorije 2 u civilnim podzvučnim turbomlaznim zrakoplovima, iz čega proizlazi da će samo kategorija 3 biti operativna u bližoj budućnosti. Svojim rasporedom FAR 91 zahtijeva da korisnici zrakoplova uklone 25% kategorije 2 do kraja 1994, 50% do 1996, 75% do 1998. te da

alternativno uvode zrakoplove kategorije 3.⁴ Također se njime propisuje da završni položaj postavljanja zakrilca pri slijetanju kod teških zrakoplova ne smije prelaziti minimalnu propisanu konfiguraciju zakrilca za slijetanje. Ovo se odnosi na pilota koji upravlja svim civilnim turboblaznim zrakoplovima. Odstupanje od ove procedure dozvoljeno je pilotu jedino u situaciji kada je let ugrožen.

4.6. Direktiva Europske unije - 2002/49/EC

Europski je parlament 10. lipnja 1997. predložio da se provedu određene mjere i inicijative za smanjenje negativnog utjecaja buke na okoliš. Primijećen je manjak pouzdanih podataka koji se odnose na razne izvore buke. Europska je komisija 1. prosinca 1999. odredila indikatore buke i metodologiju mjerenja buke u zoni zračne luke. Ti indikatori buke su L_{den} , koji prikazuje iritaciju izazvanu bukom i L_{night} koji prikazuje poremećaje sna izazvane bukom.

Jedna od direktiva koje je predložila Europska unija jest Direktiva 2002/49/EC Europskog parlamenta i Vijeća koja stupa na snagu 25. lipnja 2002. godine. Navedena direktiva se prema svom sadržaju odnosi na procjene i upravljanje bukom. Ciljevi ove direktive su: određivanje jedinstvenog pristupa s namjerom da se izbjegnju, spriječe ili smanje štetni utjecaji, uključujući i uznemiravanje zbog izloženosti buci u okolišu; osiguravanje osnove za razvoj mjera Zajednice u svrhu smanjenja buke emitirane iz značajnijih izvora kao i zrakoplova, na osnovu kojih će Komisija Europskom parlamentu i Vijeću predati određene zakonske prijedloge najkasnije do 18. lipnja 2006. godine. Ova se direktiva odnosi na buku u okolišu kojoj su izloženi ljudi posebno u izgrađenim područjima, javnim parkovima i drugim mirnim dijelovima gradskih područja, u mirno naseljenim područjima, u blizini škola, bolnica i drugih područja osjetljivih na buku a ne odnositi se na buku koju je uzrokovala sama izložena osoba, buku nastala radovima u domaćinstvu, buku na radnom mjestu, unutar prijevoznih sredstava te buku uzrokovanu vojnim djelovanjem na vojnim područjima. Unutar nje određuje se odgovorna nadležna vlast za provedbu ove direktive te se uključuju i tijela za izradu i odobrenje karte s ucrtanom bukom te planova djelovanja za gradska područja, kao i za aerodrome; sakupljanje karata s ucrtanom bukom i planova djelovanja. Isto tako određuju se i pokazatelji i njihova primjena, metode procjene, strateško ucrtavanje buke u karte, planovi djelovanja te informiranje javnosti.

⁴ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

Prema toj Direktivi EU definirani su slijedeći pojmovi:

- *Negativan utjecaj buke na okoliš* – odnosi se na neželjene ili štetne vanjske zvukove uzrokovane ljudskim aktivnostima, uključujući zvuk koji proizvode sva prijevozna sredstva.
- *Indikator buke* – je fizička skala koju definira negativni utjecaj buke na okoliš, a koja je pak vezana za štetne utjecaje
- *L_{den} (Level Day-Evening-Night)* – indikator buke koji se odnosi na ukupnu iritaciju uzrokovanu bukom
- *L_{day} (Level Day)* – indikator buke koji se odnosi na ukupnu iritaciju uzrokovanu bukom tijekom perioda dana
- *L_{evening} (Level Evening)* – indikator buke koji se odnosi na ukupnu iritaciju uzrokovanu bukom tijekom perioda večeri
- *L_{night} (Level Night)* – indikator koji ukazuje na poremećaj sna uzrokovan bukom
- *Noise mapping* – odnosi se na prezentaciju podataka o postojećoj ili mogućoj razini buke vezane za indikator buke, prijestupe dozvoljenih granica buke, broj ljudi ili kuća koje se nalaze u području izravnog utjecaja buke.

EU direktiva zahtijeva da se do 30. listopada 2007. godine izrade strateške karte buke za sva mjesta sa više od 250 000 stanovnika, za sve glavne ceste kojima godišnje prijeđe više od 6 milijuna vozila i glavne zračne luke u njihovoj blizini.

4.6.1 Objavljivanje podataka prema Direktivi EU

Sve su članice EU obvezne objaviti javnosti karte buke. Svakih se pet godina podnosi izvještaj komisiji o karti buke te prati njena promjena. Prvi izvještaj je planiran za 18. srpanj 2009. godine nakon čega se isti predaje Europskom parlamentu. Prema EU direktivi za mjerenje buke definira se indikator L_{den} za koji je propisana formula u kojemu dnevni dio dana traje 12 sati, večer 4 sata, a noć 8 sati.

$$L_{den} = 10 \lg \frac{1}{24} \left[14 \cdot 10^{0,1L_{day}} + 2 \cdot 10^{0,1(L_{evening}+5)} + 8 \cdot 10^{0,1(L_{night}+10)} \right] \quad (9)$$

Države članice mogu skratiti period večeri za jedan ili dva sata i time produžiti period dana i/ili noći pod uvjetom da je taj izbor isti za sve izvore te da je EU komisija obaviještena o tome. Standardna vremenska podjela u EU je: dan 7-19h, večer 19-23h, noć 23-7h. Vremenski period za L_{den} u kojem se rade mjerenja je godinu dana.⁵

4.6.2. Minimalni propisani zahtjevi za izradu karte buke

1. Za izradu karte buke potrebni su slijedeći podaci:

- Postojeće, prethodno ili predviđeno stanje buke
- Prekoračenje dozvoljenih granica
- Procijenjeni broj nastambi, škola i bolnica u određenom području pokrivenom određenom jačinom buke
- Procjena broja stanovnika u području koji je izložen utjecaju buke

2. Strateške karte buke mogu biti prezentirane javnosti kao:

- Grafički prikazi
- Numerički podaci u tablicama
- Numerički podaci u elektronskom obliku

3. Karte buke za naselja usmjerit će posebnu pozornost buci uzrokovanoj:

- Cestovnom prometu
- Željezničkom prometu
- Zračnim lukama
- Industrijskim zonama, uključujući luke.

4. Karte buke korist će se u sljedeće svrhe:

- Kao podaci koji se šalju EU komisiji
- Kao izvor informacije za građane
- Osnova za daljnje urbanističko planiranje

⁵ Official Journal of the European Communities; **Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council**; 25. June 2002.

4.6.3. Minimalni zahtjevi za poduzimanje određenih mjera u svrhu stišavanja buke

1. Za provođenje tih mjera potrebni su:

- Opisi naselja, glavnih cesta, glavnih željeznica i zračnih luka
- Odgovorna državna služba
- Pravni kontekst
- Sažetak rezultata stanja karte konture buke
- Procjena predviđenog broja ljudi izloženog buci, definiranje problema i situacija koje se moraju riješiti.
- Sve mjere smanjivanja buke koje su već na snazi i svi projekti koji su u pripremi
- Sva djelovanja na ovom području u slijedećih 5 godina od strane nadležnih tijela
- Dugoročna strategija
- Financijski izvještaj ako je dostupan

2. Djelovanje od strane nadležnih tijela mogu uključiti:

- Planiranje prometa
- Uporaba zemlje i područja
- Tehnička mjerenja na izvorima buke
- Odabir tiših izvora buke
- Redukcija širenja zvuka
- Ekonomske mjere ili poticaji

3. Svaki taj plan mora sadržavati procjene buke koje se odnose na broj ljudi izloženih utjecajem buke.

Podaci vezani za zračne luke koji se šalju komisiji⁶

- Općeniti opis zračne luke – veličina, podaci o prometu
- Opis okolnog područja – naselja, sela, iskorištenost zemljišta
- Programi o dosadašnjoj kontroli buke te veličine mjerenja
- Procijenjeni ukupni broj ljudi koji žive izvan naselja na mjestima izloženim bukom

⁶ Official Journal of the European Communities; **Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council**; 25. June 2002.

- Procjena broja ljudi kategoriziranih prema veličinama izloženosti buke u zonama po 5 dB
- Karta buke mora se sastojati od kontura najmanje 60, 65,70 i 75 dB

4.7. Direktiva Europske unije - 2002/30/EC

Direktiva 2002/30/EC Europskog parlamenta stupa na snagu 26. ožujka 2002. godine. U navedenoj se direktivi utemeljuju propisi i procedure u svezi uvođenja operativnih ograničenja vezanih uz buku na aerodromima Zajednice. Ciljevi ove direktive su: utvrđivanje pravila za Zajednicu kako bi se omogućilo uvođenje operativnih ograničenja u skladu s nivoom aerodroma tako da se ograniči ili smanji broj ljudi na koje značajno djeluju štetni utjecaji buke, osiguravanje okvira u svrhu zaštite zahtjeva unutarnjeg tržišta, unapređenje razvoja aerodromskih kapaciteta u skladu s okolišem, omogućavanje postizanja određenih ciljeva smanjenja buke na nivou pojedinih aerodroma, omogućavanje izbora mjera među onima koje su raspoložive za postizanje najveće koristi za okoliš uz najniže troškove. Određuje se odgovorna nadležna vlast za pitanja kojim se bavi ova direktiva te se donose: opća pravila upravljanja bukom, pravila o procjeni, pravila o uvođenju operativnih ograničenja s ciljem povlačenja zrakoplova koji granično udovoljavaju, postojeća operativna ograničenja, izuzeća za zrakoplove registrirane u zemljama u razvoju te izuzeće za izvanredne zrakoplovne operacije. Uz ovu direktivu nalaze se dodatak I koji se odnosi na gradske aerodrome, kao i dodatak II informacije za operativna ograničenja u svezi Pravila o procjeni.

4.8. ECAC.CEAC. Doc29. „Izveštaj o standardnoj metodi obrade i definiranju kontura buke oko zračnih luka“.

Glavni dokument koji se odnosi na definiranje i mjerenje buke zrakoplova je ECAC.CEAC. Doc29. „Izveštaj o standardnoj metodi obrade i definiranju kontura buke oko zračnih luka“. Treće izdanje ECAC Doc 29 dokumenta o izradi modela buke zrakoplova na zračnoj luci izradio je stručni tim pod nazivom AIRMOD u prosincu 2005. godini. Ovaj dokument sadrži dva sveska: prvi je namijenjen prvenstveno nadležnim zrakoplovnim odjelima i projektantima kojima karta buke pomaže pri donošenju odluka te tehničkom osoblju koji izrađuje te karte. Drugi je svezak namijenjen onima koji dopunjavaju modele karte buke te služi kao zamjena

prijašnjoj verziji ovog dokumenta. Drugim riječima, novo izdanje predstavlja veliki napredak u detaljnim smjernicama o praktičnoj uporabi modela karte buke, uvođenju novih algoritama te podršci održavanju baze podataka buke zrakoplova.

4.9. Zaključak

Nakon uvođenja regulativa u područje redukcije buke zrakoplova i buke u zonama oko zračne luke, primijećen je njezin drastičan pad na zračnim lukama u svijetu te da je ova buka u dozvoljenim granicama koje te regulative primjenjuju. Jedan od najvećih i najtežih koraka bilo je povlačenje zrakoplova prve i druge kategorije starijih od 25 godina budući da je većina zemalja imala takvu flotu, a pojavom velike konkurencije ne i sredstva kojom bi obnovila cijelu flotu. Kao alternativno rješenje primjenjuje se postavljanje „hush kit“ sustava za redukciju buke na pogonske skupine, no za one zrakoplovne kompanije koje imaju velike flote zrakoplova radi se o velikom tehničkom i financijskom zahvatu, što u današnje vrijeme konkurencije i nije jednostavno. Odredbe i regulative su jasne i zahtijevaju pridržavanje. Svaki zrakoplov nakon proizvodnje mora proći certifikaciju vezanu za buku koju proizvodi i pridržavati se donesenih regulativa. Bez obzira na to koliko se financijski moralo uložiti u zrakoplove i opremu na zračnoj luci, još uvijek je cijena ljudskog zdravlja veća.

5. Mjerenje buke na Zračnoj luci Zagreb

5.1. Uvod

Prije nekoliko godina Zračna luka Zagreb krenula je sa planiranjem implementacije sustava za mjerenje buke zrakoplova. Dva su osnovna cilja postavljanja sustava za praćenje buke zrakoplova na zračnoj luci Zagreb. Prvi cilj jest mjerenjima dobiti vrijednost buke i analizama rezultata vidjeti kako ona utječe na stanovništvo koje živi neposredno uz zračnu luku. Drugi je cilj vezan uz kandidaturu Republike Hrvatske u Europsku uniju, pri čemu se zahtijeva da se sve zračne luke prilagode EU propisima, a izrada karte buke te kontinuirano praćenje buke je jedan od njih. Odgovorom na ove uvijete te postavljanjem opreme za mjerenje buke zrakoplova može se odrediti slijeću li zrakoplovi prenisko naseljenim područjima, tj. prate li oni propisane putanje ili ih zaobilaze. Također gledano sa sigurnosne strane, preko sustava za mjerenje buke može se otkriti i mogući kvar na zrakoplovu ukoliko buka motora prelazi razinu buke koja je izmjerena prilikom certifikacije zrakoplova.

5.2. Tehničke specifikacije Zračne luke Zagreb

Kako bi se na bolji način moglo provesti praćenje lokacija za mjerenje te analiza istih, u uvodnom dijelu bit će opisana lokacija Zračne luke Zagreb, načini njenoga korištenja, analiza prometa zrakoplova prema tipovima i načinu prijevoza.

Zračna luka Zagreb (LDZA) je međunarodna zračna luka prvoga slijetanja, ICAO klasifikacije 4E i nalazi se na nadmorskoj visini od 107 metara (351 ft). Gledano s aspekta prometa na Zračnoj luci Zagreb može se prometovati pod VFR i IFR uvjetima leta i otvorena je 24 sata. Zračna luka Zagreb posjeduje jednu uzletno sletnu stazu (USS) sa smjerovima jugozapad - sjeveroistok (prag 05) i sjeveroistok – jugozapad (prag 23). Za smjer 05 zrakoplovi pri slijetanju prolijeću iznad naselja Lukavec i Doljnja Lomnica, dok pri samom završnom dijelu prelijeću pored naselja Podbrežnica. Za polijetanje koristi se isti koridor za prag 05. Kod praga 23 pri slijetanju zrakoplovi prelijeću Svetu Helenu, Sesevski Kraljevac, Kobiljak, Sop. Dimenzije uzletno sletne staze su 3252 metara duljine i 45 metara širine (+2x7,5). Na ovoj uzletno sletnoj stazi njeni se pragovi prema analizama koriste 90% smjer od 05 prema 23, dok se smjer od praga 23 prema 05 koristi samo 10%. Što se tiče vrste

prometa, na zračnu luku u najvećem broju slijeću i polijeću komercijalni zrakoplovi te zrakoplov generalnog zrakoplovstva.



Slika 36. Satelitski prikaz Zračne luke Zagreb

5.3. Sustav za mjerenje buke na Zračnoj luci Zagreb

Sustav koji je instaliran na Zračnoj luci Zagreb sastoji se od tri fiksirane i jedne mobilne stanice. Mjerne stanice postavljene su od strane danske firme Brüel&Kjaer. Naime radi se o potpunom sustavu kojega čine terminal sa procesorskom jedinicom, mikrofoni te dodatni uređaji. Oznaka terminalne stanice je Noise Monitoring Terminal Plus Type 3639E. Taj je sustav optimiziran za vanjsku upotrebu svim klimatskim uvjetima. Sustav ima široki spektar primjene a to je: mjerenje buke zrakoplova, mjerenje buke cestovnog prometa, mjerenje buke u gradovima, praćenje buke željeznice i mjerenje industrijske buke. Terminal za mjerenje buke sastoji se od vodootporne oplate, analizatora razine zvuka, baterije i držača za postolje. Direktno na stanicu preko kabla spojena je mikrofonska jedinica.



Slika 37. NMT (Noise Monitoring Terminal) stanica sa mikrofonom

5.3.1 Tehničke specifikacije sustava za mjerenje buke Zračne luke Zagreb

Oplata NMT stanice otporna je na sve vremenske uvjete kao što su kiša, snijeg, vjetar. Metalna ploča koja se nalazi na vanjskom dijelu stanice štiti stanicu od visokih temperatura koje mogu prelaziti i visinu od 50 stupnjeva. Toplinska izolacija bitna je iz razloga jer se stanica postavlja na površine koje su pod utjecajem zraka sunca te je stanica zbog toga razloga izložena visokim temperaturama. U zimskim uvjetima stanica se sastoji i od uređaja za grijanje koji grije unutrašnjost stanice, pa time i elektronske uređaje na jako niskim temperaturama, nižim i od -10 stupnjeva. Kako bi se spriječio odlazak do svake stanice zasebno u svrhu njenoga podešavanja, kontrola i konfiguriranje NMT-a vrši se daljinskim upravljanjem uz pomoć Noise Monitoring Server Type 3642. Sustav je izrađen kako bi bio otporan na udarce, razne oblike vandalizma i krađe. Sadrži dvije unutarnje brave te je cijeli sustav pod vodootpornom zaštitom. Kako bi se spriječilo nestajanje struje i nesmetan rad, sustav sadrži dvije neovisne baterije. Baterije se pune kada je terminal spojen na struju. Napunjene baterije mogu opskrbljivati sustav 72 sata. Kako bi sustav mogao duže raditi bez struje postoji mogućnost priključka dodatnog UPS (dodatnog napajanja) uređaja. Napajanje sustava dovoljno je jako da se i prijenosno računalo može spojiti na NMT i time napraviti određene izmjene u programu ili postavkama. Kabel koji povezuje terminal i mikrofon duljine je 10 metara kako bi se mogla odrediti kvalitetna lokacija.

5.3.2. Mikrofon

Vanjski mikrofon glavni je faktor NMT, te pripada 1. klasi prema zahtjevima IEC61672. Mikrofon radi i pod ekstremnim uvjetima od 96% vlažnosti zraka, pod temperaturom u rasponu od -30 do + 55 stupnjeva. Gornji je dio mikrofona zaštićen sa spužvastom zaštitom kako bi spriječio buku koju uzrokuje vjetar. Na vrhu mikrofona nalazi se šiljak koji služi kao zaštita protiv slijetanja ptica na vrh mikrofona. Kalibracija mikrofona vrši se kalibratorom zvuka tipa 3231.



Slika 38. Prikaz analizatora zvuka, mikrofona i kalibratora

5.3.3. Proces snimanja i arhiviranja podataka

NMT stanica ima mogućnost snimanja raznih vrsta podataka koji su potrebni za analizu buke L_{eq} , L_{pech} , L_{im} , L_{inst} , L_{min} . Sva mjerenja snimaju se na tvrdi disk od 20 GB, te se arhiviraju 3 mjeseca. Podaci koji se pohranjuju su:

- satni izvještaji - statističke informacije za svaki sat uključujući Total L_{eq}
- kratki izvještaj – izvještaj u periodu od 1 do 60 minuta
- informacije o kalibriranju – izvještaj o kalibriranju prema sistemu 4 puta dnevno s mogućnošću promjene
- PNdB (Perceived Noise Level) i EPNdB (Effective Percived Noise Level) svih događaja prema odluci ICAO – Annex 16

Također stanica ima mogućnost snimanja podataka, tj. svaki zvuk bilježi se u bazu podataka u mp3 zapisu kako bi se u bilo koje vrijeme mogao čuti zvuk zrakoplova.

Dodatne module sustava čine GSM modul, vremenska stanica i GPS. Meteorološku stanicu na sustavima Zračne luke Zagreb sadrži NMT1 koja daje podatke o smjeru i brzini vjetra, temperaturi, tlaku.



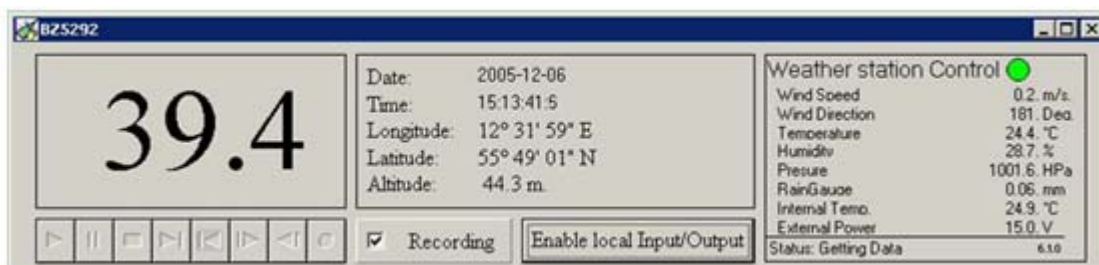
Time Start	Location Ind.	Location Description	Duration	WeatherType	LevelAve	Level Min	Level Max
31.8.2008 0:00:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	0,9	0,4	1,9
31.8.2008 0:00:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	94,0	64,0	118,0
31.8.2008 0:01:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	0,7	0,2	1,8
31.8.2008 0:01:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	111,0	46,0	147,0
31.8.2008 0:02:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,1	0,4	2,1
31.8.2008 0:02:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	100,0	83,0	141,0
31.8.2008 0:03:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,0	0,3	2,3
31.8.2008 0:03:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	98,0	66,0	115,0
31.8.2008 0:04:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,1	0,6	2,5
31.8.2008 0:04:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	95,0	80,0	119,0
31.8.2008 0:05:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,0	0,6	1,9
31.8.2008 0:05:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	84,0	63,0	100,0
31.8.2008 0:06:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	0,8	0,5	1,2
31.8.2008 0:06:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	84,0	51,0	107,0
31.8.2008 0:07:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,2	0,7	1,7
31.8.2008 0:07:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	72,0	49,0	89,0
31.8.2008 0:08:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,5	0,9	2,1
31.8.2008 0:08:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	81,0	71,0	93,0
31.8.2008 0:09:00	1	Trafo Station 3	1	WindSpeed	1,2	0,4	1,7
31.8.2008 0:09:00	1	Trafo Station 3	1	WindDirection	78,0	69,0	136,0

Slika 39. Prikaz meteorološke stanice i dobivenih podataka o vjetru

Uz meteorološku stanicu važan dodatak na mobilne terminale je GPS uređaj za određivanje geografskog položaja terminala. Mobilna stanica na zračnoj luci u svome sustavu ima GPS lokator firme Garmin. Preko GPS-a u bilo koje vrijeme može se odrediti njena pozicija, geografska širina, geografska dužina i visina.



Slika 40. Prikaz Garmin GPS-a za mobilne terminale



Slika 41. Prikaz zaslona sa podacima koje šalje mobilna stanica

Komunikacija za spajanje terminalne stanice i servera koristi se uređaji ISDN, LAN, Wireless, Radio modemi.

NMT 3639E – stanica zadovoljava nekoliko standarda, a to su:

- IEC60651 (1979) Type 1 plus Amendment 1
- IEC60804 (1985) Type 1 plus Amendment 2
- EN/IEC 61260 (1995) Octave and 1/3-Octave Bands Class 1
- EN/IEC 61672-1 (2002) Class 1
- ANSIS1.4 - 1983 Type 1
- ANSIS1.43 - 199X Type 1 (Draft 1993)
- ANSI S1.11 - 1986 Octave and 1/3-Octave Bands, Order 3, Type 0-C, Optional Range
- GB9660-88 & GB 9661-1988 (WECPNL)

5.4. Model pozicioniranja mjernih stanica na Zračnoj luci Zagreb

Model pozicioniranja prvih fiksnih stanica za mjerenje buke na Zračnoj luci Zagreb prvo se vezao za područje u zoni same zračne luke zbog već postavljene potrebne infrastrukture te nekoliko faktora od kojih su najvažniji: mjesta najizloženija buci, blizina praga uzletno sletne staze, nesmetano širenje zvuka od zrakoplova prema mikrofONU bez prepreka, popratna infrastruktura i mreža za pravilno funkcioniranje mjernih stanica. Fiksirane mjerne stanice postavljene su na slijedećim lokacijama: dvije na pragove uzletno sletne staze, prag 05 i prag 23. Mjerna stanica NMT1 (*Noise Monitoring Terminal 1*) nalazi se 366 metara bočno od praga 05 na trafostanici 3, dok se NMT2 (*Noise Monitoring Terminal 2*) nalazi 330 metara na trafostanici 4, a mikrofoni su im preko kabla pomaknuti na otvoren prostor bliže pragu uletno sletne staze. Treća fiksna stanica nalazi se na kontrolnom tornju, dok je mikrofON fizički prenesen na sam rub zgrade, te povezan sa bazom preko kabla. Mobilna stanica postavlja se ovisno o zahtjevima i željenim lokacijama za mjerenje buke.



Slika 42. Prikaz pozicioniranja postojećih mjernih stanica



Slika 43. Prikaz najčešće zauzete pozicije zrakoplova te lokacija NMT3

Odabir pozicije NMT3 određen je na principu podatka da se najviše (90%) operacija izvodi na pragu 05, što je uzrokovalo i pomicanje stanice bliže tome pragu u odnosu na prag 23. Drugi razlog bila je pokrivenost stajanke jer su se željeli dobiti i podaci buke na samoj stajanci kako bi se mogla pratiti buka kojoj je izloženo osoblje zračne luke. Obzirom da zračna luka ima 21 poziciju za komercijalne zrakoplove i 20 za generalnu avijaciju, a najviše ih se koristi ispred zgrade, sama zgrada bila je najbolje rješenje za postavljanje mikrofona. Već spomenuta stanica NMT1 nalazi se na pragu 05. Prema statističkim podacima zastupljenost polijetanja sa toga dijela uzletno sletne staze prema pragu 23 zastupljeno je oko 90%. Budući da je odabir postojeće lokacije bio zadovoljavajući, moralo se uzeti u obzir i mogućnost preklapanja buke pri snimanju stanice NMT1. Moguće preklapanje buke prikazano je na slici 44. gdje plavu zonu predstavlja buka koja se širi pri početku faze polijetanja, točnije onda kada zrakoplov dobije dozvolu za polijetanje od kontrolnog tornja, a žutu ukoliko u isto vrijeme motore starta zrakoplov na stajanci generalne avijacije. Ukoliko dođe do takvoga preklapanja preko programa kojega posjeduje Zračna luka Zagreb mogu se u svrhu analize raščlaniti zvukovi svakoga zrakoplova zasebno.



Slika 44. Prikaz poklapanja buke koju stvaraju dva zrakoplova

U slučaju Zračne luke Zagreb koja trenutno ne posjeduje zemaljski radar kojim bi pratila kretanje zrakoplova po zemlji, prometni centar mora biti vrlo precizan sa upisom vremena startanja, polijetanja, slijetanja i gašenja zrakoplova. Problem kod toga zapisa je u tome što upis vremena polijetanja i slijetanja te gašenja i paljenja zrakoplova upisuje čovjek pri čemu dolazi do mogućnosti pogreške u upisu vremena, dok buku snima računalo i automatski

upisuje vrijeme koje je točno. Za primjer možemo uzeti zrakoplov tipa TU154 koji prema rasporedu letenja treba sletjeti u 14:00 prema lokanom vremenu, a sleti u 14:05, dok u to vrijeme 14:05 svoje motor starta na poziciji stajanke generalnog zrakoplovstva zrakoplov tipa Piper. Prometni centar greškom nije upisao vrijeme slijetanja TU154 u 14:05, već 14:00 te dolazi do sumnje u razinu buke kod lakoga zrakoplova Piper, a stanica pokazuje mjerenje od 87 dB što je nemoguće za elisni zrakoplov takvoga tipa. U tome slučaju selekcijom zvukova koji su snimljeni u tim periodima i obradom grafikona tih događanja izoliraju se zrakoplovi i detektira njihova buka. Bez zemaljskoga radara i automatiziranog upisa vremena slijetanja i polijetanja ta procedura je neprecizna te u dosta slučajeva može doći do krivih saznanja.

Kod stanice NMT 2 koja se nalazi na pragu 23 lakša je određivanje buke pojedinog zrakoplova. Stanica NMT 2 najviše snima podatke nastale preletima iznad nje, tj. kada zrakoplov kreće sa praga 05 prema 23 i slijetanjima prema pragu 23. Određivanje te buke bitna je iz razloga što se u blizini zračne luke i na koridoru za polijetanje nalaze naselja Selnica, Petrina, Mala Kosnica i Velika Kosnica koja mogu biti ugrožena polijetanjem zrakoplova sa Zračne luke Zagreb. Postoji mogućnost da detekcija buke na stanici NMT 2 bude pomiješana sa blazinom vozne staze, tj. usmjerenosti zrakoplova pri rulanju prema stajanci jer je pogonska grupa zrakoplova ispuhom okrenuta prema NMT stanici te zrakoplovi nakon ulaska na voznu stazu daju određeni dodatni potisak koji im omogućava kretanje prema stajanci. Buka pri samom kretanju po voznoj stazi je znatno manja pa je ipak lakše razlikovati događanja.

Trećom fiksiranom stanicom (NMT 3) možemo kontrolirati izloženost osoblja i putnika buci zrakoplova i mjeriti buku na stajanci. Prema podacima ta buka nije velika već je kontinuirana s obzirom na konstantan rad APU kod zrakoplova (Auxiliary Power Unit – motor koji napaja zrakoplov dok nije uključena pogonska skupina) u vrijeme prihvata i otpreme te vozila koja ga opslužuju.

Četvrta mjerna stanica je NMT 4 Mobile. Ta stanica je mobilna (prenosiva) i nema fiksiranu poziciju mjerenja, već se njena lokacija određuje ovisno o potrebi za prikupljanje podataka sa više različitih pozicija. Stanica ima također svoj UPS (bateriju) koja se aktivira pri nestanku struje te GPS i antenske sustave preko kojih šalje podatke u bazu te ih prikazuje na ENM programu.

5.4.1. Prijedlozi lokacija za postavljanje novih mjernih stanica

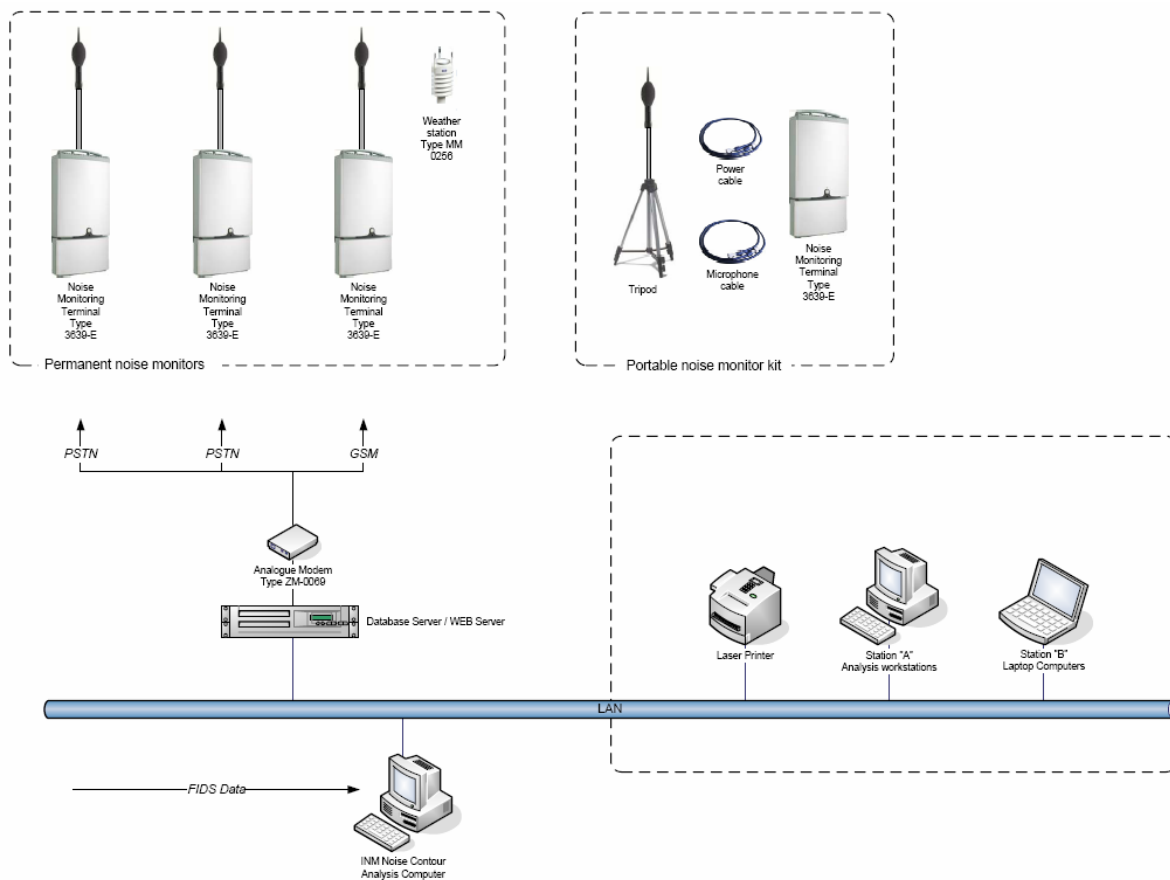
Za mjerenje buke na zračnoj luci četiri stanice su minimalan broj koji zračna luka mora imati. Kao što je već navedeno tri stanice su definirane prema ICAO (International Civil Aviation Organization) i FAA (Federal Aviation Administration) standardima, dok mobilna stanica služi za mjerenja izvan zone zračne luke. Na slici 45. dan je prijedlog lokacija za postavljanje mjernih stanica koje su raspoređene u okolnim selima dok je za putanje slijetanja i polijetanja potrebno postaviti uz fiksne mjerne stanice na pragovima, još barem jednu mjernu stanicu na os slijetanja i polijetanja na rubove sela koja se nalaze na koridoru. Te dodatne stanice dale bi vrijednosti buke zrakoplova koji se nalazi na određenoj visini u fazi polijetanja i slijetanja te bi se time moglo uspostaviti odnos između buke koju stvaraju zrakoplovi pri preletu i buke koja je definirana i dopuštena kada bi se zrakoplovi koristili standardnim prilazom. Proučavanjem i detaljnim analizama mjernih vrijednosti mogao bi se dobiti daljnji uvid u moguće dodatne lokacije na samim putanjama polijetanja i slijetanja zrakoplova, kao i nepoštivanja koridora te visine pri slijetanju i polijetanju na Zračnu luku Zagreb.



Slika 45. Moguće lokacije novih NMT-a stanica

5.5. Realizacija sustava za mjerenje buke zrakoplova

Zračna luka Zagreb krenula je sa prvim mjerenjima buke 2006. godine nakon nabave najnovije opreme za mjerenje buke zrakoplova, danske tvrtke Bruel&Kaeer te dugotrajnih pripravnih radova. Trenutna oprema zračne luke za mjerenje buke sastoji se kao što je već spomenuto, od tri nepokretne stanice NMT (Noise Monitoring Terminal) i jedne mobilne stanice (NMT Mobile) te popratne opreme za pouzdano praćenje buke zrakoplova na zračnoj luci. Uz već spomenuti hardware, slijedila je nabava računalnog programa gdje je zračna luka odabrala programski paket ENM (Environmental Noise Model), INM (Integrated Noise Model) i INM Link. ENM je program koji se koristi za praćenje i analizu podataka dobivenih sa mjernih stanica NMT. INM je program koji koristi za izradu karata buke, simulacije u budućnosti i korekcije urbanističkog plana vezanog za buku. INM Link je program koji možemo shvatiti kao poveznicu između ENM i INM-a te radara instaliranog na zračnoj luci. INM Link se direktno povezuje za GTR (Ground Terminal Radar) te se putem njega u Real Time-u (realnom vremenu) snimaju podaci o preletima i buci zrakoplova.



Slika 46. Prikaz strukture umrežavanja stanica

Kao što je već navedeno ENM je program koji služi za praćenje i analizu buke. Spojen je direktno na NMT stanice koje su instalirane na zračnoj luci Zagreb. Svako slijetanje, polijetanje i kretanje po voznim stazama iznad određenog nivoa (trigera) aktivira sustav koji buku bilježi na NMT. S obzirom na veliku količinu zvučnih događaja svakom NMT-u je postavljena granica iznad koje počinje snimati. Tim sustavom automatski su filtrirani zvukovi koji su ispod granice i ne mogu utjecati na povećanje buke zračne luke. ENM program ima mogućnost praćenja raznih podataka ovisno o kakvoj se namjeri radi. Svaka mjerna stanica sastoji se od nekoliko dijelova, od kojih su glavni procesor, matična ploča, hard disk i mikروفon. Mikروفon je fizički odvojen sustav i povezan je jedino sa kablom. Time je moguće bazu sustava postaviti uz uzletno sletnu stazu, dok mikروفon može biti pozicioniran na središnjici prije praga uzletno sletne staze. Slična situacija je sa NMT 3 koji se nalazi na lokaciji „*Kontrolni toranj*“ tj. baza stanice postavljena uz kontrolni toranj, a mikروفon nekoliko metara dalje, na samom rubu zgrade.

Stanice su aktivne od 0-24 sata, no kako bi se filtrirali zvukovi niži od 50 dB stanice imaju graničnu vrijednost, koja ukoliko je pređena stanice počinju snimati. Mjerenje započinje kada zrakoplov svojim dolaskom ili odlaskom prijeđe trigger, tj. granicu nakon koje sustavi počinju snimati. Sustav je podešen da prati sva događanja iznad 50 dB. Ukoliko zrakoplov slijeće na prag 05, NMT 1 će snimiti buku njegovog dolaska. Nakon preleta NMT1 zrakoplov će biti u poziciji da aktivira NMT 3 s obzirom da prolazi u njejoj ravnini te će pri približavanju kraju uzletno sletne staze aktivirati NMT 2 stanicu koja se nalazi na pragu 23. Prema mjerenjima buke koju zabilježi NMT 2 stanica može se uvidjeti da ta stanica ima nešto više događaja buke iznad 65 dB od onoliko koliko bi se moglo očekivati. Kako bi se došlo to razloga povećanog broja događanja, napravljene su dodatne analize kojima je ustanovljeno da zrakoplovi koji slijeću dalje od točke dodira više koriste suprotni potisak (reverse) kojemu je rezultat jače kočenje, a time stvaraju veću buku. Kada mikروفon snimi zvuk, on se sprema na hard disk na NMT stanici. Preko servera i telekomunikacijskih kanala podaci sa svih mjernih stanica kopiraju se na glavni server i s njega filtriraju korisnicima u ENM program.

5.6. Veličine buke zrakoplova pri polijetanju i slijetanju

Za praćenje buke na Zračnoj luci Zagreb važno je poznavati veličine koje se koriste, kao i program koji snima buku zrakoplova. Osnovni podaci koji su bitni za daljnje izračune i analizu buke su SEL (Sound Exposure Level) i L_{dn} (Level Day-Night) tj. u današnje vrijeme koristi se L_{den} (Level Day-Evening-Night).

L_{den} je kalkulacija L_{eq} (ekvivalenta) u vremenskom periodu od 24 sata. U početku vremenski period koji se mjerio bio je podijeljen na dva dijela, dan i noć te mu je oznaka bila L_{dn} (Day/Night Sound Level). Dan je trajao u vremenu od 7:00 do 22:00, dok je period noći trajalo od 22:00 do 7:00 ujutro. U tom noćnom periodu pozadinska je buka bila puno manja i prema istraživanjima osjetljivost ljudi je puno veća s obzirom na san te je dodan određeni broj dB (10) kao penal. Nova veličina koju koristi sve više zračnih luka u svojim mjerenjima je L_{den} (Level Day-Evening-Night). Ta je veličina slična onoj L_{dn} no zbog preciznosti i osjetljivosti stanovništva koje žive uz zračnu luku uveden je novi period večer (Evening). U L_{den} -u postoje tri perioda, dan od 7:00 do 19:00 i na razinu dB ne pridodaju se penali, večer od 19:00 do 22:00 sa penalima od 5 dB, te noć u trajanju od 22:00 do 7:00 i dodatkom od 10 dB. L_{den} je glavno mjerilo putem kojega se izrađuje karta buke.

Tablica 11. Prikaz penalizacije i podjele doba dana

24 satne veličine	Veličina jednoga događaja	Vrijeme		Veličina (težina)	Množitelj
DNL	SEL	Dan	7:00 – 22:00	0 dB	1
		Noć	22:00 – 7:00	10 dB	10
CNEL	SEL	Dan	7:00 – 19:00	0 dB	1
		Večer	19:00 – 22:00	4.77 dB	3
		Noć	22:00 – 7:00	10 dB	10
Lden	SEL	Dan	7:00 – 19:00	0 dB	1
		Večer	19:00 – 22:00	5 dB	3.16
		Noć	22:00 – 7:00	10 dB	10
NEF	EPNL	Dan	7:00 – 22:00	0 dB	1
		Noć	22:00 – 7:00	12.23 dB	16.7
ANEF	EPNL	Dan	7:00 – 22:00	0 dB	1
		Noć	22:00 – 7:00	6.02 dB	4

L_{dn} se izračunava preko formula:

$$Ldn = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{86,400} \left[\int_{7am}^{10pm} 10^{L(t)/10} dt + \int_{10pm}^{7am} 10^{(L(t)+10)/10} dt \right] \right) \quad (10)$$

Period: Dan Noć

ili koristeći SEL

$$Ldn = 10 \cdot \log_{10} \left(\left[\sum_{i=1}^n 10^{SEL_i/10} + \sum_{i=n+1}^m 10^{(SEL_i+10)/10} \right] \right) - 49,4 \quad (11)$$

Period: Dan Noć

5.7 ENM (Environmental Noise Model) program za snimanje buke zrakoplova

Prilikom aktiviranja ENM programa sustav daje indikacije o stanju mjernih stanica i zadnjem prenosu podataka kao što se može vidjeti na slici 46. Prema tim indikatorima možemo znati prilikom obrade podataka i daljnjih analiza da li je sustav zakazao te ukoliko jedna od stanica zbog tehničke greške ne snima.

```

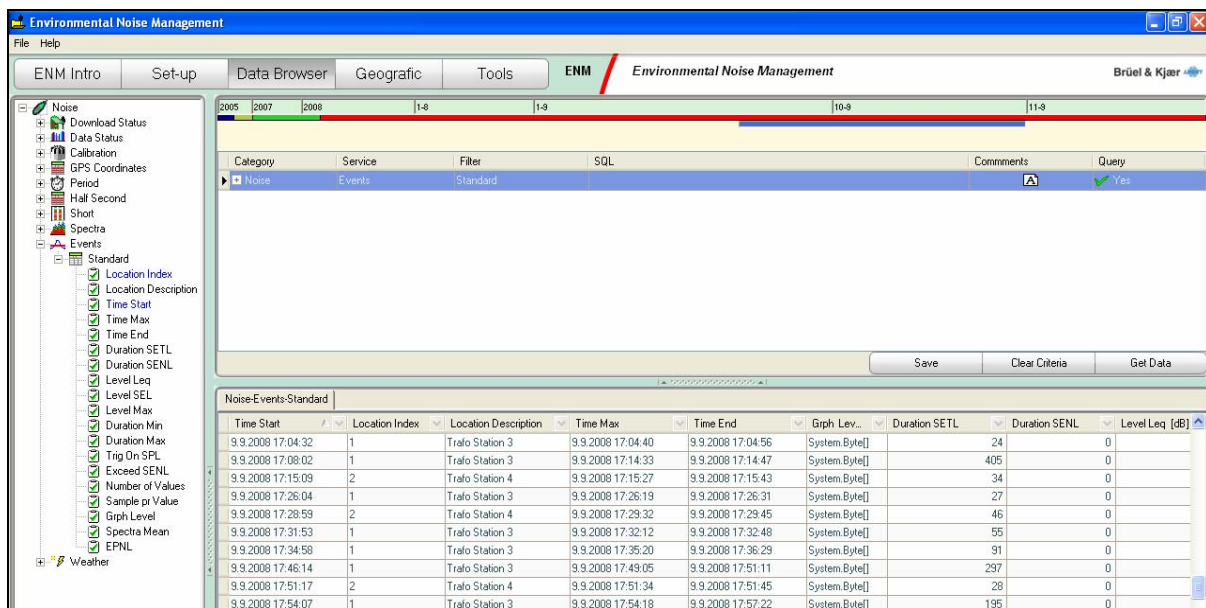
Last Download from Location: 4 Mobile Test
Connection Time:23.6.2007 9:12:48 OK
Last Download from Location: 1 Trafo Station 3
Connection Time:23.6.2007 9:01:25 OK
Last Download from Location: 2 Trafo Station 4
Connection Time:23.6.2007 9:05:10 OK
Last Download from Location: 3 Tower Building
Connection Time:23.6.2007 9:09:01 OK
    
```

Slika 47. Indikacija rada sustava

Proces mjerenja buke zrakoplova počinje prilikom snimanja podataka na NMT stanice, a analiza dobivenih podataka počinje preuzimanjem podataka sa četiri mjerne stanice instalirane na Zračnoj luci Zagreb. ENM program daje nam nekoliko mogućnosti praćenja podataka podijeljene u zasebne cjeline, a to su:

- Download Status – operativno stanje NMT stanica
- Data Status - prikaz stanja prijena podataka sa NMT stanica
- Calibration – kalibracija NMT stanica

- GPS Coordinates – GPS koordinate svih stanica, lociranje mobilnih stanica
- Period – prikupljanje podataka u vremenskom razmaku, minuta, sat..
- One Seceond – praćenje perioda sa buke po sekundama
- Short - izrada kratkih izvještaja
- Spectra
- Events – prikupljanje svih podataka izmjerenih nakon prelaska granice buke
- Weather - prikupljanje meteoroloških podataka izmjerenih na NMT stanicama, brzina vjetera, temperatura, tlak.



Slika 48. Prikaz zaslona sa aktiviranim ENM-om

Za prikupljanje podataka ovisno o zahtjevima koristimo izbornik *Period* (periodično prikupljanje podataka od sat vremena) ili izbornik *Events* (prikupljanje podataka ovisno o detekciji triggera - granice za snimanje i perioda trajanja buke). Korištenjem izbornika *Period* dobivaju se podaci koji su izračunati kao srednje vrijednosti tijekom određenog vremena, npr. sata. Informacija se sastoji od vremena početka snimanja, vremena završetka snimanja te lokacije na kojoj je snimljen zvuk. Slijedeći podaci koji se mogu vidjeti vezani su uz aktivnost sustava i pravilan rad sustava te moraju pokazivati indikaciju od 100%. Unutar izbornika *Period - Standard* dijela dobivaju informacije kao što su L_{eq} Total, L_{eq} Max, L_{eq} Min, L_{eq} Back, L_{eq} Event, L_{dn} Total i L_{den} Total.

5.7.1 Obrada podataka dobivenih ENM programom

Podaci koji su obrađeni u ovome magistarskom radu praćeni su u vremenskom periodu od 01.01.2008. do 30.09.2008. Sve četiri stanice su podešene da snimaju 24 sata na dan u spomenutom vremenskom periodu. Mjerenjima se dobilo 49319 zapisa (events) na ukupno 4 mjerne stanice. Prema podjeli mjerenja na stanicama 24427 zapisa snimljeno je na stanici NMT 1, 24072 na stanici NMT 2, 509 na NMT 3 stanici, dok je mobilna stanica bila postavljena unutar zgrade te su njena mjerenja u ovom trenu zanemarena.

S obzirom da Zračna luka Zagreb ne posjeduje svoj *ground radar* za praćenje polijetanja i slijetanja zrakoplova, a sustav za mjerenje buke zrakoplova daje samo podatke o buci, bilo je potrebno napraviti korelaciju ENM programa sa sustavom FAIS Zračne luke Zagreb. Drugim riječima snimljena buka zrakoplova morala se pridodati operacijama polijetanja i slijetanja određenih tipova zrakoplova. U ovoj analizi bitno je navesti da su to podaci sa mjernih stanica koje se nalaze u neposrednoj blizini pragova što uzrokuje povećane vrijednosti razine buke. Iz obrađenih podataka mjernih stanica mogu se vidjeti slijedeće dobivene vrijednosti za pojedine stanice (NMT1 i NMT2).

Tablica 12. Prikaz srednjih (L_{eq}) i maksimalnih (L_{max}) vrijednosti buke zrakoplova prilikom preleta mjerne stanice NMT 1 (prag 05) na Zračnoj luci Zagreb

Tip zrakoplova	Slijetanje		Polijetanje	
	L_{eq} (dB)	L_{max} (dB)	L_{eq} (dB)	L_{max} (dB)
AB319	73,0	80,5	75,1	83,5
AT42	73,0	81,3	73,3	85,2
EA322	72,6	80,6	77,4	87,9
B7378	72,7	80,9	76,6	89,4
CL65	73,1	81,7	77,2	86,9
E145	70,4	78,4	74,6	79,2

Tablica 13. Prikaz srednjih (L_{eq}) i maksimalnih (L_{max}) vrijednosti buke zrakoplova prilikom preleta mjerne stanice NMT 2 (prag 23) na Zračnoj luci Zagreb

Tip zrakoplova	Slijetanje		Polijetanje	
	L_{eq} (dB)	L_{max} (dB)	L_{eq} (dB)	L_{max} (dB)
AB319	71,7	78,3	81,3	89,0
AT42	68,5	76,1	72,1	78,4
EA322	70,1	76,5	82,0	88,7
B7378	76,4	81,6	78,7	84,9
CL65	72,1	79,9	74,9	83,0
E145	70,3	74,4	76,7	83,5

U gore prikazanim tablicama i grafovima prikazane su srednje i maksimalne vrijednosti prema tipovima zrakoplova koje su dobivene mjerenjem na stanicama Zračne luke Zagreb. U svrhu provjere razine buke napravljena je dodatna usporedba sa vrijednostima mjerenja preko vrijednosti SEL-a (Sound Exposure Level) koji su također registrirani mjerenjem na stanicama zračne luke. Konzultantna tvrtka iz Sjedinjenih Američkih Država, Harris Miller Miller & Hanson Inc. (HMMH) objavila je službene podatke o prosječnim vrijednostima SEL-a u dolasku zrakoplova prema njihovom približavanju pragu uzletno sletne staze. U slijedećoj tablici uspoređeni su ti podaci za zrakoplove tipa Airbus 319, Airbus 320, ATR42, Boeing 737-800, CL65 i EMB-145.

Slijetanje zrakoplova prema pragu 05 USS-e

Tablica 14. Prikaz prosječne veličine buke zrakoplova u slijetanju, u odnosu prema približavanju pragu 05

Dolazni zrakoplovi - SEL							
Tip zrakoplova	Udaljenost od praga uzletno sletne staze (ft) prag 05						
	50000	25000	20000	15000	10000	5000	1000 *
AB319	74,2	80,8	83,3	86,8	89,7	93,7	90,3
AT42	66,7	72,9	74,8	76,9	79,6	83,8	92,4
EA322	75,2	82,7	84,3	86,3	88,9	92,7	91,3
B7378	78,0	85,5	87,0	88,9	91,4	95,2	97,2
CL65	68,4	76,5	79,5	82,0	84,6	88,7	92,6
E145	71,9	79,8	81,4	83,4	85,9	89,6	89,7

Izvor: HMMH

Iz tablice 14. može se vidjeti da SEL raste ovisno o približavanju pragu uzletno sletne staze. Budući da je mjerna stanica postavljena bliže od 5000 ft, zbog pozicije NMT 1 stanice na Zračnoj luci Zagreb uvedena je udaljenost od 1000 ft što bi zapravo i bila udaljenost mjerne stanice od praga uzletno sletne staze. S obzirom da zračna luka ima jednu fiksnu stanicu na svakom pragu, jedino što se može zasad izmjeriti je podatak na toj stanici udaljenoj 1000 ft. Za daljnja istraživanja potrebno bi bilo postaviti mobilnu stanicu na udaljenosti na kojima su mjereni dani podaci koji su standardni te vidjeti ima li odstupanja. Rezultatima i analizom može se reći da prema ovome uzorku slijetanja na zračnu luku Zagreb, zadovoljavaju standarde što možemo vidjeti iz tablice 14., sa napomenom da se zrakoplovi Airbus 319 i Airbus 320 koji su najfrekventniji nalaze ispod standardne granice i prema mjerenjima koja su vršena zadovoljavaju dozvoljene limite. U odnosu na ostale zrakoplove postoje odstupanja kod zrakoplova ATR42, no ona ovise o njihovom prilazu, težini te visini na kojoj prelijeću

mjernu stanicu. S obzirom da se povećani SEL nalazi unutar 2000 ft, povišena buka još je uvijek u zoni zračne luke.

Polijetanje zrakoplova sa praga 05 prema 23

Gledajući vrijednosti iz tablice odlaska zrakoplova sa praga 05 prema 23 može se primijetiti da su prosječne vrijednosti mjerenja povećane kod zrakoplova ATR42 i E145. Uzročnik povećanog SEL-a može biti maksimalna težina zrakoplova pri polijetanju te manji kut pri polijetanju sa uzletno sletne staze pri čemu se zrakoplov podiže bliže NMT stanici, no potvrda tome zahtijeva dodatnu analizu.

Tablica 15. Prikaz prosječne veličine buke zrakoplova u polijetanju od praga 05 prema 23

Odlazni zrakoplovi - SEL							
Tip zrakoplova	Udaljenost od praga uzletno sletne staze (ft) – prag 05						
	10000*	15000	20000	25000	30000	35000	60000
AB319	96,9	88,2	82,8	80,5	79,6	78,6	72,0
AT42	85,4	70,2	68,9	65,0	63,5	62,7	59,6
EA322	97,9	89,9	84,7	82,4	81,0	79,6	73,8
B7378	92,7	91,0	86,0	84,0	82,3	80,9	76,5
CL65	92,8	84,6	80,1	77,8	75,9	74,5	68,6
E145	89,5	79,8	77,3	74,9	73,4	72,0	66,9

Izvor: HMMH

Slijetanje zrakoplova prema pragu 23 USS-e

Slijetanje na prag 23 prema mjerenjima ima manje vrijednosti, no i uzorak sa kojim je rađena srednja vrijednost je manji. Ako se uzme u obzir da je svega 10% iskorištenost praga 23 onda taj podatak potvrđuje tako mali uzorak. Analiza pokazuje da zrakoplovi Airbus 319 i Airbus 320 imaju prosječni SEL ispod dozvoljene razine čime se i buka na zemlji smanjuje. ATR42 ima lagano povećan SEL, no prema mjerenjima na ostalim daljinama on je na dopuštenoj granici.

Tablica 16. Prikaz kretanja veličine buke zrakoplova u slijetanju, u odnosu prema približavanju pragu 23

Dolazni zrakoplovi – SEL							
Tip zrakoplova	Udaljenost od praga uzletno sletne staze (ft) prag 23						
	50000	25000	20000	15000	10000	5000	1000 *
AB319	74,2	80,8	83,3	86,8	89,7	93,7	88,4
AT42	66,7	72,9	74,8	76,9	79,6	83,8	87,8
EA322	75,2	82,7	84,3	86,3	88,9	92,7	85,7
B7378	78,0	85,5	87,0	88,9	91,4	95,2	90,1
CL65	68,4	76,5	79,5	82,0	84,6	88,7	89,2
E145	71,9	79,8	81,4	83,4	85,9	89,6	81,2

Izvor: HMMH

Polijetanje zrakoplova sa praga 23 prema 05

Kod polijetanja sa praga 23 iz mjerenja vidi se povećanje SEL-a kod zrakoplova ATR42, dok drugi zrakoplovi zadovoljavaju i unutar su dopuštenih mjerenja.

Tablica 17. Prikaz prosječnih veličina buke zrakoplova u polijetanju od praga 23 prema 05

Odlazni zrakoplovi - SEL							
Tip zrakoplova	Udaljenost od praga uzletno sletne staze (ft) – prag 23						
	10000*	15000	20000	25000	30000	35000	60000
AB319	92,2	88,2	82,8	80,5	79,6	78,6	72,0
AT42	86,9	70,2	68,9	65,0	63,5	62,7	59,6
EA322	96,6	89,9	84,7	82,4	81,0	79,6	73,8
B7378	91,1	91,0	86,0	84,0	82,3	80,9	76,5
CL65	93,5	84,6	80,1	77,8	75,9	74,5	68,6
E145	83,3	79,8	77,3	74,9	73,4	72,0	66,9

Izvor: HMMH

Obrada izmjerenih podataka u svrhu prikaza Lden

Daljnjom obradom mjerenih podataka razvrstane su operacije zrakoplova prema dobu dana: dan, večer, noć. U slijedećoj tablici navedeni su rezultati mjerenja na pragovima 05 i 23 u fazama polijetanja i slijetanja iznad 65 dB.

Tablica 18. Prikaz broja operacija prema razdobljima dana

Vrijeme dana	Period	Broj mjerenja iznad 65 dB (01.01. – 30.09.2008.)	
		Prag 05	Prag 23
Dan	06:00 – 18:00	7508	9108
Večer	18:00 – 22:00	3127	3411
Noć	22:00 – 06:00	899	592
Ukupno		11534	13111

Ukoliko se napravi analiza snimljenih događaja i kategorizira prema skali jačine buke od 65 – 95 dB, dobiti će se rezultati koji su izneseni u tablici 19. Budući da se radi o mjernim stanicama koje snimaju uz neposrednu blizinu USS-e na zračnoj luci, može se reći da su rezultati objektivni s obzirom na tipove zrakoplova koji na nju slijeću.

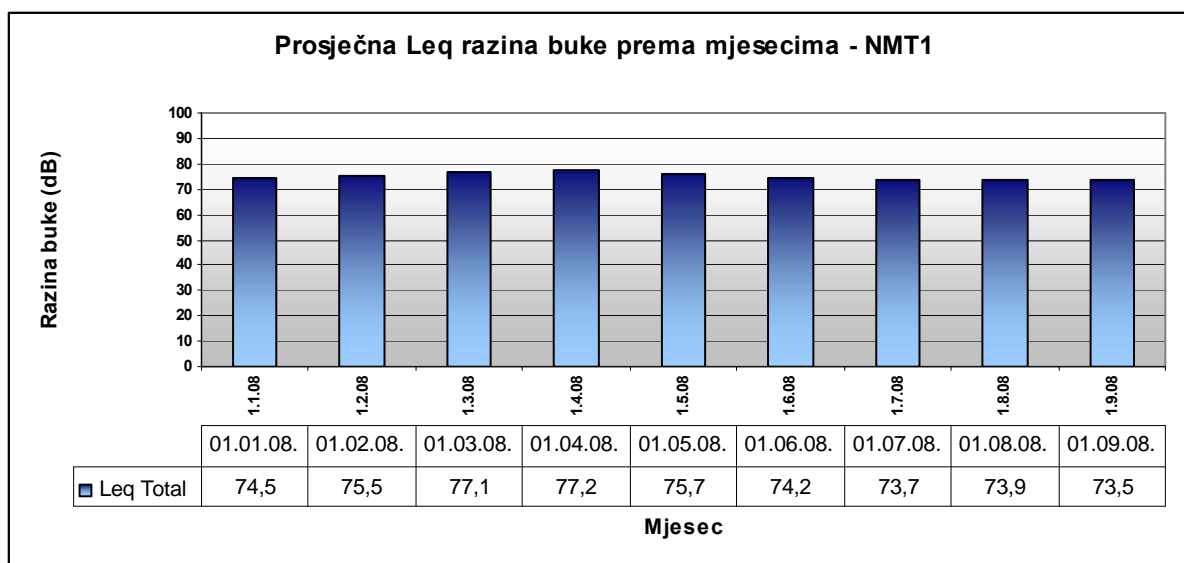
Tablica 19. Prikaz ukupnog broja događaja mjerenja prema skali od 65-95 dB (u blizini USS i terminala).

Skala u dB	Broj mjerenja iznad 65 dB (listopad)	
	Prag 05	Prag 23
65 - 69.99	3357	4032
70 - 74.99	3886	4436
75 - 79.99	2931	1657
80 - 84.99	1153	2584
85 - 89.99	131	273
90 - 94.99	76	127

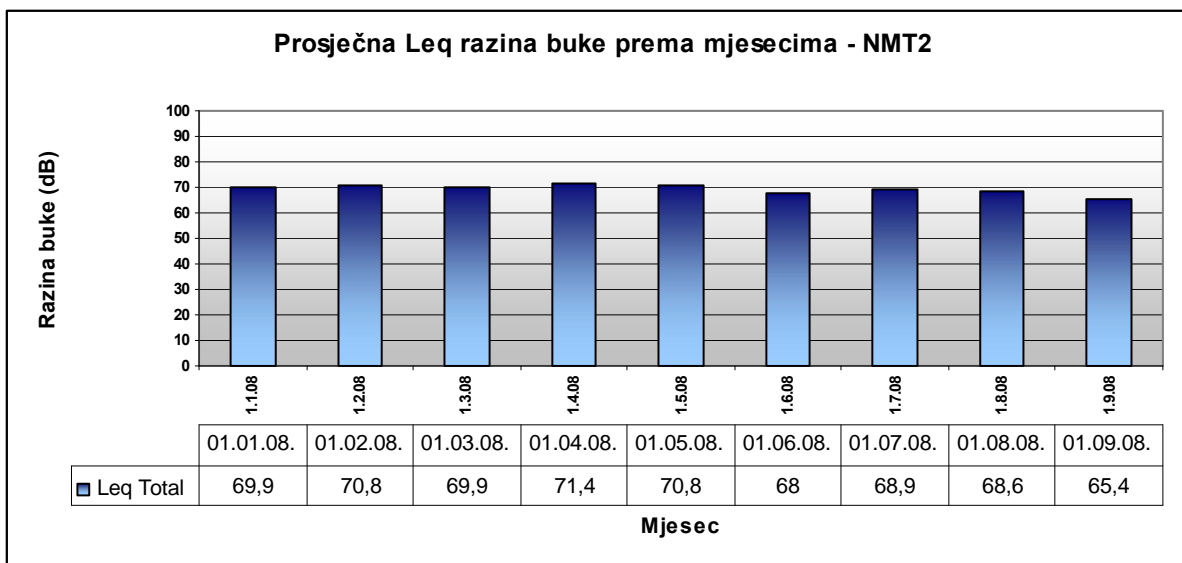
Iz tablice 19. vidljivo je da se najveći broj mjerenja nalazi u dijelu od 65 – 75 dB. Ove vrijednosti su rezultat najviše vršenju operacija zrakoplova Airbus, Boeing i ATR koji imaju ekvivalentnu razinu buke unutar tih vrijednosti.

Ekvivalentna razina buke (Leq) na stanicama NMT1 i NMT2 prema mjesecima

Obradom mjerenih podataka na stanicama NMT1 i NMT2 i analizom Leq-a od 01.01. do 30.09.2008. dobiveni su slijedeći rezultati. Za ovo mjerenja važno je napomenuti da se stanice nalaze na pragovima USS-e.



Grafikon 5. Pregled prosjeka Leq po mjesecima na stanici NMT 1 unutar zone Zračne luke Zagreb



Grafikon 6. Pregled prosjeka Leq po mjesecima na stanici NMT 2 unutar zone Zračne luke Zagreb

Izračun Lden-a za razdoblje od 01.01. – 30.09.2008. unutar zone Zračne luke Zagreb

L_{den} je glavna vrijednost koja se računa pri mjerenju buke na zračnim lukama. L_{den} , kao što je i ranije navedeno, označava nivo buke u tri zasebna razdoblja dana. Prvi dio je u vremenskom periodu od 06:00 – 18:00 (dan), drugi 18:00 – 22:00 (večer), dok je treći od 22:00 – 06:00 (noć). S obzirom na lokalno stanovništvo koje živi u neposrednoj blizini zračne luke, sistem automatski računa i penalizaciju ukoliko zrakoplovi prijeđu određenu razinu buke. Tako je određeno da se za razdoblje dana uzima penalizacija 0 tj. nema penalizacije, iz razloga jer je većina ljudi budna i prisutni su ostali zvukovi. Za večer se uzima penalizacija od 5 dB, dok se za noć uzima penalizacija 10 dB. L_{den} se može izračunati prema formuli:

$$L_{den} = 10 \lg \frac{1}{24} \left[14 \cdot 10^{0,1L_{day}} + 2 \cdot 10^{0,1(L_{evening}+5)} + 8 \cdot 10^{0,1(L_{night}+10)} \right] \quad (12)$$

Izvor: Izvor : EU direktiva

gdje su:

L_{day} – A-vrednovana ekvivalentna razina buke definirana u ISO 1996-2 utvrđivana svakog dana tijekom jedne godine,

$L_{evening}$ – A-vrednovana ekvivalentna razina buke definirana u ISO 1996-2 utvrđivana svake večeri tijekom jedne godine,

L_{night} – A-vrednovana ekvivalentna razina buke definirana u ISO 1996-2 utvrđivana svake noći tijekom jedne godine.⁷

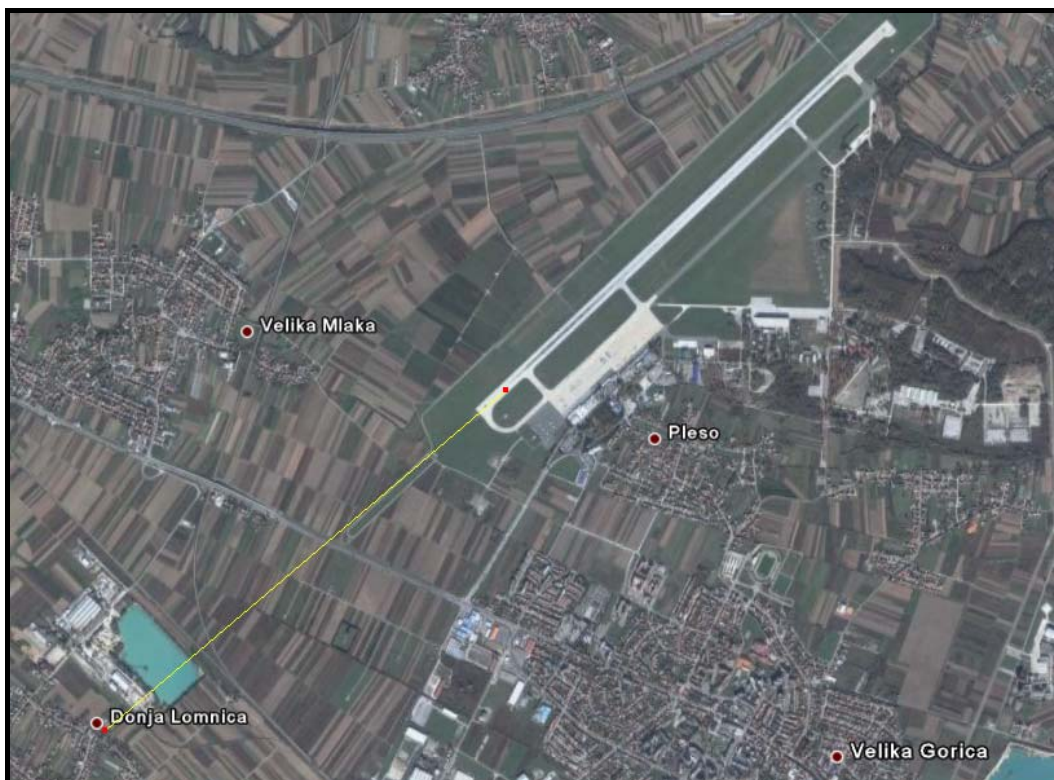
⁷ Official Journal of the European Communities; **Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council**; 25. June 2002.

S obzirom na novu implementaciju sustava i veliku bazu podataka u ovom magistarskom radu bit će prikazana vrijednost Lden-a prema mjesecima i to za razdoblje od 01.01. do 30.09.2008. Prema formuli mora se raščlaniti buka prema periodu u danu kako bi se mogla dodati penalizacija. Iz mjerenja i obrade baze podataka dobiveni su slijedeći rezultati za već spomenuto vremensko razdoblje na Zračnoj luci Zagreb te dodatnih izračuna može se konstatirati da je vrijednost Lden-a na području uz USS-u i terminal tj. stajanku za NMT1 u prosijeku 78,5 dB, dok za NMT2 iznosi 72,7 dB.

5.7.2 Mjerenje buke zrakoplova izvan područja Zračne luke Zagreb - selo Donja

Lomnica

U dosada navedenom tekstu rečeno je da je na Zračnoj luci Zagreb 90-postotna iskoristivost praga 05, u odnosu na prag 23 koji se koristi samo 10 posto. Tim podatkom se lako može zaključiti da su naselja na koridoru slijetanja zbog manjega kuta prilaza više ugrožena. Za standardni prilaz na Zračnu luku Zagreb koristi se PAPI sustav sa kutom poniranja od 3 stupnja. Sukladno tome mogla bi se odrediti putanja i visina preleta zrakoplova iznad sela Donja Lomnica. Selo Donja Lomnica nalazi se na udaljenosti 3015 metara od praga uzletno sletne staze 05. S obzirom da nema fizičke barijere smjer širenja zvuka je moglo bi se reći nesmetan. Visina na kojoj bi se zrakoplov ukoliko poštuje standardni prilaz trebao nalaziti je oko 158 metara iznad naseljenog područja Donja Lomnica.



Slika 49. Položaj sela Donja Lomnica u odnosu na Zračnu luku Zagreb

U svrhu provjere razine buke odrađeno je probno mjerenje izvan zone Zračne luke Zagreb pri čemu se koristila ručna mobilna mjerna stanica Type 2250. S tom je stanicom u području Donja Lomnica izvršeno mjerenje buke zrakoplova (event podaci) pri polijetanju i slijetanju u vremenu vršnog opterećenja te su zabilježeni slijedeći rezultati.

Tablica 20. Vrijednosti buke preleta (event – trajanje oko 15-30 sekundi) pri polijetanju

Vrijeme preleta	Tip zrakoplova	LA _{eq} vrijednost dB	LA _{max} vrijednost dB
13:55	A319	64,1	70,2
14:09	ATR-42	58,2	67,2
14:21	A319	62,5	72,0
14:27	F100	64,2	70,4
14:30	A319	64,0	71,1
14:33	ATR-42	62,6	67,0
14:57	B737	61,6	71,4
15:24	TU154	72,7	81,2



Slika 50. Smjer polijetanja zrakoplova iznad naselja Donja Lomnica

Zrakoplovi osim TU154 (SU), ATR-42 (OK) i F100 (TradeAir) koristili su na slici prikazan crveni smjer polijetanja, dok su ostali zrakoplovi koristili zeleni smjer. Iz podataka dobivenih mjerenjem može se ustvrditi da je buka u preletu na zemlji, tj. rubnom području Donje Lomnice bila ispod 65 dB osim zrakoplova TU154 koji je bukom premašio graničnu vrijednosti. U ovome mjerenju bitno je istaknuti i buku koja nije nastala preletima zrakoplova već cestovnim prometom (kamioni) te je iznosila $L_{Aeq}=64,3$ dB, što također pridonosi osjećaju porasta buke.



Slika 51. Mobilna stanica za mjerenje buke zrakoplova Type 2250



Slika 52. Terensko mjerenje buke - preleti zrakoplova iznad Donje Lomnice

Kako bi se došlo do podataka o buci u slijetanju napravljeno je i mjerenje buke na istoj lokaciji na području D. Lomnice. Podaci o buci (events) prikazani su u tablici.

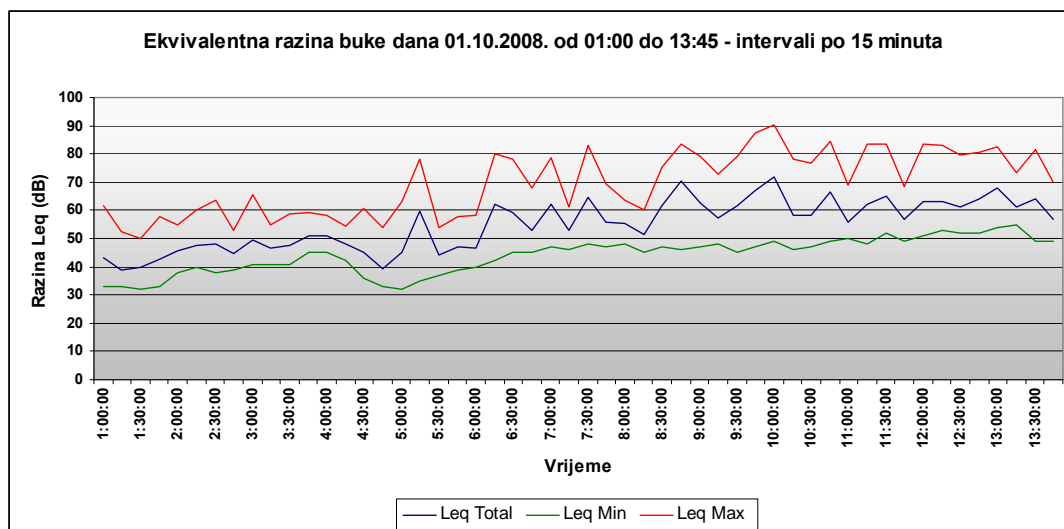
Tablica 21. Vrijednosti buke (event – trajanje oko 15-30 sekundi) pri slijetanju iznad naselja Donja Lomnica

Vrijeme preleta	Tip zrakoplova	LAeq vrijednost dB	LAmx vrijednost dB
12:22	DH84	61,2	72,1
12:47	AT42	61,1	71,7
13:05	A319	61,9	73,9
13:12	A319	61,4	71,2
13:44	A319	61,2	68,3

Iz mjerenja može se konstatirati da je buka pri slijetanju bila je kontinuirano ispod 65 dB.

Dnevno mjerenje buke mobilnom stanicom u naselju Donja Lomnica

U svrhu daljnjega praćenja buke zrakoplova u naselju Donja Lomnica, Zračna luka Zagreb postavila je mobilnu stanicu NMT 4 na lokaciju gdje je smješten vatrogasni dom u Donjoj Lomnici. Obzirom da je postavljenje stanice nakon odgovarajućih priprema odrađeno 01.10.2008. napravljena je analiza podataka kroz taj dan. Mjerenja su vršena od 01:00 do 13:45 svakih 15 minuta. Sve vrijednosti toga mjerenja mogu se vidjeti na grafikonu. Na grafikonu se može primijetiti niža razina Leq preko noći, dok se razina buke povećava prema kasnijim dijelovima jutra i podneva. Za mjerenje dana 01.10.2008. ustanovljena je prosječna vrijednost ekvivalentne razine buke u naselju Donja Lomnica prema intervalima mjerenja svakih 15 minuta $Leq=55,12$ dB



Grafikon 7. Prikaz Leq na dan 01.10.2008. kroz period od 01:00 do 13:45 h



Slika 53. Lokacija mobilne stanice NMT 4

5.8. Određivanje razine buke u odnosu na zrakoplov pri slijetanju i polijetanju sa Zračne luke Zagreb

5.8.1. Slijetanje

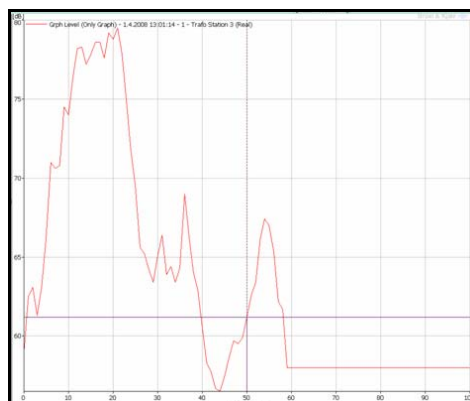
Za određivanje razine buke u odnosu na visinu zrakoplova, pratio se zrakoplov iz Splita za Zagreb u slijetanju. Pri toj je operaciji zrakoplov slijetao na prag uzletno sletne staze 05, pri čemu je preletio mjernu stanicu NMT 1. Kako bi se odredio tip zrakoplova i buke koju proizvodi, potrebno je bilo načiniti korelaciju između sustava za praćenje zrakoplova Zračne luke Zagreb FAIS i sustava za snimanje buke ENM-a. Praćeni zrakoplov je Airbus 320 koji je sletio na zračnu luku Zagreb u 13:02.

S	Flt/No	Org	via	STA	PTA	ATA/E	Onb	T	B/C	Gate	Std	TT	Remk	Dy	Type	Regist.	Li	LT	Rotation
N	OU 417	FRA		1125		1138	1143	1	I01	IARR	09	11	DEL		EA322	9ACTF			OU 656
N	AF 1254	CDG		1140		1131	1136	1	I01	IARR	02	11	ONT		CRJ7	FGRZC			AF 1255
N	4U 8978	SXF		1155		1143	1148	1	I01	IARR	03	11	ONT		AB319	DAKNN			4U 8979
N	LH 3492	MUC		1205		1206	1211	1	I01	IARR	04	11	ONT		CRJ9	DACKE			LH 3493
N	TP 7992	MUC		1205		1206	1211	1	I01	IARR	04	80	ONT		CRJ9	DACKE			
	VMP 140	SIR		1305				1		IARR		60	CNL	X	LR45				
N	OU 655	SPU		1305		1302	1307	1	I02	DARR	08	11	ONT		EA322	9ACTK			OU 380
N	OU 451	AMS		1310		1314	1319	1	I01	IARR	07	11	ONT		AB319	9ACTL			OU 662
N	OK 818	PRG		1310		1322	1325	1	I01	IARR	02	11	ONT		AT42	OKVFI			OK 819

Time Start	Location Index	Location Description	Time Max	Time End	Giph Lev.	Level Leq [dB]	Level Max	Level SEL	Duration
1.4.2008 12:33:26	2	Trafo Station 4	1.4.2008 12:33:45	1.4.2008 12:34:10	System Byte[]	84.2	92.1	100.4	
1.4.2008 12:36:08	2	Trafo Station 4	1.4.2008 12:36:25	1.4.2008 12:36:48	System Byte[]	80.7	87.3	96.5	
1.4.2008 12:38:39	2	Trafo Station 4	1.4.2008 12:38:58	1.4.2008 12:39:32	System Byte[]	77.1	84.4	94.2	
1.4.2008 12:41:05	2	Trafo Station 4	1.4.2008 12:41:22	1.4.2008 12:41:41	System Byte[]	78.0	84.4	93.2	
1.4.2008 12:47:01	1	Trafo Station 3	1.4.2008 12:47:09	1.4.2008 12:48:31	System Byte[]	67.1	76.6	85.9	
1.4.2008 12:50:57	1	Trafo Station 3	1.4.2008 12:50:49	1.4.2008 12:59:38	System Byte[]	77.1	94.1	99.6	
1.4.2008 12:59:31	2	Trafo Station 4	1.4.2008 12:59:41	1.4.2008 13:00:05	System Byte[]	78.4	84.0	93.6	
1.4.2008 13:01:14	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:01:35	1.4.2008 13:02:12	System Byte[]	72.5	79.5	89.7	
1.4.2008 13:04:17	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:06:26	1.4.2008 13:07:21	System Byte[]	67.2	77.3	89.4	
1.4.2008 13:09:07	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:10:22	1.4.2008 13:10:23	System Byte[]	60.8	65.2	79.6	
1.4.2008 13:13:51	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:14:07	1.4.2008 13:14:39	System Byte[]	72.2	79.8	88.4	
1.4.2008 13:15:51	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:15:59	1.4.2008 13:16:10	System Byte[]	67.7	75.5	79.7	
1.4.2008 13:16:26	1	Trafo Station 3	1.4.2008 13:16:28	1.4.2008 13:16:37	System Byte[]	61.9	64.3	72.2	

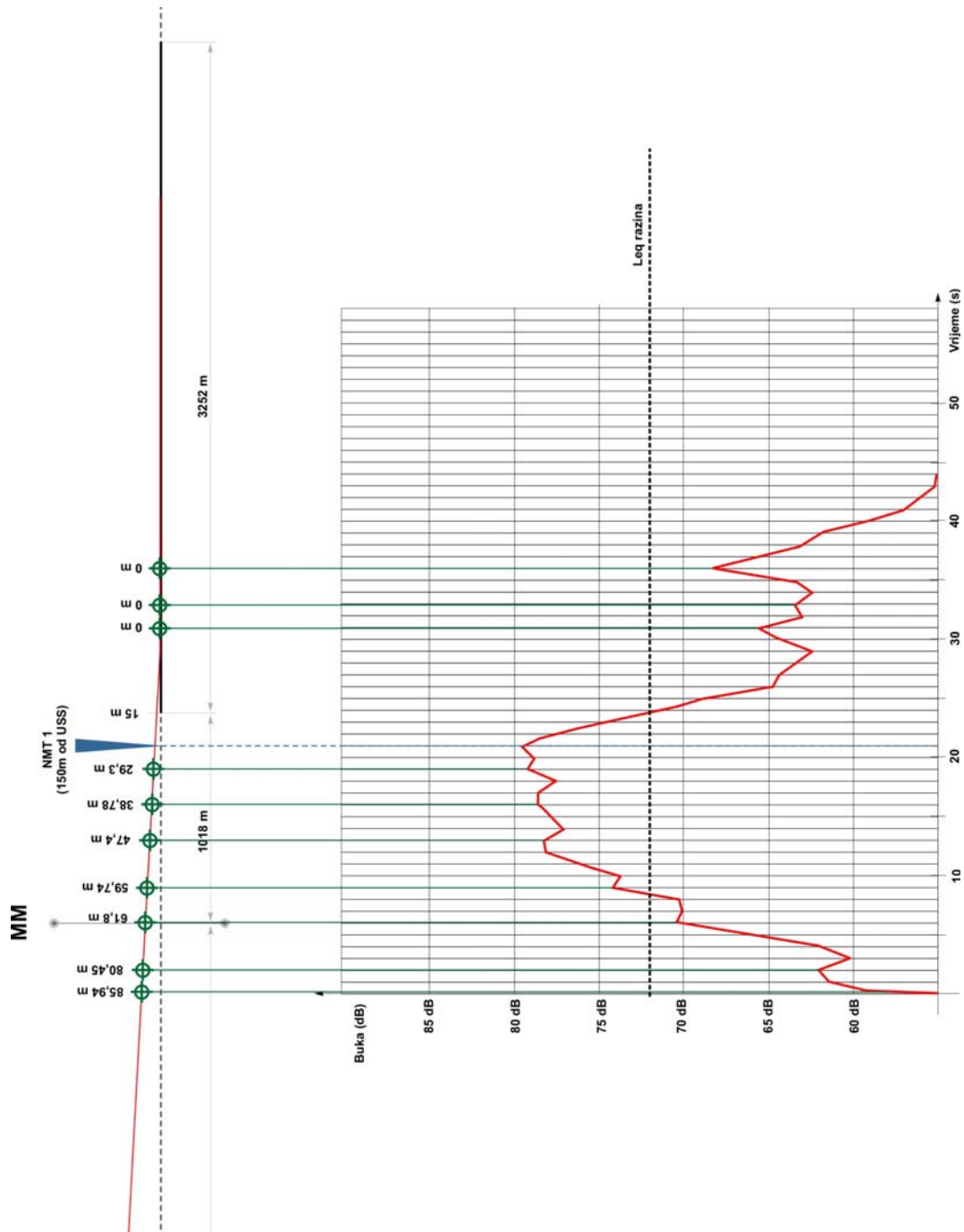
Slika 54. Korelacija između FAIS i ENM programa za praćeni zrakoplov u slijetanju

Preko programa ENM načinjen je grafikon buke toga zrakoplova pri preletu mjerne stanice.



Slika 55. Prikaz grafikona buke praćenog zrakoplova u slijetanju

Daljnjom obradom podataka, izrađen je grafički prikaz razine buke te je pridružen vrijednostima za standardno slijetanje pod kutom od 3 stupnja, pri čemu se izradila korelacija između razine buke u određenim trenucima leta i visine na kojoj se zrakoplov nalazi.



Slika 56. Korelacija razine buke zrakoplova sa položajem i visinom u slijetanju u odnosu na podatke mjerene na stanicima

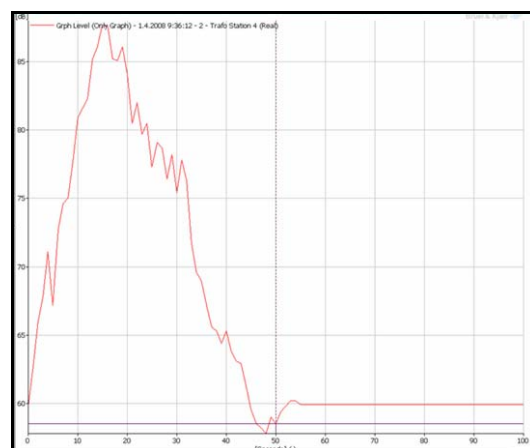
5.8.2. Polijetanje

Za praćenje razine buke pri polijetanju, također se pratio zrakoplov Airbus 320 u fazi polijetanja. Zrakoplov je polijetao sa praga 05 te je preletio mjernu stanicu NMT2. Kako bi se utvrdila valjanost podataka sa mjerne stanice i tim se podacima pridružila vrijednost razine buka koja je snimljena te se morala načiniti korelacija između sustava za praćenje zrakoplova Zračne luke Zagreb FAIS i sustava za snimanje buke ENM-a. Oba su sustava pokazala polijetanje zrakoplova tipa Airbus 320 u 9:37 minuta.

S	Flt/No	Des	Via	STD	Ofb	ATD/E	PTD	Slot	Std	Type	Regist.	Rotation	TT	Remk	Dy	T	Gate	CI/Cntr	Li	LT
S	OU 416	FRA		0905	0908	0920			08	EA322	9ACTM	OU 381	11				16			
S	LH 3491	MUC		0910	0925	0933			07	DH83	DBACH	LH 3490	11				18			
S	TP 7989	MUC		0910	0925	0933			07	DH83	DBACH		80				18			
S	GDK01CB	OMO		0930	0928	0936			16	C560	OEGCB	GDK01CB	60		I	1				
S	8P 172	SJJ		0930	0943	0959			20	O410	9ABTC	8P 172	12		I					
S	OU 490	LHR		0935	0928	0937			04	EA322	9ACTJ	OU 631	11				13			
S	GAV 003	LCK		1005	1005	1013			G11	C210	N50DD	GAV 002	51		I					
S	GAV 002	RJK		1005	1005	1015			G46	PA18	9ADKH	GAV 005	54	SCH	I					
S	MA 471	BUD		1025	1023	1028			05	E120	HAFAI	MA 470	11			1	15		2,3	

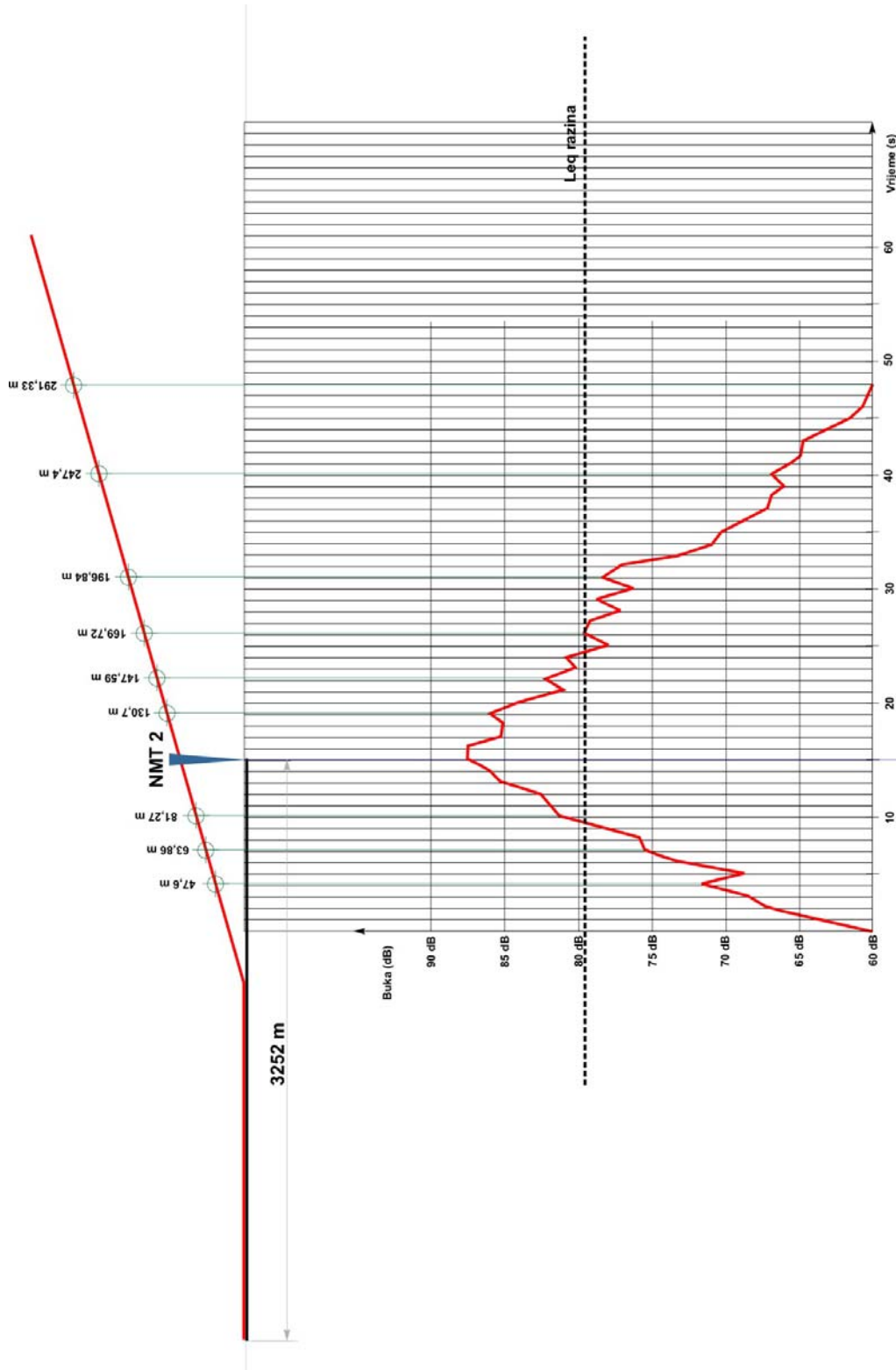
Time Start	Location Index	Location Description	Time Max	Time End	Grph Lev..	Level Leq [dB]	Level Max	Level SEL	Duration
1.4.2008 4:54:47	1	Trafo Station 3	1.4.2008 4:55:05	1.4.2008 4:55:57	System Byte[]	50,8	53,2	69,2	
1.4.2008 4:56:33	2	Trafo Station 4	1.4.2008 4:56:55	1.4.2008 4:58:41	System Byte[]	54,6	61,5	75,7	
1.4.2008 4:56:42	1	Trafo Station 3	1.4.2008 9:55:59	1.4.2008 10:38:25	System Byte[]	83,4	117,4	126,6	
1.4.2008 4:59:51	2	Trafo Station 4	1.4.2008 5:10:40	1.4.2008 5:12:25	System Byte[]	53,7	59,6	82,5	
1.4.2008 5:13:06	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:22:31	1.4.2008 9:29:56	System Byte[]	66,8	91,5	108,7	
1.4.2008 9:31:45	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:31:50	1.4.2008 9:32:42	System Byte[]	67,8	74,1	85,3	
1.4.2008 9:33:48	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:34:04	1.4.2008 9:34:12	System Byte[]	72,4	76,3	86,0	
1.4.2008 9:36:12	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:36:27	1.4.2008 9:37:05	System Byte[]	79,6	88,3	96,4	
1.4.2008 9:38:00	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:38:19	1.4.2008 9:38:41	System Byte[]	82,6	90,6	98,3	
1.4.2008 9:46:04	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:46:17	1.4.2008 9:46:19	System Byte[]	66,7	69,7	78,5	
1.4.2008 9:49:35	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:50:07	1.4.2008 9:50:48	System Byte[]	69,0	77,7	87,3	
1.4.2008 9:56:13	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:56:33	1.4.2008 9:57:33	System Byte[]	100,3	113,6	119,0	
1.4.2008 9:58:32	2	Trafo Station 4	1.4.2008 9:58:44	1.4.2008 9:58:57	System Byte[]	68,8	74,5	82,7	

Slika 57. Korelacija između FAIS i ENM programa za praćeni zrakoplov u polijetanju



Slika 58. Prikaz grafikona buke praćenog zrakoplova u polijetanju

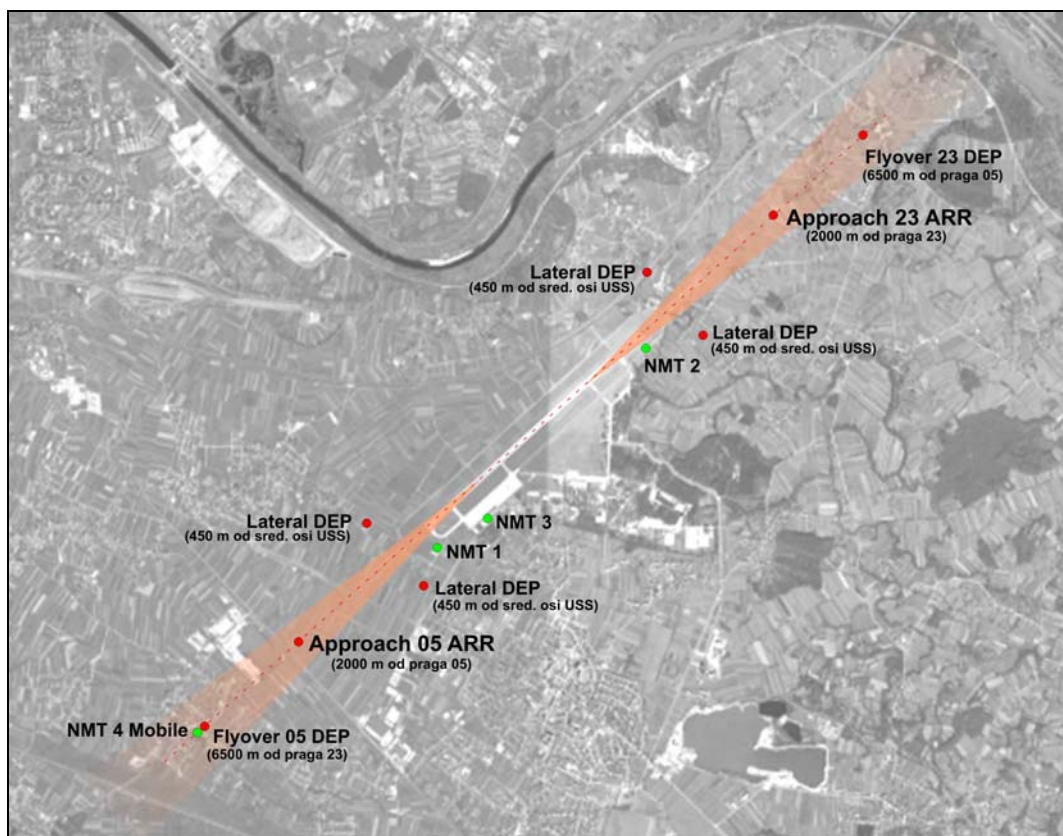
Daljnjom obradom podataka izrađen je grafički prikaz razine buke u trenutku polijetanja te je izrađena korelacija grafičkog prikaza i kuta penjanja, što je rezultiralo lociranjem položaja zrakoplova, tj. njegovom visinom, u odnosu na buku koja je snimljena na stanici.



Slika 59. Korelacija razine buke zrakoplova sa položajem i visinom u polijetanju u odnosu na podatke mjerene na stanici

5.8.3. Korelacija razine buke na NMT stanicama i vrijednosti definiranih certifikacijom zrakoplova (ICAO certifikati)

Svaki zrakoplov nakon izlaska iz tvornice mora proći certifikaciju buke prilikom čeka se dobiva potvrda o njegovoj razini buke koja je mjerena na 3 točke u operacijama slijetanja i polijetanja. Prilikom certificiranja zrakoplova koristi se veličina buke pod nazivom *Efektivna opažena razina buke* koja ima oznaku EPNL (Effective Perceived Noise Level). EPNL je veličina koja je propisana da se koristi prema ICAO dodatku 16. Certifikacija buke radi se na mjerenju tri točke (mjerne stanice) za čije je postavljanje (lokaciju) točno propisana udaljenost. Certifikacijom buke prilikom izlaska zrakoplova iz tvornice prikazuje vrijednosti koje bi mogli nazvati idealnima jer su pri toj certifikaciji strogo praćena procedura prilaza, tu se misli na kut prilaza i potisak, te polijetanja. Propisane udaljenosti za certifikaciju zrakoplova su sljedeće: u slijetanju – NMT mora biti na lokaciji ispod samoga koridora na udaljenosti 2000 metara od početka USS-e (praga), lateralna točka – NMT se nalazi 450 metara odmaknuta u jednu ili drugu stranu od središnjice USS-e, u polijetanju – NMT se nalazi na udaljenosti 6500 metara od početka USS-e (praga) u smjeru polijetanja. Na slici 60. može se vidjeti gdje bi te lokacije bile kada bi se certifikacija izvršila na Zračnoj luci Zagreb. Stanice su postavljene za oba prilaza i odleta.



Slika 60. Raspored lokacije NMT stanica prema propisima za certifikaciju zrakoplova

Obzirom da ENM program za mjerenje buke na Zračnoj luci Zagreb također ima mogućnost mjerenja EPNL (Effective Perceived Noise Level) prema svakom događaju, uz korelaciju sa FAIS (Flight and Airport Information System) sustavom Zračne luke Zagreb može se napraviti uvid u razinu buke prilikom slijetanja i polijetanja. Prema bazi podataka od ICAO-a može se izdvojiti svaki tip zrakoplova koji slijeće i polijeće na Zračnu luku Zagreb te prema stvarnim mjerenjima napraviti usporedba i donijeti zaključak o mogućem prekoračenju EPNL vrijednosti.

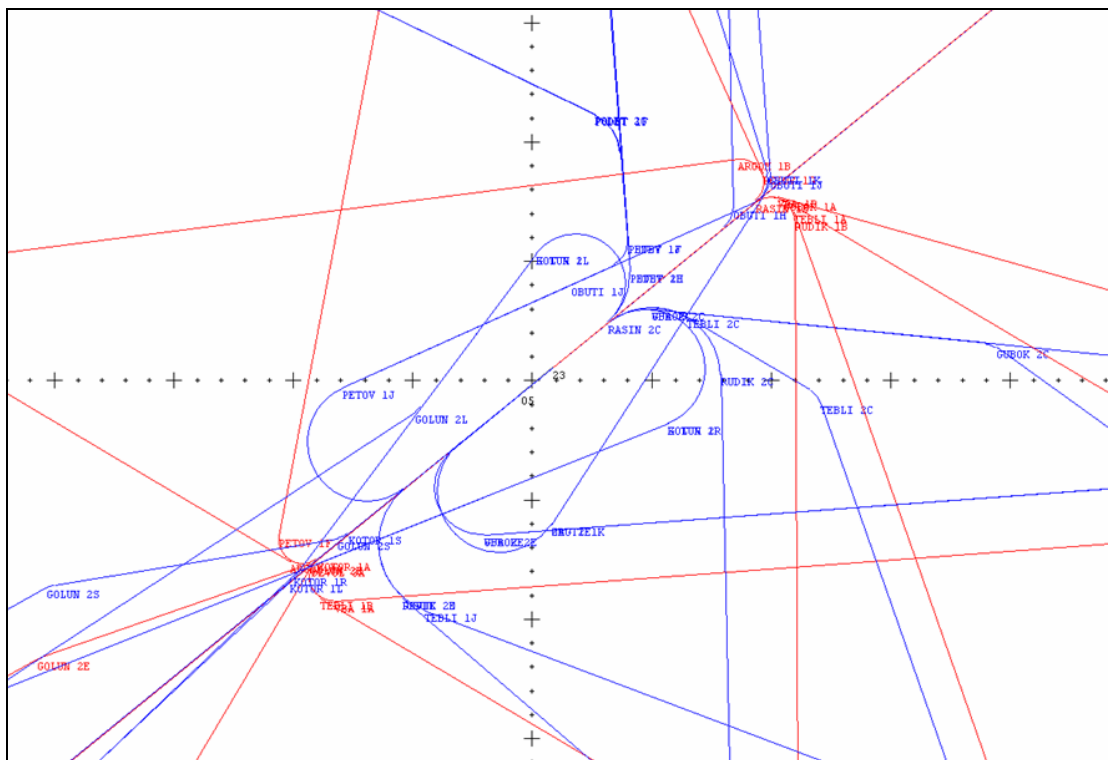
ICAO Noise Data Base		ICAO - OACI - ICAO		ICAO/EPNL/10002	
MANUFACTURER AND MANUFACTURER'S DESIGNATION OF AIRCRAFT					
Manufacturer	AIRBUS				
Commercial name					
Type	A320	Version	212		
ENGINE					
Type	CFM56-5A3				
Number of Engines	2				
Nacelle	short duct				
Propeller					
Thrust (Sea Level Static)	117.88 kN				
ByPass Ratio(SLS)	6.0				
Maximum Take-Off Mass	73500 (Kg)	Slats/Flaps	18/10		
Maximum Landing Mass	64500 (Kg)	Slats/Flaps	27/35		
NOISE CERTIFICATION STANDARD					
Noise Regulation	ICAO Annex 16, Volume I/FAA FAR Part 36				
Chapter or Stage	3				
MODIFICATIONS					
	Aircraft		Engine		
Modification Number			22093		
Modification Description			CFM56-5A3 hardware		
	Lateral/Full-Power	Approach	Flyover		
Noise Level (EPNdB)	94.8	96	86.5		
Noise Limit (EPNdB)	96.8	100.5	91.5		
Margin (EPNdB)	2	4.5	5		
Cumulative Margin (EPNdB)	11.50				
Remarks	Weight variant n° 0, Dossier 00D 090 P4007/C02 issue 2				
Date of Certification	23/04/91	Certification Authority	FAA/JAA		

Giph Lev...	Level Leq...	Level...	Leve...	EPNL	N
System.Byte[]	62,8	107,8	90,8	96,4	63
System.Byte[]	86,2	101,9	98,0	109,0	84
System.Byte[]	77,7	102,0	93,2	102,4	69
System.Byte[]	78,2	99,0	93,2	101,7	92
System.Byte[]	77,5	102,9	94,0	103,1	88
System.Byte[]	81,4	110,8	100,8	112,2	55
System.Byte[]	81,9	0,0	106,6	108,5	76
System.Byte[]	83,1	108,7	107,0	111,6	57
System.Byte[]	78,9	104,1	94,7	102,6	51
System.Byte[]	63,7	78,8	69,8	82,9	65
System.Byte[]	74,0	91,3	81,0	91,0	59
System.Byte[]	77,7	90,1	83,0	92,5	38
System.Byte[]	77,6	89,9	84,6	92,5	38
System.Byte[]	77,4	89,6	84,0	92,3	38
System.Byte[]	77,8	90,2	83,0	92,6	37
System.Byte[]	78,0	90,7	83,7	92,9	40
System.Byte[]	66,3	80,2	74,6	82,2	56
System.Byte[]	91,7	105,7	100,8	106,2	57
System.Byte[]	72,4	86,6	79,0	92,0	58
System.Byte[]	72,2	85,7	77,6	91,1	43

Slika 61. Provjera razine buke sa certifikata i stvarne mjerene vrijednosti

5.9. Integrated Noise Model (INM) – izrada karte kontura buke

Karta kontura buke za Zračnu luku Zagreb izrađuje se na programu Integrated Noise Model (INM). Za izradu karte kontura buke potrebni su podaci koje možemo podijeliti u nekoliko kategorija kao što su: podaci o zračnoj luci (koordinate pragova uzletno sletne staze, nadmorska visina, temperatura, vlaga), vektori koji se koriste pri slijetanju i polijetanju te njihov postotak korištenja, baza podataka sa svim zrakoplovima podijeljenim u grupe (komercijalni, cargo, generalno zrakoplovstvo, vojno), prosjek operacija u danu sa podjelom perioda na dan, večer, noć. Prvi korak pri izradi karte kontura buke je unos vektora pri slijetanju i polijetanju na Zračnu luku Zagreb.



Slika 62. Prikaz prilaznih i odletnih vektora na Zračnoj luci Zagreb izrađenih na INM-u

Prema podacima iz FAIS (Flight and Airport Information System) sustava Zračne luke Zagreb, napravljena je analiza prometa za ovaj znanstveni magistarski rad prema tipovima zrakoplova koji na nju polijeću i slijeću. S obzirom na veliki broj podataka, za vremenski period uzet od 01.01. do 30.09.2008. godine. U nastavku prikazana je tablica sa najzastupljenijim zrakoplovima u mjesecu listopadu.

Tablica 22. Prikaz zastupljenosti komercijalnih zrakoplova prema prometu u razdoblju od 01.01. do 30.09.2008.

Podjela najzastupljenijih zrakoplova prema tipu u razdoblju od 01.01. do 30.09.2008.		
Slijetanje + polijetanje		
Tip zrakoplova	Broj operacija	%
AIRBUS A319-100 (AB319)	6601	19,32
AIRBUS INDUSTRIE A320-200 (EA322)	5225	15,29
AVIONS DE TRANSPORT REGIONAL - ATR 42 (AT42)	3874	11,34
DE HAVILLAND DHC-8 DASH 8-400 (DH84)	2100	6,15
OMNIPOL LET L-410 TURBOLET (O410)	1023	2,99
CANADAIR REGIONAL JET 700 (CRJ7)	970	2,84
FOKKER 100 (FK10)	946	2,77
CESSNA SKYHAWK 172 (C172)	924	2,70
EMBRAER EMB-120 BRASILIA (E120)	689	2,02
PIPER CHEROKEE, ARCHER (PA28)	650	1,90
CESSNA 150 (C150)	517	1,51
CESSNA CITATION II (C550)	516	1,51
DE HAVILLAND DHC-8 DASH 8-300A/B/E (DH83)	498	1,46
CANADAIR REGIONAL JET (CL65)	480	1,40
BOEING 737-300 (B7373)	353	1,03
AVIONS DE TRANSPORT REGIONAL - ATR 42-500 (AT45)	352	1,03
DORNIER DO 328 ALL SERIES (D328)	350	1,02
PIPER SENECA III PA34-220T (PA34)	330	0,97
BOEING 737-800 (B7378)	324	0,95
EMBRAER EMB-145 AMAZON (E145)	324	0,95
CANADAIR REGIONAL JET CRJ-900 (CRJ9)	320	0,94
CESSNA 525 CITATION JET (C525)	287	0,84
PIPER NAVAJO (PA31)	258	0,76
BEECH KING AIR 200 (BE20)	252	0,74
CESSNA 560 XL EXCEL (C56X)	247	0,72
AVIONS DE TRANSPORT REGIONAL - ATR 72 (AT72)	246	0,72
SAAB 2000 (SB20)	220	0,64
FOKKER F-27/500 (FK275)	208	0,61
TUPOLEV TU-154M (TU54M)	208	0,61
BOEING 737-500 (B7375)	200	0,59
FOKKER F-70 (FK70)	198	0,58
CHALLENGER CL601 (CL601)	196	0,57
FOKKER F27 FRIENDSHIP / FAIRCHILD F-27 (FK27)	179	0,52
MCDONNELL-DOUGLAS MD-82 (MD802)	158	0,46
BOEING 737-600 (B7376)	148	0,43
CESSNA CITATION I (C500)	147	0,43
BEECH KING AIR 90 (BE90)	138	0,40
CESSNA CITATION V (C560)	138	0,40
MCDONNELL-DOUGLAS MD-83 (MD803)	115	0,34
TUPOLEV TU-154 (TU54)	112	0,33
BOEING 737-400 (B7374)	102	0,30

Izvor: FAIS, Zračna luka Zagreb

Iz tablice možemo vidjeti da su na prva tri mjesta sa ukupnim postotkom operacija najzastupljeniji zrakoplovi AB319 (Airbus 319), EA322 (Airbus 320) i AT42 (ATR 42), što je

i bilo za očekivati budući da flota Croatia Airlinesa koristi te zrakoplove te ima najviše polijetanja i slijetanja sa Zračne luke Zagreb.

S obzirom da se iz baze podataka analizom moglo očitati stanje zrakoplova prema operacijama polijetanja i slijetanja, slijedeći korak koji je bitan za pristup izrade karte kontura buke zrakoplova je odrediti kategorizaciju navedenih zrakoplova prema:

- pogonu,
- broju motora,
- potisku
- kategoriji buke.

Za dobivanje podataka o tipu i klasifikaciji zrakoplova te kategoriji težine i tipu motora koristila se baza podataka objavljena od HMMH (Harris Miller Miller & Hanson Inc.) Također iz te tablice očitana je i kategorizacija buke za svaki zrakoplov zasebno te broj motora koji taj zrakoplov koristi. Kategorizacija zrakoplova navedena je iz dokumenta o praćenju buke zrakoplova ECAC.CEAC Doc29. U tom dokumentu objavljeni su slijedeći parametri vezani za određivanje buke zrakoplova:

- Podjela prema pogonu zrakoplova: mlazni i ventilatorski (J), turboprop (T).
- Podjela prema maksimalnoj težini pri polijetanju:
 - generalna avijacija – lakši od 5,700 kg (GA)
 - laki zrakoplovi – 5,700 kg do 10,000 kg (L)
 - srednje teški zrakoplovi – 10,000 kg do 50,000 kg (M)
 - teški zrakoplovi – 50,000 kg do 200,000 kg (H)
 - jako teški zrakoplovi – 200,000 kg do 400,000 kg (VH)
 - ultra teški zrakoplovi – iznad 400,000 kg (UH)
- Podjela prema broju motora – zrakoplovi sa dva, tri ili četiri motora
- Podjela prema ICAO Annex 16, Vol 1. certifikaciji o buci
 - kategorija 1 – zrakoplovi koji nisu certificirani
 - kategorija 2 – zrakoplovi čija je certifikacija bila prije 6. listopada 1977.
 - kategorija 3 – zrakoplovi čija je prva certifikacija napravljena nakon 6. listopada 1977. godine⁸

Podaci o težini zrakoplova preuzeti su od službe za uravnoteženje i opterećenje zrakoplova (Load Control) Zračne luke Zagreb. Podaci o maksimalnoj težini pri polijetanju (MTOW) i

⁸ ECAC.CEAC Doc 29; **Report on Standard Method of Computing; Noise Contours around Civil Airports;** European Civilaviation Conference; Second Edition; 1997

maksimalnoj težini u slijetanju preuzeti su iz sustava DCS, WAB2Go i GAETAN. Kako bi dobili valjane težine, svi podaci o težinama iz računala uspoređeni su sa podacima za svaki zrakoplov u njihovim priručnicima.

Tablica 23. Specifikacije komercijalnih zrakoplova koji slijeću na Zračnu luku Zagreb

A/C Tip	Grupa	Kategorija težine	Tip motora	Kategorija buke	Broj motora	Max Takeoff (kg)	Max Landing (kg)	Max stop distance (m)
AB319	COM	H	J	3	2	64000	61000	1335
AT42	COM	M	T	3	2	16900	16400	920
EA322	COM	H	J	3	2	74000	64000	1433
D328	COM	M	T	3	2	13990	13230	918
E145	COM	M	J	3	2	20600	18750	1290
SB20	COM	M	T	3	2	22800	22000	1024
DH84	COM	M	T	3	2	15650	15400	914
CRJ9	COM	M	J	3	2	37995	34065	1010
CRJ7	COM	M	J	3	2	33995	30390	1082
B7373	COM	H	J	3	2	61250	51700	1400
CL65	COM	M	J	3	2	18642	16200	1075
FK70	COM	M	J	3	2	39915	36740	1412
AT72	COM	M	T	3	2	23500	21350	1017
B7378	COM	H	J	3	2	79000	66400	1655
DH83	COM	M	T	3	2	19500	19050	1066
AT45	COM	M	T	3	2	19600	18300	965
TU54M	COM	H	J	2/3	3	100000	80000	1677
B7376	COM	H	J	3	2	70000	58600	1354
TU54	COM	H	J	2	3	90000	78000	1677
FK10	COM	M	J	3	2	43100	38780	1389
BA468	COM	M	J	3	4	43995	38555	1207
MD802	COM	H	J	3	2	67800	59950	1481
B7377	COM	H	J	3	2	70000	58600	1354
B7375	COM	H	J	3	2	60500	50350	1390
EA321	COM	H	J	3	2	89000	75500	1530
MD803	COM	H	J	3	2	72500	63300	1584
B7374	COM	H	J	3	2	68000	56200	1540

Izvor: INM Training Manual, B&K, HMMH, Denmark, 2006.

Legenda:

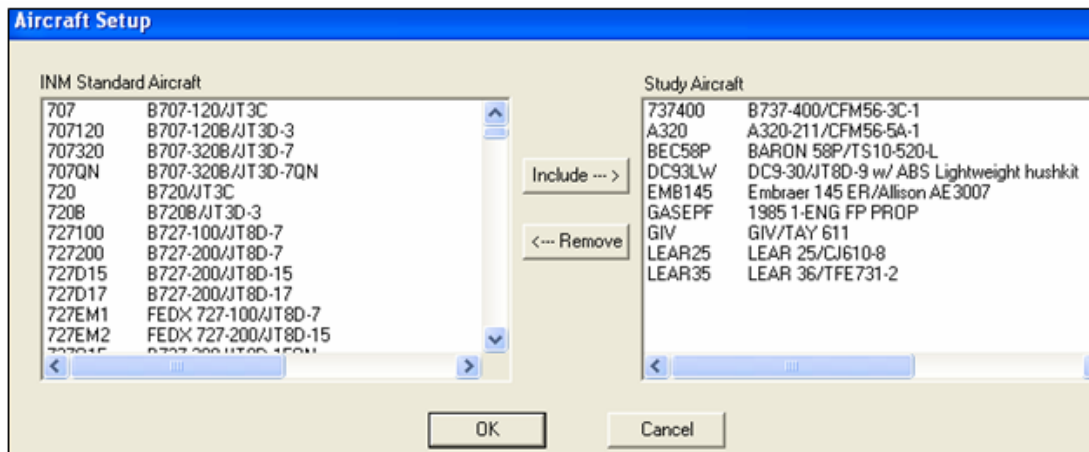
Grupa: COM – komercijalni zrakoplov

Kategorija: L (Light aircraft) – lagani zrakoplov, M (Medium aircraft) – srednje teški zrakoplov, H (Heavy aircraft) – teški zrakoplov

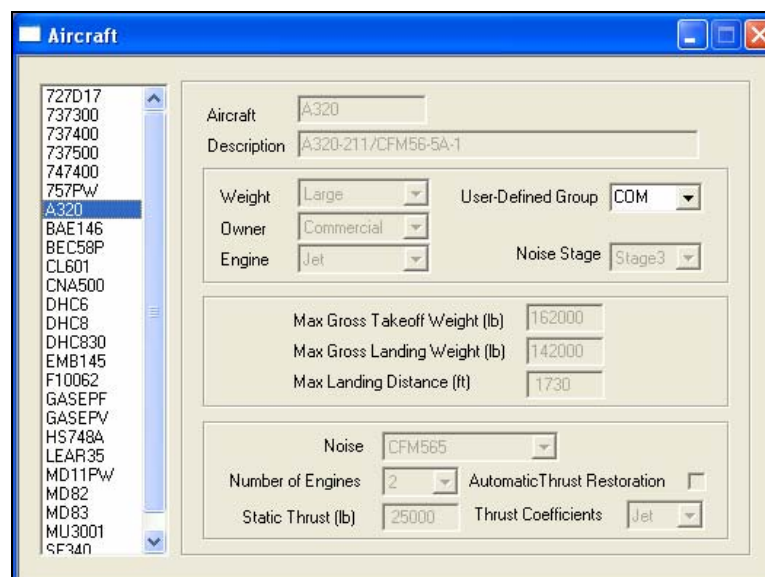
Tip motora: J – Jet ; T – Turboprop

Iz tablice 20. može se primijetiti da svi zrakoplovi osim TU154 i TU154M su zrakoplovi koji se nalaze u 3 kategoriji buke, što bi značilo da su to zrakoplovi 3 generacije (prva certifikacija

napravljena nakon 6. listopada 1977. godine). TU154 je zrakoplov koji pripada 2 generaciji kategorije buke. TU154M ima oznaku 2/3 jer je na takav tip Tupoleva ima mogućnost ugradbe hush kit sustav za redukciju buke te se time taj zrakoplov nalazi u 3 generaciji. Nakon obrade podatka vezanih za zrakoplove te njihovu klasifikaciju potrebno je u INM program unijeti te podatke preko njegove baze.

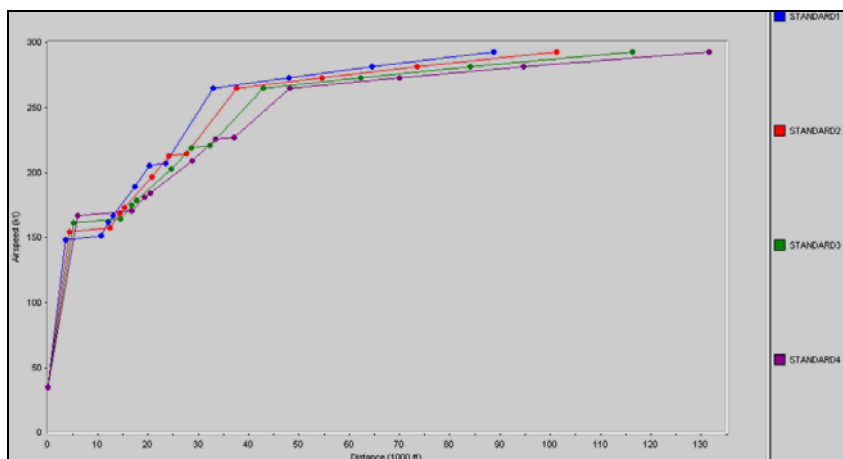


Slika 63. INM baza podataka

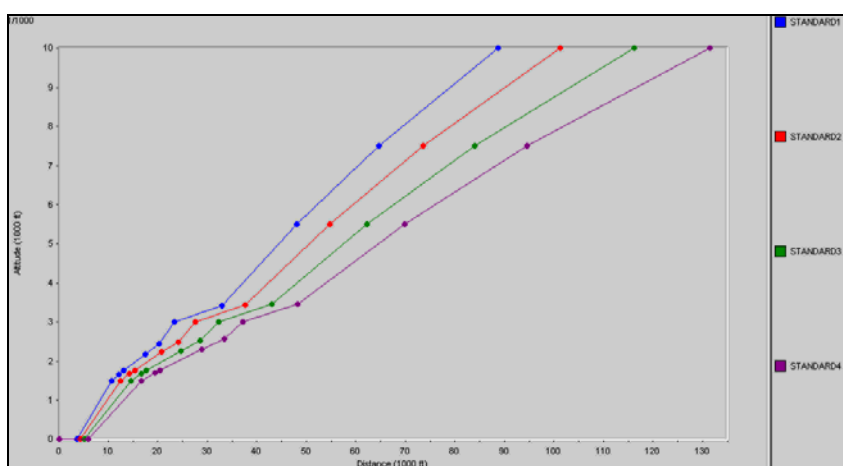


Slika 63. Specifikacija zrakoplova iz baze podataka

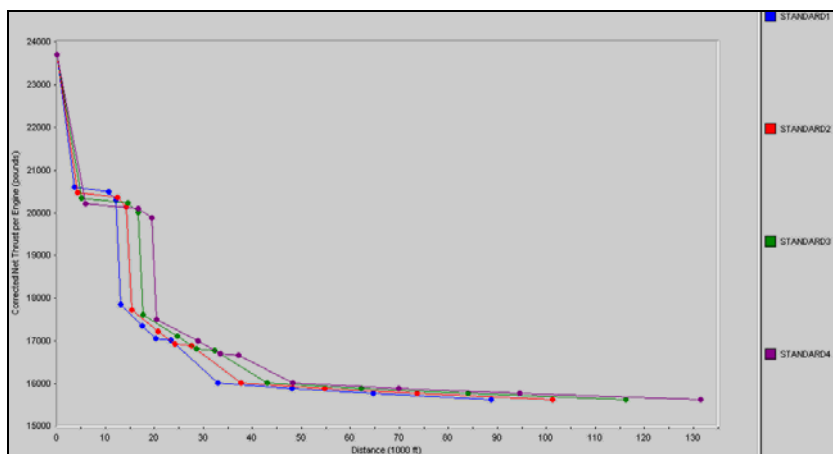
Procedure polijetanja i slijetanja definirane su unutar programa te se za izradu karte buke koristile iste. U nastavku na grafikonima prikazane su vrijednosti odnosa potiska, visine, doleta za zrakoplove koji se koriste u svrhu izrade karte kontura buke na Zračnoj luci Zagreb. U slijetanju koriste se dvije procedure (step down i CDA), dok se četiri procedure ovisno o zrakoplovu koriste za polijetanje.



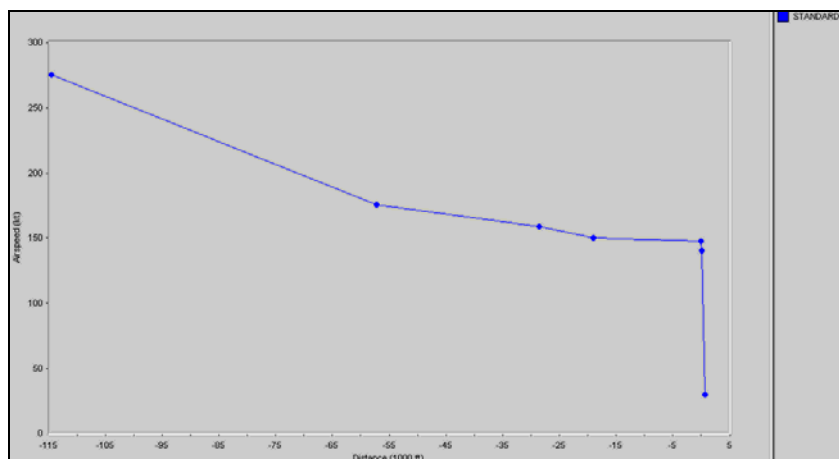
Grafikon 8. Standardni odnos brzine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju



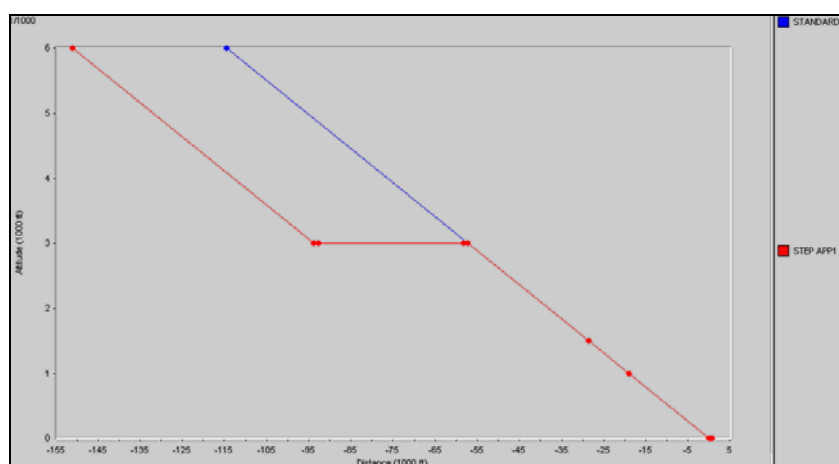
Grafikon 9. Standardni odnos visine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju



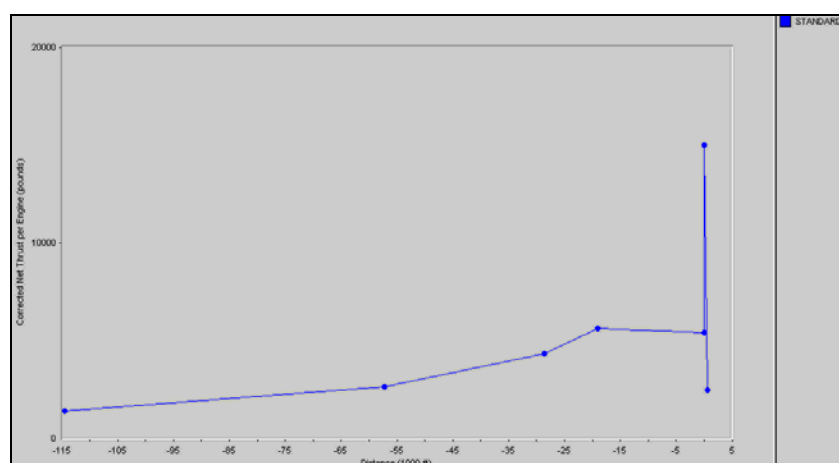
Grafikon 10. Standardni odnos potiska i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju



Grafikon 11. Standardni odnos brzine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju



Grafikon 12. Standardni odnos visine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju (CDA i Step down)



Grafikon 13. Standardni odnos potiska i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju

Svaki unos podataka može se provjeriti preko ukupnog izvještaja INM programa. Na slici 65.. prikazan je primjer izvještaja za ovu kartu buke

```

SF340 Standard data

STUDY SUBSTITUTION AIRCRAFT
Name Description
Acft Percent

USER-DEFINED NOISE CURVES
Type Thrust Op 200 400 630 1000 2000 4000 6300 10000 16000

USER-DEFINED METRICS
Name Type Family Day Eve Night 10Log(T)
LDEN Exposure A-weighted 1.00 3.16 10.00 49.37

USER-DEFINED PROFILE IDENTIFIERS
Op Profile Stg Weight(lb)
A320
APP STEP APP 1 128000

USER-DEFINED PROCEDURAL PROFILES
# StepType Flap ThrType Alt/Clm Speed(kt) Ang/Thr
A320-APP-STEP APP-1
1 Descend ZERO None 6000.0 ft 250.0 3.0
2 Level ZERO None 3000.0 ft 167.1 35532.0
3 Descend INTR None 3000.0 ft 167.1 3.0
4 Descend D-20 None 1500.0 ft 154.4 3.0
5 Descend D-35 None 1000.0 ft 147.1 3.0
6 Land D-35 None 60.3 ft 0.0 0.0
7 Decelerate D-35 None 542.7 ft 139.5 60.0
8 Decelerate -NONE- None 0.0 ft 30.0 10.0

USER-DEFINED FIXED-POINT PROFILES
# Dist(ft) Alt(ft) Spd(kt) Thrust OpMode

USER-DEFINED FLAP COEFFICIENTS
Acft Flap Op Coeff-R Coeff-C/D Coeff-B

USER-DEFINED JET THRUST COEFFICIENTS
Acft ThrType Coeff-E Coeff-F Coeff-Ga Coeff-Gb

USER-DEFINED PROP THRUST COEFFICIENTS
Name ThrType Efficiency Power

USER-DEFINED GENERAL THRUST COEFFICIENTS
Acft Type Coeff-E Coeff-F Coeff-Ga Coeff-Gb Coeff-H

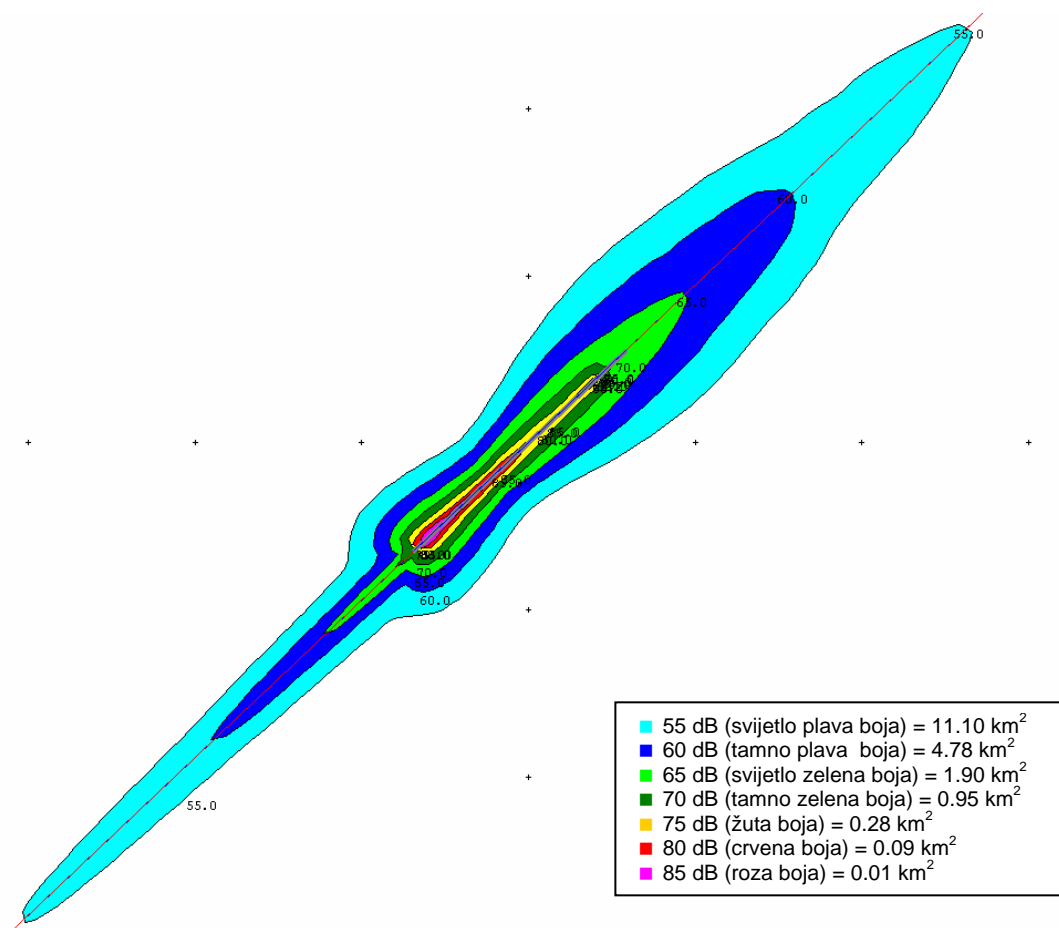
CASE FLIGHT OPERATIONS
Acft Op Profile Stg Rwy Track Sub Group Day Evening Night
727D17 DEP STANDARD 2 05 DEPO5X 0 COM 0.5400 0.0000 0.0000
727D17 DEP STANDARD 2 23 DEP23X 0 COM 0.0600 0.0000 0.0000
737300 DEP STANDARD 1 05 DEPO5X 0 COM 0.7200 0.0000 0.0000
737300 DEP STANDARD 1 23 DEP23X 0 COM 0.0800 0.0000 0.0000
737400 DEP STANDARD 1 05 DEPO5X 0 COM 0.1600 0.0000 0.0000
737400 DEP STANDARD 1 23 DEP23X 0 COM 0.0200 0.0000 0.0000
737500 DEP STANDARD 1 05 DEPO5X 0 COM 0.8100 0.0000 0.0000
737500 DEP STANDARD 1 23 DEP23X 0 COM 0.0900 0.0000 0.0000
747400 DEP STANDARD 5 05 DEPO5X 0 COM 0.3942 0.0900 0.0252
747400 DEP STANDARD 5 23 DEP23X 0 COM 0.0438 0.0100 0.0028
757PW DEP STANDARD 5 05 DEPO5X 0 COM 0.7821 0.2025 0.1521
757PW DEP STANDARD 5 23 DEP23X 0 COM 0.0869 0.0225 0.0169
A320 APP STEP APP 1 05 ARRO5X 0 COM 12.6000 4.5900 0.6100
A320 APP STEP APP 1 23 ARR23X 0 COM 1.4000 0.5100 0.0900
A320 DEP STANDARD 1 05 DEPO5X 0 COM 8.9100 2.9700 1.4400
A320 DEP STANDARD 1 23 DEP23X 0 COM 0.9900 0.3300 0.1600
A320 DEP STANDARD 2 05 DEPO5X 0 COM 4.5000 0.0000 0.0000
A320 DEP STANDARD 2 23 DEP23X 0 COM 0.5000 0.0000 0.0000
BAE146 DEP STANDARD 1 05 DEPO5X 0 COM 0.0900 0.0000 0.0000
BAE146 DEP STANDARD 1 23 DEP23X 0 COM 0.0100 0.0000 0.0000
BEC58P APP STANDARD 1 05 ARRO5X 0 GA 0.9900 0.2700 0.0000
BEC58P APP STANDARD 1 23 ARR23X 0 GA 0.1100 0.0300 0.0000

```

Slika 65. Prikaz izvještaja sa podacima u INM programu

Na temelju svih izračuna i prikupljenih podataka izrađena je karta kontura buke za Zračnu luku Zagreb u vremenskom periodu od 01.01. do 30.09.2008. Analizom podataka sa karte konture buke može se primijetiti da je buka povećana prema pragu 23 koji je u većini slučajeva i pravac polijetanja (90%). Karta kontura buke izrađena je prema Lden vrijednostima. Izradom karte dobivena je ukupna pokrivenost površine buke od 15.91 km², od čega je:

dB	Površina zone buke u (km ²)
55-60	11,10
60-65	4,78
65-70	1,90
70-75	0,95
75-80	0,28
80-85	0,09
85-90	0,01



Slika 66. Prikaz karte kontura buke za razdoblje od 01.01. do 30.09.2008. na Zračnoj luci Zagreb

5.10. Mjerenje veličina buke, procesuiranje i analiza rezultata pri usporedbi zrakoplova kategorije 3 Airbus 320 i kategorije 2 Tupolev 154 kroz faze polijetanja i slijetanja

Primjer očitavanja i analiziranja buke za ovaj magistarski rad prikazan je na zrakoplovima Airbus 320 i Tupolev 154 iz razloga što su ovi zrakoplovi 3 i 2 kategorije. U procesu slijetanja prijedena je postavljena granica za startanje sustava za mjerenje buke zrakoplova od 50 dB. Zrakoplov je slijetao na Zračnu luku Zagreb, uzletno-sletnu stazu prag 05. Prilikom prelaska praga buke zrakoplov je snimila stanica NMT 1. Uz veličinu zvuka program automatski proračunava i ostale zvučne vrijednosti koje su bitne i koje se koriste pri analizi i izradi karata buke.



Slika 67. Zrakoplovi Tu154 i Airbus 320

Prilikom povlačenja podataka sa mjernih stanica podaci se prikazuju u ENM programu pod kategorijom Events. Prema podacima koje je NMT stanica snimila, zrakoplov Airbus 320 aktivirao je granicu snimanja te mu je na slijetanju (iznad preleta praga) bila izmjerena ekvivalentna vrijednost za period buke od $L_{eq} = 72,8$ dB.

ENM sustav detektira vrijednosti vezane za vremenski period i razinu buke, no ne i za tip zrakoplova koji tu buku proizvede. Na Zračnoj luci Zagreb buka zrakoplova može se pridružiti tipu zrakoplova koristeći ENM kao program koji daje vrijednosti o buci i FAIS (Flight and Airport Information System) koji daje vrijednosti o tipovima zrakoplova te vremenima slijetanja i polijetanja. Zajednička vrijednost oba programa je vrijeme slijetanja i polijetanja zrakoplova, prema kojem se može napraviti korelacija između ta dva programa.

ENM program

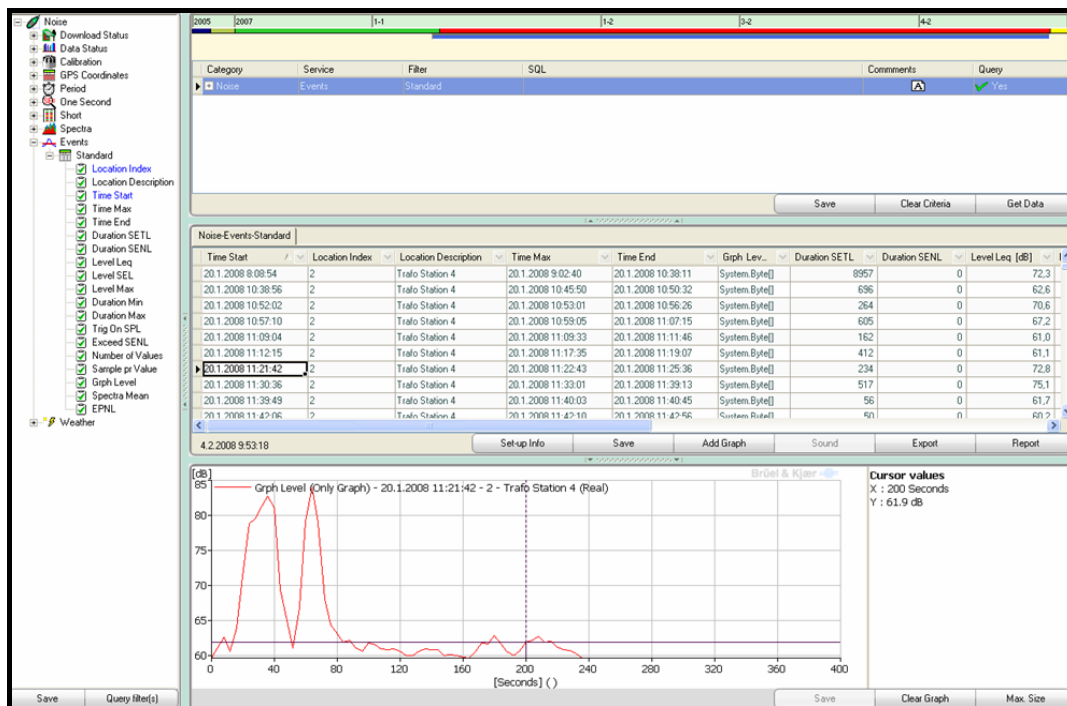
Time Start	Location Index	Location Description	Time Max	Time End	Gph Lev..	Duration SETL	Duration SENL	Level Leq [dB]
20.1.2008 6:17:21	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:22:00	20.1.2008 6:22:35	System Byte[]	314	0	61,9
20.1.2008 6:24:04	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:24:18	20.1.2008 6:27:33	System Byte[]	209	0	61,5
20.1.2008 6:29:35	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:29:52	20.1.2008 6:30:25	System Byte[]	50	0	61,2
20.1.2008 6:35:16	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:35:41	20.1.2008 6:36:02	System Byte[]	46	0	61,1
20.1.2008 6:36:26	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:36:48	20.1.2008 6:37:18	System Byte[]	52	0	61,3
20.1.2008 6:38:42	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:38:59	20.1.2008 6:39:36	System Byte[]	54	0	60,7
20.1.2008 6:42:33	2	Trafo Station 4	20.1.2008 6:50:38	20.1.2008 7:00:27	System Byte[]	1074	0	65,1
20.1.2008 7:00:45	2	Trafo Station 4	20.1.2008 7:16:37	20.1.2008 8:08:52	System Byte[]	4087	0	74,1
20.1.2008 7:13:13	4	Mobile Test	20.1.2008 7:31:12	20.1.2008 7:31:14	System Byte[]	1081	0	68,6
20.1.2008 8:08:54	2	Trafo Station 4	20.1.2008 9:02:40	20.1.2008 10:38:11	System Byte[]	8957	0	72,3
20.1.2008 10:38:56	2	Trafo Station 4	20.1.2008 10:45:50	20.1.2008 10:50:32	System Byte[]	696	0	62,6
20.1.2008 10:52:02	2	Trafo Station 4	20.1.2008 10:53:01	20.1.2008 10:56:26	System Byte[]	264	0	70,6
20.1.2008 10:57:10	2	Trafo Station 4	20.1.2008 10:59:05	20.1.2008 11:07:15	System Byte[]	605	0	67,2
20.1.2008 11:09:04	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:09:33	20.1.2008 11:11:46	System Byte[]	162	0	61,0
20.1.2008 11:12:15	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:17:35	20.1.2008 11:19:07	System Byte[]	412	0	61,1
20.1.2008 11:21:42	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:22:43	20.1.2008 11:25:36	System Byte[]	234	0	72,8
20.1.2008 11:30:36	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:33:01	20.1.2008 11:39:13	System Byte[]	517	0	75,1
20.1.2008 11:39:49	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:40:03	20.1.2008 11:40:45	System Byte[]	56	0	61,7
20.1.2008 11:42:06	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:42:10	20.1.2008 11:42:56	System Byte[]	50	0	60,2
20.1.2008 11:44:37	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:44:43	20.1.2008 11:47:09	System Byte[]	152	0	60,6
20.1.2008 11:47:36	1	Trafo Station 3	20.1.2008 11:47:42	20.1.2008 11:48:00	System Byte[]	24	0	60,1
20.1.2008 11:52:47	1	Trafo Station 3	20.1.2008 11:53:01	20.1.2008 11:53:31	System Byte[]	44	0	60,9
20.1.2008 11:55:21	2	Trafo Station 4	20.1.2008 11:55:41	20.1.2008 11:56:14	System Byte[]	43	0	61,1

FAIS program

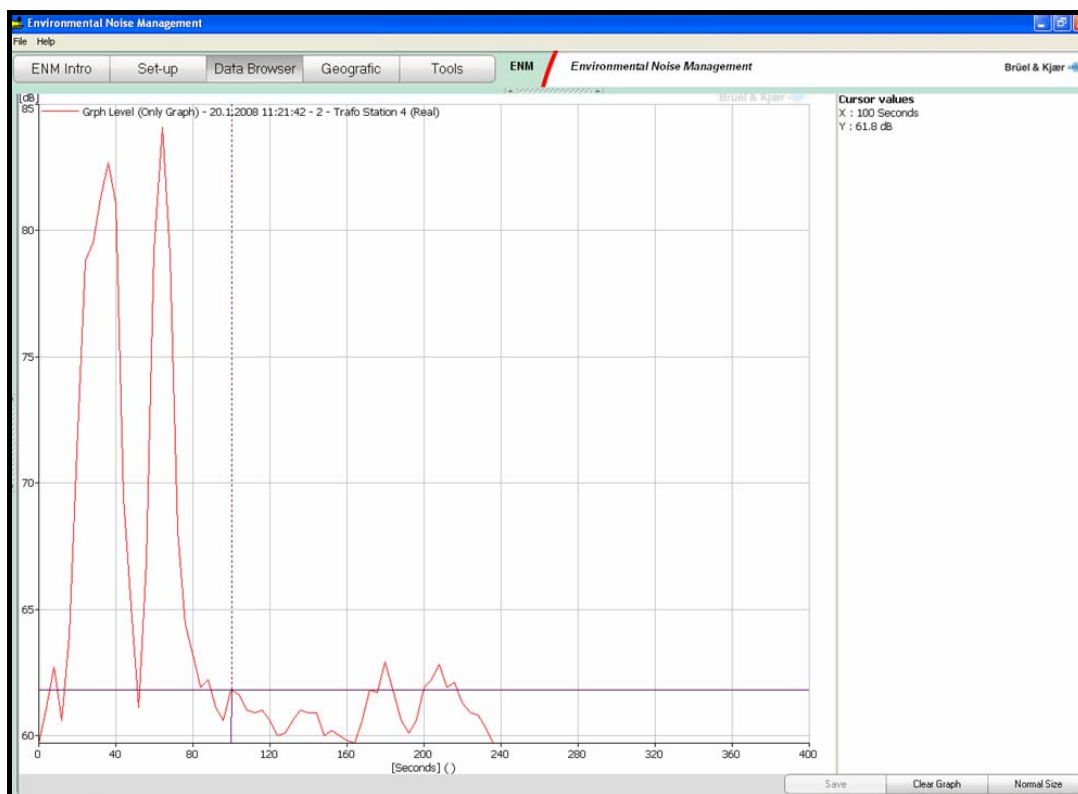
STI	ATI	ON OFF BLOCK	ZARLUNGSAR	PUSHBACK	B	FREISTELLUNG	REGISTRATION	LFZ_TYP_COD	FTI	PASSAGI	PASSAGIERE
20.1.2008 7:30:00	20.1.2008 7:24:00	20.1.2008 7:29:00 K	N	J		9ACTT	AT42	1.2008 7:29:00		22	
20.1.2008 7:30:00	20.1.2008 7:35:00	20.1.2008 7:30:00 K	N	J		9ACTS	AT42	1.2008 7:35:00		28	
20.1.2008 7:30:00	20.1.2008 7:35:00	20.1.2008 7:30:00 K	N	J		9ACTS	AT42	1.2008 7:35:00		28	
20.1.2008 7:30:00	20.1.2008 7:35:00	20.1.2008 7:30:00 K	N	J		9ACTS	AT42	1.2008 7:35:00		28	
20.1.2008 7:35:00			N	N				1.2008 7:35:00			
20.1.2008 7:35:00			N	N				1.2008 7:35:00			
20.1.2008 7:35:00	20.1.2008 7:38:00	20.1.2008 7:43:00 K	N	J		9ACTF	EA322	1.2008 7:43:00		74	
20.1.2008 7:35:00	20.1.2008 7:38:00	20.1.2008 7:43:00 K	N	J		9ACTF	EA322	1.2008 7:43:00		74	
20.1.2008 7:45:00	20.1.2008 8:07:00	20.1.2008 8:13:00 K	N	J		9ACTK	EA322	1.2008 8:13:00		84	
20.1.2008 7:45:00	20.1.2008 8:07:00	20.1.2008 8:13:00 K	N	J		9ACTK	EA322	1.2008 8:13:00		84	
20.1.2008 8:00:00	20.1.2008 7:44:00	20.1.2008 7:51:00 K	N	J		OELGI	DH84	1.2008 7:51:00		5	
20.1.2008 8:00:00	20.1.2008 7:44:00	20.1.2008 7:51:00 K	N	J		OELGI	DH84	1.2008 7:51:00		5	
20.1.2008 8:05:00	20.1.2008 8:37:00	20.1.2008 8:30:00 K	N	J		9ACTT	AT42	1.2008 8:37:00		31	
20.1.2008 8:05:00	20.1.2008 8:37:00	20.1.2008 8:30:00 K	N	J		9ACTT	AT42	1.2008 8:37:00		31	
20.1.2008 8:05:00	20.1.2008 8:23:00	20.1.2008 9:15:00 K	N	J		9ACTI	AB319	1.2008 9:23:00		70	
20.1.2008 8:30:00	20.1.2008 8:45:00	20.1.2008 8:40:00 K	N	J		O/OFA	AT72	1.2008 8:45:00		28	
20.1.2008 8:30:00	20.1.2008 8:56:00	20.1.2008 8:48:00 K	N	J		9ACTK	EA322	1.2008 8:56:00		41	
20.1.2008 8:35:00	20.1.2008 9:02:00	20.1.2008 8:53:00 K	N	J		9ACTJ	EA322	1.2008 9:02:00		58	
20.1.2008 8:35:00	20.1.2008 9:16:00	20.1.2008 9:10:00 K	N	J		OELGI	DH84	1.2008 9:16:00		58	
20.1.2008 8:35:00	20.1.2008 9:16:00	20.1.2008 9:10:00 K	N	J		OELGI	DH84	1.2008 9:16:00		58	
20.1.2008 9:30:00			N	N			EA322	1.2008 9:30:00			
20.1.2008 9:35:00	20.1.2008 10:30:00	20.1.2008 10:05:00 K	N	N		9ACTF	EA322	2008 10:30:00		57	
20.1.2008 9:35:00	20.1.2008 10:30:00	20.1.2008 10:05:00 K	N	N		9ACTF	EA322	2008 10:30:00		57	
20.1.2008 10:25:46	20.1.2008 10:21:00	20.1.2008 10:24:00 K	N	N		9AEMZ	DR10	2008 10:24:00			
20.1.2008 10:55:00	20.1.2008 11:04:00	20.1.2008 10:55:00 K	N	N		9ADZD	C172	2008 11:04:00			
20.1.2008 11:00:00	20.1.2008 10:54:00	20.1.2008 10:57:00 K	N	N		9ACTS	AT42	2008 10:57:00		20	
20.1.2008 11:00:00			N	N				2008 11:00:00			
20.1.2008 11:00:00	20.1.2008 10:54:00	20.1.2008 10:57:00 K	N	N		9ACTS	AT42	2008 10:57:00		20	
20.1.2008 11:00:00	20.1.2008 10:54:00	20.1.2008 10:57:00 K	N	N		9ACTS	AT42	2008 10:57:00		20	
20.1.2008 11:15:00	20.1.2008 10:59:00	20.1.2008 11:02:00 K	N	N		9ACTT	AT42	2008 11:02:00		24	
20.1.2008 11:15:00	20.1.2008 10:59:00	20.1.2008 11:02:00 K	N	N		9ACTT	AT42	2008 11:02:00		24	
20.1.2008 11:20:00	20.1.2008 11:39:00	20.1.2008 11:43:00 K	N	N		OELKC	D328	2008 11:43:00		24	
20.1.2008 11:40:00	20.1.2008 12:36:00	20.1.2008 12:29:00 B	N	N		FGUPT	F145	2008 12:29:00		50	
20.1.2008 11:50:00	20.1.2008 11:23:00	20.1.2008 11:26:00 B	N	N		DAKNT	AB319	2008 11:26:00		88	
20.1.2008 11:55:00			N	N				2008 11:55:00			
20.1.2008 11:55:00	20.1.2008 11:33:00	20.1.2008 11:36:00 B	N	N		DAKNN	AB319	2008 11:36:00		90	
20.1.2008 12:00:00	20.1.2008 12:10:00	20.1.2008 12:00:00 K	N	N		9ADDO	C182	2008 12:10:00			
20.1.2008 12:15:00	20.1.2008 14:21:00	20.1.2008 14:24:00 K	N	N		DAVRA	BA468	2008 14:24:00		48	
20.1.2008 12:15:00	20.1.2008 12:08:00	20.1.2008 12:12:00 B	N	N		N415US	SR22	2008 12:12:00			
20.1.2008 12:15:00	20.1.2008 14:21:00	20.1.2008 14:24:00 K	N	N		DAVRA	BA468	2008 14:24:00		48	
20.1.2008 12:15:00	20.1.2008 14:21:00	20.1.2008 14:24:00 K	N	N		DAVRA	BA468	2008 14:24:00		48	
20.1.2008 12:20:00	20.1.2008 12:19:00	20.1.2008 12:11:00 B	N	N		DAKNT	AB319	2008 12:19:00		71	
20.1.2008 12:20:00	20.1.2008 12:27:00	20.1.2008 12:16:00 K	N	N		9ACTS	AT42	2008 12:27:00		24	
20.1.2008 12:25:00	20.1.2008 12:30:00	20.1.2008 12:18:00 B	N	N		DAKNN	AB319	2008 12:30:00		67	

Slika 68. Primjer korelacija zrakoplova između ENM i arhive FAIS programa

Preko korelacije zrakoplova i razine buke koja je izmjerena određeni su zrakoplovi te su analizirane vrijednosti buke koju su proizveli.



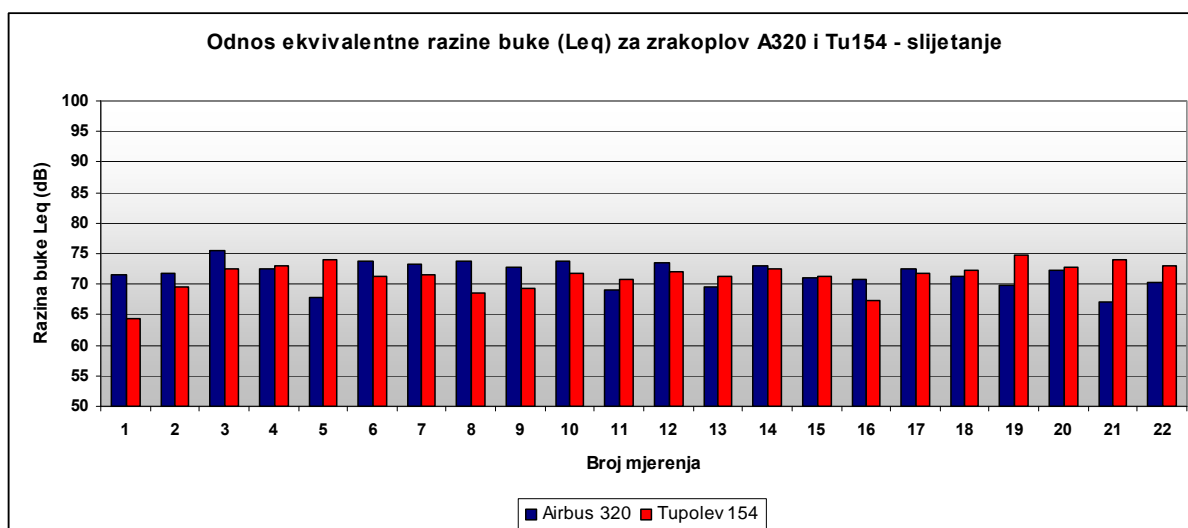
Slika 69. Grafički prikaz razine buke zrakoplova Airbus dobiven preko ENM programa



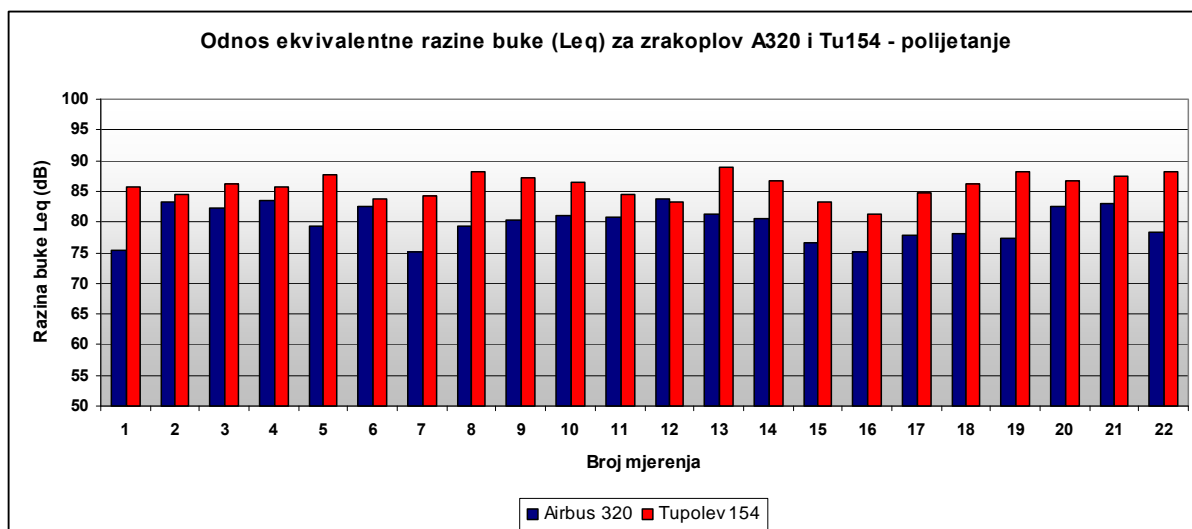
Slika 70. Određivanje maksimalne vrijednosti razine buke za pojedini period

Tablica 24. Usporedni prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama polijetanja i slijetanja (preleti iznad NMT stanica)

Mjerenje Leq (dB) pri preletu NMT stanica			
Airbus 320		Tupolev 154	
Slijetanje	Polijetanje	Slijetanje	Polijetanje
71,5	75,4	64,4	85,8
71,9	83,2	69,5	84,6
75,6	82,2	72,6	86,3
72,5	83,4	72,9	85,8
67,9	79,4	74,1	87,7
73,7	82,4	71,2	83,8
73,2	75,2	71,5	84,2
73,7	79,4	68,5	88,2
72,7	80,4	69,2	87,3
73,7	81,0	71,8	86,5
69,0	80,7	70,8	84,6
73,4	83,8	72,1	83,2
69,6	81,2	71,2	88,8
72,9	80,5	72,6	86,6
71,0	76,5	71,3	83,2
70,8	75,1	67,4	81,2
72,6	77,9	71,8	84,7
71,4	78,2	72,2	86,2
69,7	77,4	74,7	88,2
72,3	82,4	72,7	86,6
67,2	83,0	74,1	87,5
70,3	78,3	73,1	88,3



Grafikon 14. Grafički prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama slijetanja (preleti iznad stanica)



Grafikon 15. Grafički prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus 320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama polijetanja (preleti iznad stanica)

Nakon obrade izmjerenih podataka Leq kod zrakoplova tipa Airbus 320 i Tupolev 154 potvrđena je tvrdnja o svrstavanju zrakoplova Tupolev 154 u kategoriju buke 2 te se može konstatirati da je taj zrakoplov najbučniji u polijetanju na Zračnoj luci Zagreb. Obzirom na oštrije zakone u Europskoj uniji sa razlogom je takvom tipu zrakoplova kao što je TU154 zabranjeno slijetanje na EU zračne luke.

5.11 Zaključak

Instalacija sustava za mjerenje buke zrakoplova na zračnoj luci Zagreb pripomogla je prikazu razine buke u okolici zračne luke, putanjama prilaza i odleta zrakoplova te izradi karte kontura buke. Nakon prikupljenih podataka, slijedila je detaljna analiza i proračuni te se dolazi do slijedećih rezultata. Očekivano je bilo da će na putanjama polijetanja i slijetanja buka zrakoplova biti najveća i to 4 km od praga 05 prema jugo-zapadu, te 3,2 km od praga 23 prema sjevero-istoku. Nakon obrade podataka i pridruživanju podataka o stanovništvu došlo se do zaključka da su sva naselja oko zračne luke (osim ilegalno sagrađenih sela) izložena buci manjoj od 65 dB te prema svim regulativama operacije na zračnoj luci zadovoljavaju propise o buci zrakoplova i zračne luke. Može se reći da je ovaj zaključak baziran na modelu izrade karte buke te mjerenjima, no moguća su i prekoračenja samih pilota u pre niskim prilazima i odletima na što bi naviše trebala utjecati kontrola leta detaljnim analizama te ukoliko je potrebno određenim sankcijama u suradnji za zračnom lukom.

6. Načini smanjenja buke

6.1. Uvod

Buka u zoni zračne luke predstavlja ozbiljan problem za lokalno stanovništvo koje živi u njenoj blizini. S obzirom da se najveće zračne luke nalaze uz velike gradove, izloženost buci postojala je sve veća. Širenjem gradova stambena naselja se sve više približavaju području zračne luke, zbog čega buka u tim područjima postaje sve nesnosnija. Nakon prijava lokalnog stanovništva o nesnosnoj buci krenulo se u razmatranje njene redukcije. Razvijena su tehničko-tehnološka rješenja koja su se implementirala kako bi se buka mogla svesti na podnošljivu razinu.

6.2 Metodologije redukcije buke zrakoplova

ICAO je napravio metodologiju kojom bi se smanjila buka zrakoplova na pojedinim zračnim lukama, a da su time zadovoljene forme očuvanja okoliša i ekonomske forme. Ta se metodologija sastoji od četiri dijela:

1. redukcija buke u samom izvoru
2. pravilno prostorno planiranje i upotreba zemljišta
3. operacijske procedure u redukciji buke
4. operacijske zabrane leta pojedinih zrakoplova

Preporučljivo je da se redukcija buke provodi u granicama standarda kojega definira ICAO Annex 8 Airworthiness of Aircraft i Annex 16 Zaštite okoliša – Volume I – međunarodne konvencije civilnog zrakoplovstva. Standardi koje propisuje ICAO nastoje povezati svu tehnologiju vezanu za zrakoplov kako bi se dosegla zadovoljavajuća granica buke.

Pravilno prostorno planiranje i upotreba zemljišta direktno su povezana sa bukom koja nastaje u blizini zračne luke. Problem kuća, bolnica i škola koje su ugrožene bukom u blizini zračne luke može se riješiti pravilnim urbanističkim planom i pametnim odabirom infrastrukture oko zračne luke. Problem buke zrakoplova direktno je povezan sa upotrebom zemljišta. Najbolje rješenje za redukciju buke sa zračne luke je udaljenost naseljenog područja. Ukoliko je

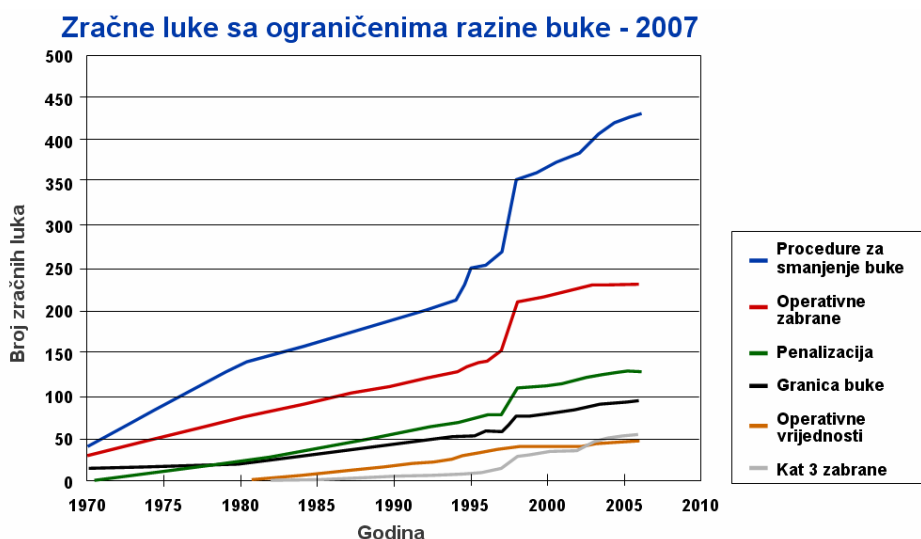
moguće, zračna luka bi trebala biti okružena tzv. buffer područjem koje bi se sastojalo od nenaseljenog i šumovitog područja te bi se privatna zemljišta koja se nalaze iznad bučnih putanja trebala koristiti za aktivnosti kao što su agrokultura, područja za gradnju autocesta, manufakturu i ostalih aktivnosti koje se mogu vršiti uz takvu razinu zvuka. S obzirom na ubrzano širenje velikih gradova, većina zračnih luka okružena je zgradama, školama i raznim objektima koji su osjetljivi na visoku razinu zvuka. Za zoniranje područja odgovorna je vlada i sam grad ili županija. U velikim gradovima gdje se traži prisutnost velikih prodajnih lanaca dućana, ogromna je naseljenost kuća i budući da se grad širi, zračne luke postaju dio grada te zemlja oko same zračne luke također postiže veliku vrijednost.

6.2.1 Programi za smanjenje buke

Trenutno postoji nekoliko programa za smanjenje buke:

- polijetanje i slijetanje trebalo bi se više provoditi na USS-ama koje su postavljene prema manje naseljenim područjima (ukoliko zračna luka posjeduje više USS-a)
- izgradnja zvučne barijere i izolacije zgrada
- zabrana slijetanja zrakoplovima koji nisu u standardima vezanim za buku
- različite naplate ovisno o razini buke zrakoplova.

FAA u suradnji sa zračnim lukama određuje idealne putanje zrakoplova kako bi se izbjegla naseljena područja. Putanje se pokušavaju podesiti iznad rijeka, jezera, autoputa, zaljeva. Negativna je strana da bi se time sve više zrakoplova usmjeravalo na pojedine USS-e te bi time kapacitet jedne USS bio prekoračen dok bi druge bile jedva pokrivena. Najveća restrikcija zračne luke je zatvaranje iste noću. Na primjeru Washington National Airport-a koji je baziran na FAA standardima, zrakoplov na slijetanju sa bukom višom od 72 dBA i na polijetanju višom od 85 dBA ne smije koristiti zračnu luku u razdoblju od 22:00 – 07:00 sati. Ova visina buke automatski eliminira skoro sve zrakoplove. Neke druge kompanije imaju dogovore sa zračnom lukom te im je dopušteno slijetanje u određenom satu između 22:00 – 07:00. Cleveland je zabranio tehnička slijetanja za punjenje goriva u razdoblju od 22:00 – 07:00 sata. Na sljedećem grafikonu može se vidjeti porast ograničenja koja uvode zračne luke u svijetu.



Grafikon 16. Ograničenja na zračnim lukama od 1970. – 2007. godine

6.2.2. Operativne procedure u redukciji buke

Bez obzira na to radilo se o buci zrakoplova pri slijetanju i polijetanju ili buci zrakoplova koja nastaje na zemlji, mjesne vlasti moraju na što bolji način zaštititi okolno stanovništvo. Princip zaštite operativnim procedurama može biti koristan iz razloga ako je moguće koridore premjestiti iznad nekoga područja koje nije naseljeno i time bi se riješila buka. Također postoje nekoliko operativnih procedura koje se koriste u svijetu u svrhu redukcije buke. Budući da se radi o ljudskim životima unutar samoga zrakoplova sigurnost je na prvome mjestu. Na pomicanje koridora gleda se sa velikim oprezom s obzirom da takva odluka može ugroziti sigurnost leta.

Prijedlozi za rješavanje ovoga problema buke su:

1. tehnološko unapređenje uzletno sletnih staza
2. pomicanje pragova uzletno sletne staze
3. preferiranje drugih zračnih ruta
4. ukidanje procedura u polijetanju i slijetanju koje uzrokuju veliku buku
5. uvođenje novih procedura u slijetanju (krivolinijske putanje)
6. minimalno korištenje kontra pogona za zaustavljanje zrakoplova (reverse thrust) u slijetanju

Redukcija buke na ovakav način je izazov za zračne luke, zrakoplovne kompanije i kontrolu leta, no s ekonomskog stajališta možda je najučinkovitije i najlakše izvedivo.

6.2.3. Operativne zabrane

Operativne zabrane možemo definirati kao zabrane koje limitiraju ili potpuno zabranjuju slijetanje pojedinog tipa zrakoplova za zračnu luku. Donošenje ovakve restrikcije mora biti opravdano. Naime ovakva se zabrana može donijeti tek ako su sve procedure isprobane i stvarno ne postoji način da se smanji redukcija buke pojedinog zrakoplova.

Operativne zabrane mogu biti parcijalne, globalne ili progresivne, a možemo ih podijeliti u dvije kategorije:

1. operativne zabrane u smislu zabrane leta noću, ili gornja granica u kretanju zrakoplova sa jakim bukom
2. zabrana zrakoplovima sa posebnom bukom tehničke ili performanske karakteristike

Uz ove zabrane postoje i zemaljske zabrane, a to su:

1. limitacija na rad motora dok je zrakoplov na zemlji
2. posebno moraju biti određena područja za probe motora i rad motora na zemlji
3. minimalno korištenje APU-a
4. minimalno vrijeme kretanja na voznim stazama
5. uvođenje zvučnih barijera

6.3. Tehnološke mjere

Dva su pristupa u globalnom rješavanju ekološkog problema buke. Prvi je tehnički, a vezan je za utišavanje motora u eksploataciji kao što su razne preinake na motorima i instalacija dodatka za prigušenje buke (hush-kit). Drugi pristup rješavanju globalnog ekološkog problema buke je organizacijsko – tehnološki pristup koji uključuje reguliranje lokalne gustoće prometa i zadržavanje zrakoplova u zraku te racionalizaciju početno – završnih operacija na zračnim lukama. Najutjecajniji način smanjenja buke je da se izvor buke smanji, a to znači da se grade "tiši" motori i zrakoplovi. Uvođenje tihe flote kategorije 3 zrakoplova riješit će većim dijelom problem buke, a tako će se i omogućiti eksploatacija aerodroma noću, odnosno ukidanje noćne zabrane (night – curfew). Najveći problem sa proizvodnjom buke imaju zrakoplovi istočne proizvodnje koji premašuju dopuštenu razinu buke. Stoga je njihova tržišna cijena drastično pala. Takvi zrakoplovi koriste se samo u domaćem prometu, dok se za međunarodni promet koriste zrakoplovi pretežno zapadne proizvodnje.

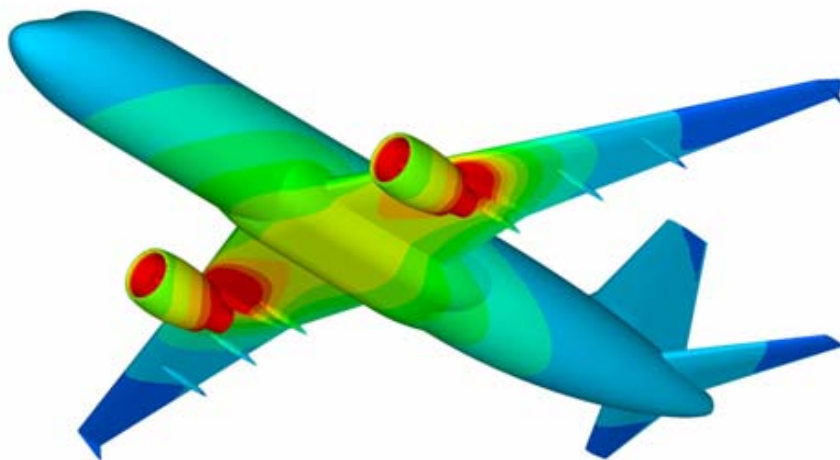
6.3.1. Promjene na elementima zrakoplovnog motora u svrhu redukcije buke

Promjenom i mogućim unapređenjem dijelova unutar samoga zrakoplovnog motora može se znatno reducirati buka. Ti dijelovi su:

- **Vrlo visoki prijenosni omjer BPR (high bypass ratio)** - Svrha uvođenja ovoga sustava je smanjenje buke ispušnog sustava i povećanje protoka zraka u svrhu postizanja potiska. Buka koja nastaje miješanjem buke motora i ispuha smanjuje se od 3 do 5 dB. Negativna strana ovoga sustava je u tome što se pri ovoj promjeni u motoru dobiva na veličini i težini motora te lepeze ventilatora postaju duže i veće. Prvo testiranje u letu bilo je 1996. godine.
- **Mlaznica** - Ugradnja novih oblika mlaznica rezultirala je bržim miješanjem ispušnih plinova i stvaranjem minimalne turbulencije u tome procesu. Buka je u tome procesu smanjena od 2 do 4 dB. Negativne strane ovakvoga unapređenja mlaznica su da dolazi do poremećaja u aerodinamici - smanjuje se potisak, povećava potrošnja goriva i pojavljivanje vibracija. Prvo testiranje u letu obavljeno je 2001 godine



Slika 71. Prikaz mlaznice za redukciju buke



Slika 72. Podjela razine buke na zrakoplovu

- **Optimizacija brzine rotora** - Kod optimizacije brzine rotora gledalo se na usklađivanje brzine ventilatora i motornog visokog prijenosnog omjera (BPR) te na smanjenje brzine ventilatora kako bi se minimalizirali aerodinamički šokovi koji se stvaraju ispod lopatica ventilatora. Smanjenje buke u ovom procesu moguće je u rasponu od 2 do 4 dB. Negativne strane su veća težina ventilatora, skuplje održavanje, slabija efikasnost. Prvo testiranje u letu bilo je 1996. godine.
- **Zamah rotora** - Pristup u ovome dijelu bio je minimalizirati aerodinamički šok ispred lopatica ventilatora. Time bi pri polijetanju bilo moguće smanjiti buku od 2 do 4 dB, dok bi se redukcija ispušnog sustava mogla smanjiti za 1 do 3 dB. Negativne strane ovoga sustava su aerodinamičke performanse ventilatora i smanjena stabilnost ventilatora.
- **Zamah statora** – kod ovoga elementa pažnja je usmjerena na smanjenje opterećenja samoga statora i smanjenje radijacije koju on stvara. Buka se ovim putem na ventilatoru može smanjiti 2 do 4 dB u prilazu i 3 do 5 dB u ispušnom sustavu. Negativne strane pri unapređenju statora su kompleksnost u proizvodnji te veliki troškovi.

6.3.2. Sustavi za prigušenje zvuka na motorima – Hushkit

Hush kit služi kao dodatak završnom dijelu mlaznog motora i dozvoljava prelazak zrakoplova u kategoriju 3 standarda o reduciranju buke. Ovi dijelovi moraju biti otporni na jako visoke temperature, jake vibracije i visoki tlak te potisak motora. Utišavanje motora vrši se izmjenom motora i zamjenom bučnih zrakoplova novim modelima. Za najbrojniju flotu zrakoplova Boeing 737-100 i 200 serije te zrakoplove DC-9 proizvode se kompleti za modifikaciju zrakoplova, a troškovi modifikacije jednog zrakoplova su 2,4 do 3,6 milijuna američkih dolara. Od europskih prijevoznika jedino je SAS uvrstio komplete za modifikaciju DC-9 zrakoplova uz narudžbu novih zrakoplova Boeing 737-600 kojima je izmijenio MD-80, te Lufthansa koja je već dobila komplete za modifikaciju flote Boeing 737-200. Ti će zrakoplovi u daljnjoj budućnosti biti zamijenjeni Airbus-om A319.



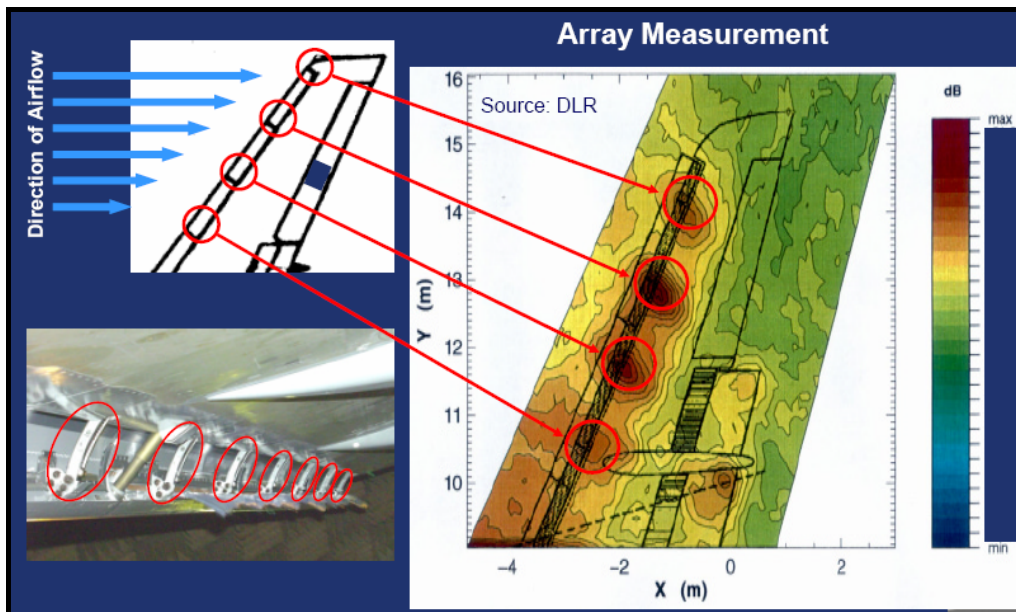
Slika 73. Prikaz hush kit sustava ugrađenih na zrakoplovima tipa Boeing 727

6.3.3 Poboljšanje strukture zrakoplova s ciljem redukcije buke

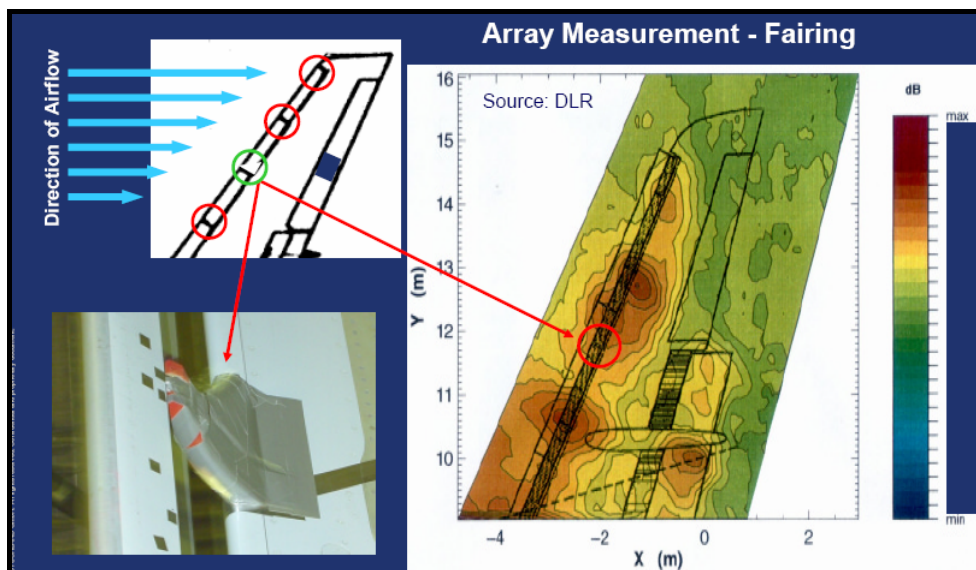
U zadnjih dvadesetak godina istraživanja su pokazala da buka uzrokovana strukturom zrakoplova je također bitan faktor u redukciji njenog zagađenja. Štoviše, ukupno smanjenje buke može se postići ukoliko se buka motora i buka uzrokovana strukturom zrakoplova smanjuju u jednakim količinama. Prvi je korak određivanje tzv. donje granice buke proizvedene u prilazu virtualnog zrakoplova u idealnim uvjetima kada su svi pokretni elementi na krilima uvučeni.

6.3.3.1. Predkrilca

Predkrilca su površine na prednjem dijelu krila koje omogućuju samom krilu da djeluje pod većim napadnim kutom. Uglavnom se postavljaju u kombinaciji sa zakrilcima. Predkrilca i zakrilca ne mogu se koristiti po čitavoj dužini krila jer samo na jednom dijelu noseće površine krila dolazi do povećanja sile uzgona. Intenzivna buka koja nastaje kod predkrilaca zrakoplova uzrokovana je nepravilnim strujanjem između pomičnog (predkrilca) i statičnog dijela krila. Shodno tome na stražnji donji dio predkrilca postavlja se produženi element koji pravilno usmjerava strujanje zraka pri čemu dolazi do smanjenja otpora, a time i same buke.



Slika 74. Obično prestrujavanje krila i detekcija buke na krilima

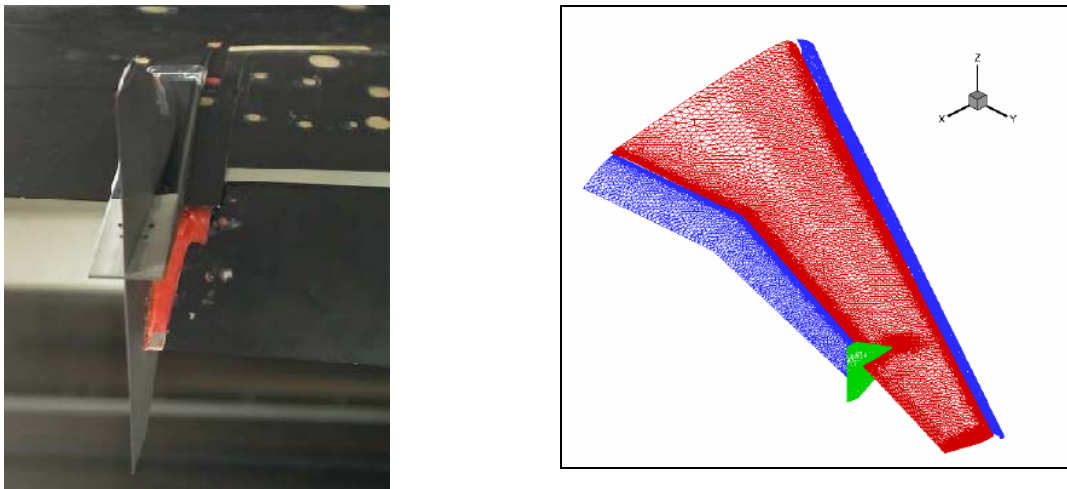


Slika 75. Postavljanje dijela za izgladivanje obstrujavanja zraka i smanjenje buke na tome dijelu

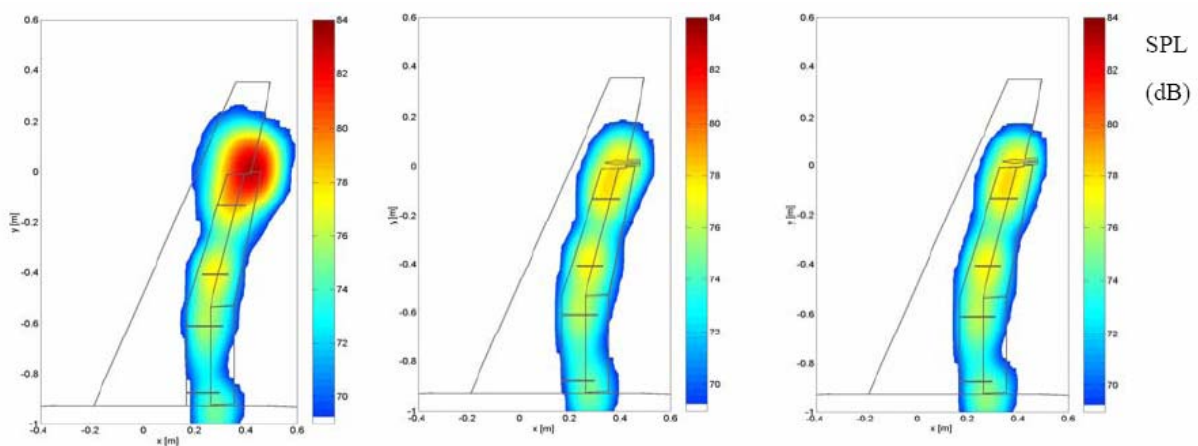
6.3.3.2. Zakrilca

Najveći izvor buke javlja se na rubnim dijelovima zakrilca gdje se stvara vrtlog zraka zbog nagle promjene protoka zraka između podignutog i stacionarnog dijela krila. Neki od načina smanjenja ovoga vrtloga su primjena hrapavog materijala na krajevima zakrilca i ugradnja barijere koja usmjerava vrtlog u suprotnom smjeru od kraja zakrilca pri čemu dolazi do redukcije buke i smanjenja otpora. Pri otklonu zakrilca za neki kut dolazi do povećanja

krivine profila zbog čega se povećava cirkulacija te dolazi do povećanja koeficijenta uzgona. Također se koriste i tzv. mikropločice koje se ugrađuju uz rub krila čija je funkcija pravilno opstrujavanje zraka.



Slika 76. Oblik i pozicioniranje barijera uz zakrilca



Slika 77. Usporedba buke na krilu bez barijere, sa gornjom i donjom barijerom i samo sa donjom barijerom

6.3.3.3. Spojleri

Spojleri su elementi koji povećavaju otpore i smanjuju potisak, a postavljeni su na gornjoj strani krila. Ovakvi se uređaji koriste i kod prilaza i slijetanja čime se smanjuje uzgon i povećava efikasnost kočnica na kotačima zrakoplova. Međutim njihova uporaba je ograničena jer turbulentno strujanje zraka koje se stvara iza njih stvara popriličnu buku i vibraciju u putničkoj kabini. Za redukciju buke preko spojlera najbolje je rješenje pronaći ravnomjieran odnos između izvlačenja spojlera u svrhu usporavanja zrakoplova u prilazu i buke koju stvara opstrujavanje zraka oko njih.



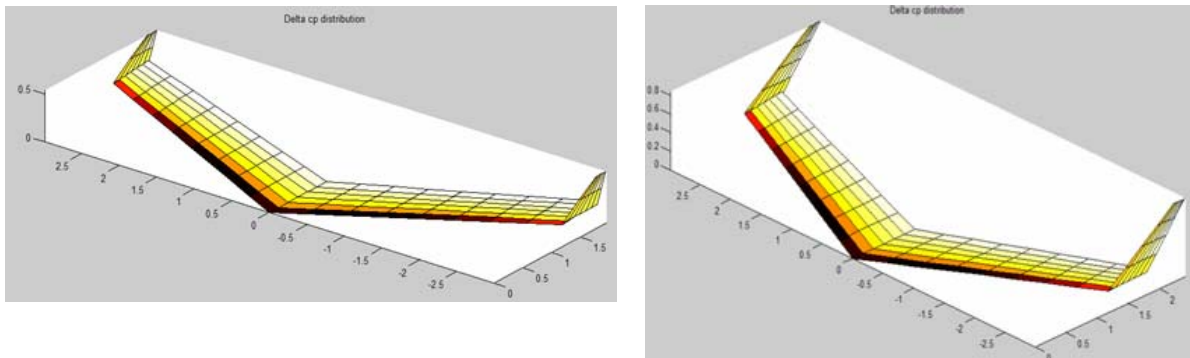
Slika 78. Prikaz spojlera

6.3.3.4. Vertikalno krilce

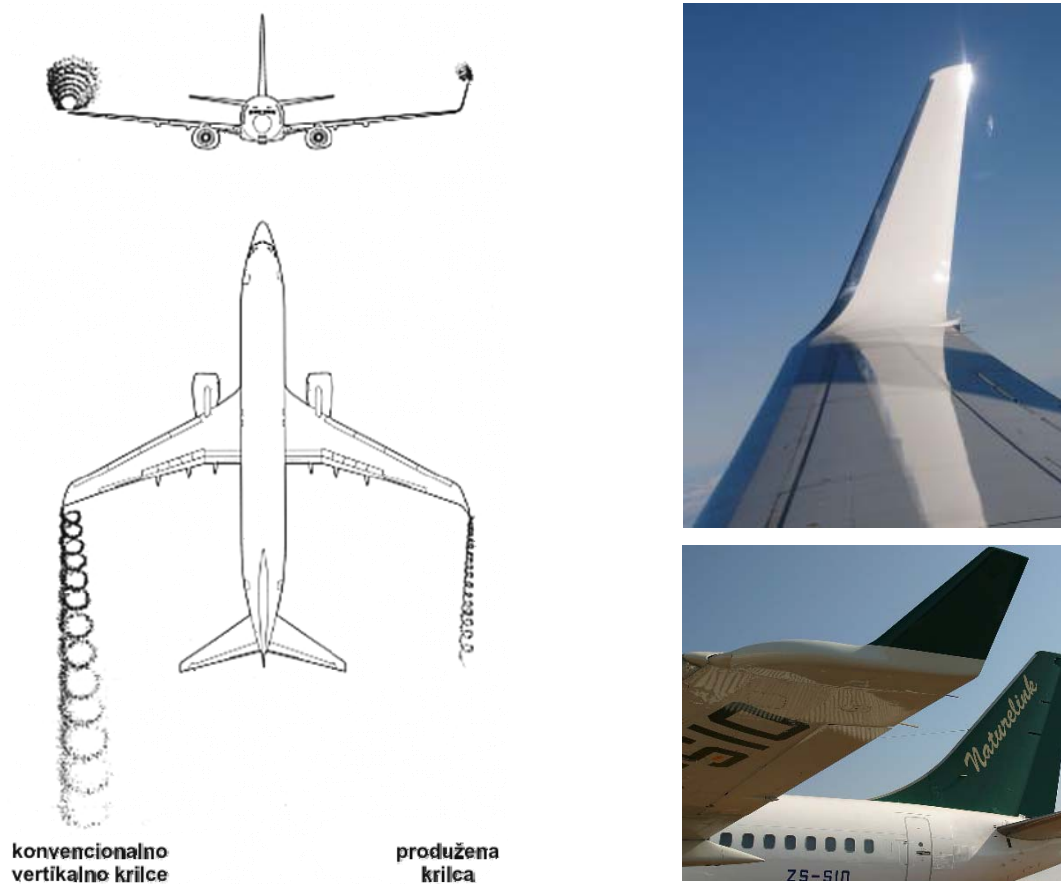
Vertikalno krilce (Winglet) koristi se kao završetak krila i smanjuje otpor na samom kraju krila. Time se smanjuje prestrujavanje i inducirani otpor, a zbog bočnog strujanja zraka na krilcu se formira aerodinamična sila s jednom komponentom u pravcu leta te ima efekt dodatnog potiska čime se reducira ukupna sila otpora. Ovisno o veličini krilca inducirani otpor može se smanjiti od 11 do 22%.

Prednosti pri ugradnji ovih krilca su:

- poboljšanje performanse pri polijetanju (naročito na zračnim lukama sa smanjenom USS-om)
- ekološki prihvatljiv – korištenje vertikalnih krilca može smanjiti otisak karte buke do 6,5 % i emisiju dušikovih oksida do 5% što nadalje smanjuje mogućnost dobivanja penala vezanih za buku na zračnoj luci.
- redukcija potiska pri polijetanju – ugradnjom ovoga krilca moguće je uštedjeti na održavanju zrakoplova i motora. Također pri polijetanju se koristi smanjeni potisak što rezultira „tišim“ polijetanjem.



Slika 79. Kraća i duža verzija vertikalnog krilca



konvencionalno
vertikalno krilce

produžena
krilca

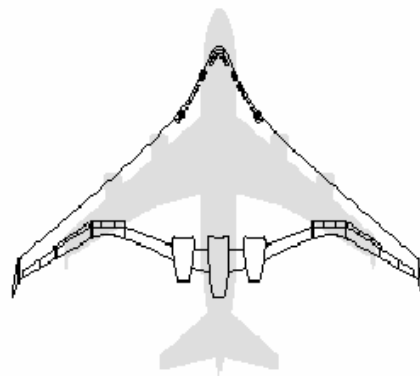
Slika 80. Prikaz vertikalnog krilca

6.3.4. Proizvodnja zrakoplova nove generacije

Nova tehnološka rješenja zaslužna su za izgradnju novog „tihog“ zrakoplova čija su glavna karakteristika spojena krila (BWB – blended wing body). Temelji u gradnji ovoga zrakoplova baziraju se na vojnoj tehnologiji gradnje zrakoplova B-2 bombardera pri čemu je zrakoplov građen od čvršćih i lakših materijala za razliku od postojećih zrakoplova.

Pri testiranju ovoga zrakoplova od strane NASA-e, buka koju proizvodi ovaj tip zrakoplova niža je od buke koja je prisutna u naseljenim područjima i potrošnja goriva mu je manja za 23% od klasičnih civilnih zrakoplova. Tehnologije koje doprinose smanjenju proizvodnje buke kod BWB zrakoplova su slijedeće:

- operacije prilaza sa manje buke – struktura ovakvoga zrakoplova proizvodi dvostruko manju buku i njezini izvori uveliko ovise o brzini leta. Značajna redukcija buke može se postići korištenjem prilaza sa smanjenom brzinom i pomaknutim pragom prilikom slijetanja, kako bi se povećala udaljenost između zrakoplova i ljudi.
- aerodinamični profil napadne ivice – rešetkasta konstrukcija smanjuje širenje buke koja nastaje turbulencijom blizu napadnih ivica. Predviđeno smanjenje buke u tom području je 4 dB.
- uravnoteženo podnožje zrakoplova – buka koja se stvara u podnožju zrakoplova može se umanjiti djelomičnim zatvaranjem stajnog trapa te ostalih izbočenih elemenata. Rezultat toga izgladivanja površina zrakoplova je smanjenje buke od 6 dB.
- stvaranje „tihog“ otpora pomoću povećanog induciranog otpora – velika površina krila i veliki napadni kut stvaraju uzgon na manjim brzinama bez korištenja zakrilca, tako eliminirajući jedan od glavnih izvora buke strukture zrakoplova prilikom slijetanja i polijetanja.
- strukturna zaštita od buke motora zrakoplova – postavljanje motora na samu strukturu zrakoplova smanjuje mogućnost utjecaja buke istog na promatrača.
- optimizirani potisak na polijetanju – pri polijetanju moguće je upravljanje potiskom, kutom polijetanja i mlaznicama u svrhu postizanja zadanog nivoa buke izvan granica zračne luke. Time bi se određeni nivo buke zadržavao tijekom cijele faze polijetanja i penjanja.
- optimizacija pregrade na motorima – pogonski sustav prikriven je akustički prilagođenim pregradama koje apsorbiraju buku motora. Te su pregrade sastavljene od više segmenata koji reduciraju buku motora do 20 dB.



Slika 81. Računalni prikaz BWB zrakoplova i odnos veličine BWB zrakoplova sa Boeing 747

6.3.5. Izoliranje širenja buke pomoću postavljanja fizičkih barijera buci

Zvučne barijere daju mogućnost kontrole zvuka prisutnog na zemlji kao što je polijetanje, slijetanje, taksiranje, korištenje APU i startanje motora. Kako bi bile učinkovite, barijere moraju probiti liniju između izvora zvuka i osobe koja je na udaru buke. Kada je zrakoplov poletio efekt barijera se gubi jer se njegova pozicija nalazi iznad njih. Maksimalni učinak barijera je kada se pozicija same barijere nalazi bliže osobi na udaru buke ili samom izvoru buke. Barijere same po sebi mogu biti zidovi ili nanosi zemlje. Duga zgrada također može poslužiti kao barijera npr. terminal. Blokiranje linije vidljivosti APU ili zrakoplova sa niskim položajem motora kao što je Boeing 737, mogu se koristiti barijere normalnih visina. Kod zrakoplova sa motorima na višim pozicijama kao što su DC-10 barijere koje se nalaze kako bi spriječile liniju vidljivosti smanjuje buku za 5 dB. Ukoliko se postavljaju zaštite od polijetanja na USS-i najbolje ih je postaviti direktno uz objekte koji se štite od povećane buke. Svaka barijera mora biti testirana na sve atmosferske prilike te mora biti dobro učvršćena kako bi izbjegla rušenje od ekstremno snažnih vjetrova. Zgrade koje se nalaze u blizini zračne luke trebale bi biti izolirane, a naročito se to odnosi na škole i bolnice. Uz izolacije, zvuk unutar objekta trebao bi biti 45 dB uz moguće pomake od +/- 5 dB. Također je preporuka u svrhu redukcije buke mijenjanje prozora te postavljanje dvoslojnih prozora. Klima uređaji idealni su u ljetnim danima jer u blizini zračne luke otvaranje prozora može poništiti efekt izoliranosti. Pravilna izoliranost može smanjiti buku zrakoplova i do 30 dB.

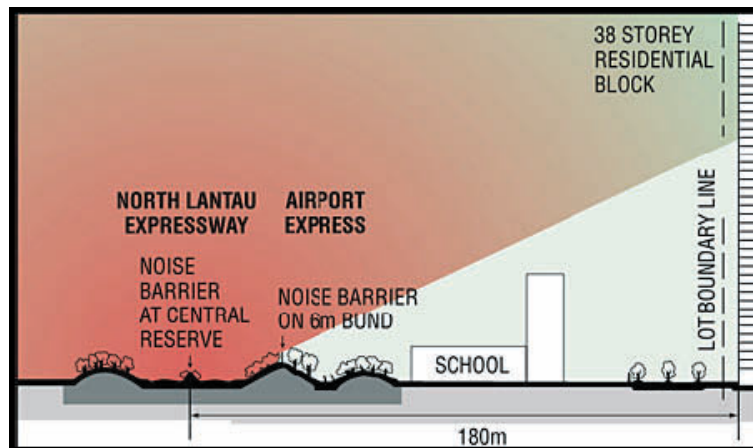
Zračna luka Miami International Airport među prvim je zračnim lukama koja je uvela postavljanje zvučne barijere uz područje zračne luke. Naime barijera koja je postavljena može se vidjeti na slici 82., a njena dužina je oko 1700 metara te se prostire paralelno sa naseljem

koje se nalazi uz zračnu luku pri čemu sprečava širenje buke prema tome naselju. Visina fizičke barijere je 6 metara te se radi pregleda kroz nju kao i samoga izgleda i prilagodbe okolišu sastoji od staklenih krugova koji daju određenu vidljivost na drugu stranu.



Slika 82. Prikaz barijere na međunarodnoj zračnoj luci Miami

Uz barijere u obliku ograde u svijetu se još koriste prirodne barijere u obliku nasipa i gusto posađenog drveća koje svojom visinom također utječu na smanjeno širenje zvuka. Prema istraživanjima, barijera sastavljena od guste vegetacije širine 6 metara može smanjiti buku do 10 dB te se zato ovakav tip barijera postavlja uz zračne luke i autoceste.



Slika 83. Prikaz usmjeravanja zvuka sa postavljanjem barijera u obliku nasipa

6.4. Operativne mjere

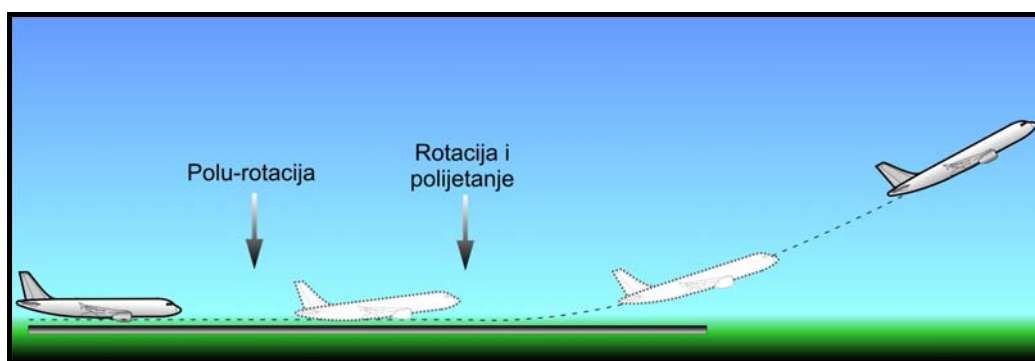
6.4.1. Praćenje operacija polijetanja i slijetanja u svrhu smanjenja buke iznad naseljenog područja

6.4.1.1. Polijetanje

Faza polijetanja se definira kao postupak u kojem se zrakoplov odvaja od uzletno sletne staze i započinje let. Polijetanje se odvija u nekoliko faza: zalet, uzlet i polet. Nakon što napusti stajanku, zrakoplov se kreće po voznoj stazi i izlazi na uzletno sletnu stazu. Prilikom izlaska na uzletno sletnu stazu posada zrakoplova mora poravnati zrakoplov sa osi uzletno sletne staze. Dobivši dozvolu za polijetanje od kontrole leta, počinje faza zaleta i dodaje se potisak za polijetanje jednake jačine na svim motorima. Zalet traje do postizanja brzine uzleta. Uzlet je trenutak odvajanja zrakoplova sa piste i prelaska u fazu poleta koja traje od uzleta do prevođenja zrakoplova u režim penjanja. Za završetak poleta uzima se točka na kojoj se postiže visina 50 ft. Nakon polijetanja slijedi penjanje. Penjanje se definira kao jednoliko pravocrtno kretanje zrakoplova po penjajućoj ravnini određenom brzinom v do predviđene razine leta.

Nakon polijetanja uvlači se stajni trap kako bi se što prije smanjio nepoželjni otpor i kako bi zrakoplov što prije postigao željene aerodinamičke karakteristike. Kada je stajni trap uvučen dodaje se potisak i time povećava brzina kako bi se omogućilo uvlačenje zakrilca i predkrilca. Nakon procesa uvlačenja zakrilca i predkrilca vrši se prva redukcija potiska motora. U tome trenutku sa potiska koji je služio za polijetanje prelazi se na potisak koji nema vremensko ograničenje upotrebe. Nakon kraćeg leta sa tim potiskom dolazi do druge redukcije te se tada ulazi u fazu penjanja.

Sa aspekta proizvodnje buke zrakoplova, u trenutku kada se zrakoplov nalazi na uzletno sletnoj stazi i dobije dozvolu od kontrole leta za polijetanje, povećava se potisak u motorima koji stvaraju veliku buku. Buka je u tome trenutku uvijek veća nego na slijetanju. U svrhu reduciranja te buke u svijetu postoji jedan postupak koji je izradio FAA i koji je prihvaćen od ICAO-a te jedna varijanta ovog postupka koji je izradio ICAO. U prvom postupku u fazi polijetanja mogu se definirati tri segmenta unutar kojih su određeni parametri leta preko kojih bi se moga smanjiti buku zrakoplova.

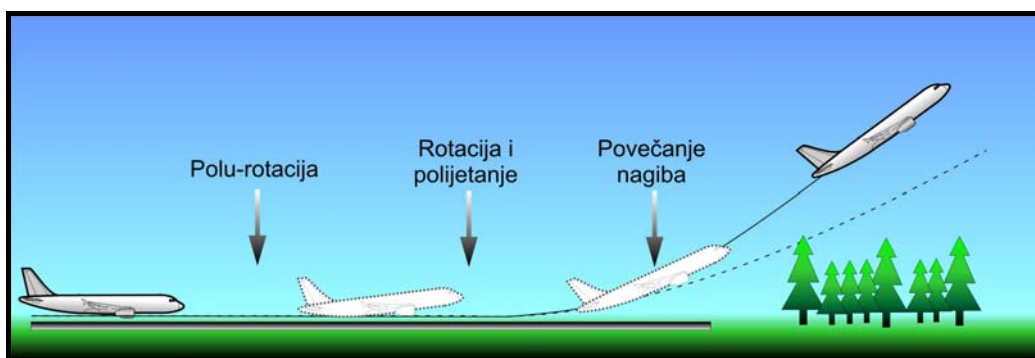


Slika 84. Primjer standardnog polijetanja

Tablica 25. Postupak standardnog polijetanja

	Napadni kut	Kut penjanja	Stupanj penjanja	Nagnutost	Brzina
inicijalno valjanje	4.5°	0°	0.0°	4.5°	Malo povećanje.
nakon rotacije	12.0°	0°	7.5°	4.5°	Povećava se
prilikom uzlijetanja	12.0°	0°	7.5°	4.5°	6% ispod V_Y
inicijalno penjanje	decr.	incr.	7.5°	4.5°	Povećava se
ravnomjerno penjanje	7.0°	5°	7.5°	4.5°	10% iznad V_Y

Izvor: <http://www.av8n.com/how/htm/takeoff.html#tab-takeoff-simple-numbers#tab-takeoff-simple-numbers>

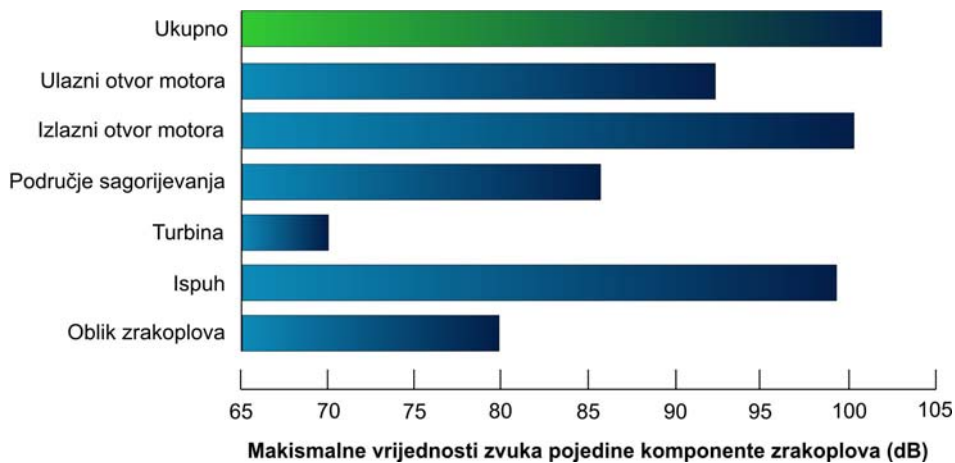


Slika 85. Standardno polijetanje s povećanjem nagiba

Tablica 26. Postupak standardnog polijetanja s povećanim nagibom

	Napadni kut	Kut penjanja	Stupanj penjanja	Nagnutost	Brzina
inicijalno valjanje	4.5°	0°	0.0°	4.5°	Malo povećanje
nakon polurotacije	7.5°	0°	3.0°	4.5°	Povećava se
odmah nakon rotacije i uzlijetanja	12°	0°	7.5°	4.5°	Malo iznad V_X
inicijalno penjanje	decr.	incr.	7.5°	4.5°	Povećava se
ravnomjerno penjanje	8.5°	6°	10.0°	4.5°	V_Y

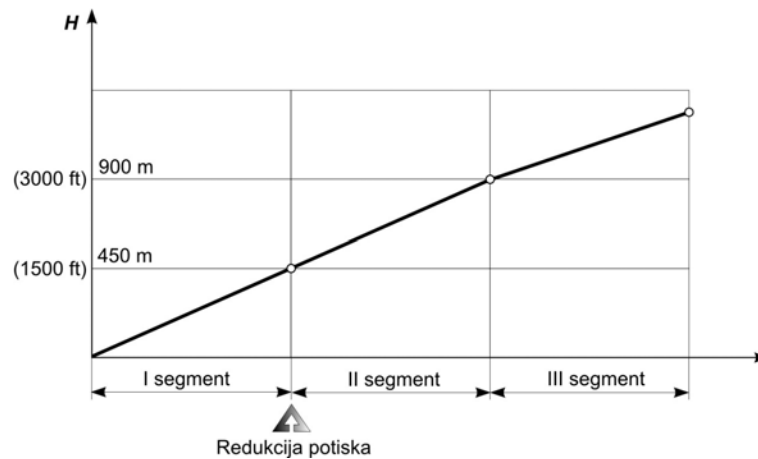
Izvor: <http://www.av8n.com/how/htm/takeoff.html#tab-takeoff-simple-numbers#tab-takeoff-simple-numbers>



Grafikon 17. Prikaz veličine buke nastale od pojedinih komponenti zrakoplova pri polijetanju

FAA postupak za polijetanje u svrhu redukcije buke prihvaćen od strane ICAO-a

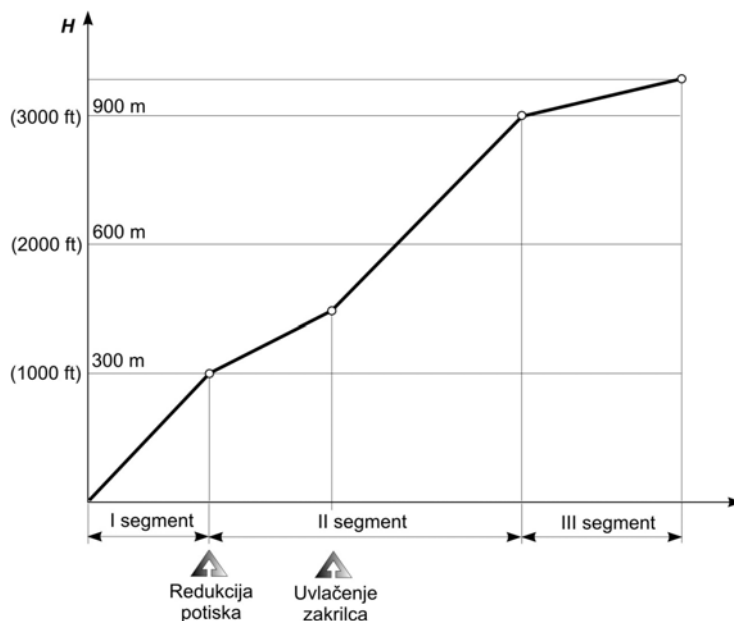
Na slici 86. prikazana su sva tri segmenta polijetanja koji su definirani kao postupak FAA i prihvaćeni od strane ICAO-a te proces reduciranja buke u gore navedena tri segmenta. U prvom segmentu koristi se potisak za polijetanje, brzina v_2 povećava se za 19 km/h kako bi se dobio veći kut penjanja do 450 m (1500 ft) te su zakrilca u položaju za polijetanje. Nakon prvoga segmenta dolazi do redukcije potiska. U drugom segmentu koristi se potisak za penjanje, brzina se održava kao i u prvom segmentu (brzina v_2 povećava se za 19 km/h), dok se zakrilca djelomično uvlače, ali pod uvjetom da se brzina može povećati na $v_2 + 19$ km/h. Treći segment odnosi se na fazu penjanja te u njemu koristi jačina potiska za penjanje. Brzina se povećava na 465 km/h i konstantno se održava do visine od 3000 m. Zakrilca se nakon ubrzanja uvlače kako bi se smanjio otpor. U trećem segmentu brzina se mora održavati od 2.5 do 5 m/s u tijeku ubrzanja. Putem ovakvoga načina polijetanja potisak se povećava te omogućuje zrakoplovu brže udaljavanje od zemlje pod većim kutom. Time buka na zemlji kraće traje. Taj se postupak može primijeniti na svim zrakoplovima te ne zahtijeva ugradnju nikakve dodatne nove opreme niti u zrakoplov niti na zemlji.



Slika 86. Prikaz tri segmenta definiranih od strane FAA u polijetanju

Postupak za polijetanje u svrhu redukcije buke koju je izradio ICAO

Postupak ICAO za redukciju buke zrakoplova nešto je drugačiji od FAA postupka. Kao i FAA postupak, ICAO postupak sastoji se od tri segmenta. U prvom segmentu koristi se standardni potisak za polijetanje, brzina iznosi $v_R + 19 - 37$ km/h te su zakrilca u položaju za polijetanje. Nakon prvoga segmenta slijedi redukcija potiska te se prelazi na drugi segment. U drugom segmentu koristi se potisak za penjanje (za zrakoplove koji sporije uvlače zakrilca, treba se smanjiti potisak na onu vrijednost koja je potrebna za let sa zakrilcima u međupoložaju), brzina se u prvom dijelu drugoga segmenta povećava dok zakrilca nisu pod 0 stupnjeva te u položaju za polijetanje. U drugom dijelu brzina se povećava za 19 km/h te su zakrilca uvučena. U trećem segmentu koristi se potisak za penjanje, brzina se povećava na 465 km/h i održava se od 3000 metara. U tom segmentu zakrilca su uvučena.



Slika 87. Prikaz tri segmenta definiranih od strane ICAO u polijetanju

Sigurnosne granice kada se operacije ne smiju obavljati ni pod kojim uvjetima

Postoje određene granice kada se buka može spriječiti no sigurnosni standardi to ne dozvoljavaju. U takvim situacijama redukcija buke se zanemaruje i sve se usmjerava prema sigurnosti leta. Tako postoje osnovne operativne granice:

- procedure za smanjenje buke zrakoplova ne smiju se koristiti ukoliko se zna da neće doći do reduciranja buke zrakoplova;
- zabranjeno je korištenje procedure penjanja kojima se smanjuje buka zrakoplova ukoliko se ispune minimalni zahtjevi koji su potrebni za taj manevar;
- odluka za korištenje bilo koje od procedura je na kapetanu zrakoplova te ukoliko on smatra da bi time mogao ugroziti putnike i let zrakoplova, može ignorirati proceduru za smanjenje buke zrakoplova.

Sigurnosni zahtjevi na proceduri polijetanja najviše se odnose na redukciju snage motora.

Redukcija buke zrakoplova u fazi polijetanja ne smije se izvoditi ukoliko:

- na sigurnost polijetanja utječe stanje na uzletno sletnoj stazi (snijeg, led, voda, ulje, blato);
- kada je horizontalna vidljivost manja od 1.9 km (1 NM);
- kada bočna komponenta vjetra prelazi brzinu od 28 km/h (15 kt);

- kada komponenta lednoga vjetra prelazi brzinu od 9 km/h (5 kt) i
- kada dolazi do smicanja vjetra, te je objavljena mogućnost oluje u zoni u koji se odvija procedura polijetanja i slijetanja.

6.4.1.2. Prilaženje i slijetanje zrakoplova

Nakon faze poniranja zrakoplov dolazi u fazu prilaženja. To je faza kada se zrakoplov postavlja na liniju koja vodi prema osi uzletno sletne staze i pod kutom poniranja koji je definiran prilaznim radio uređajima Localizer-om i Glide Slope-om koji su kao cjelina poznatiji kao ILS (Instrumental Landing Sistem – sustav za instrumentalni prilaz). Za prilaženje koristi se slijedeća konfiguracija:

- koristi se minimalni potisak za prilaženje
- zakrilica su u položaju za prilaženje
- predkrilca su u položaju za prilaženje
- stajni trap je uvučen
- aerodinamičke kočnice su uvučene

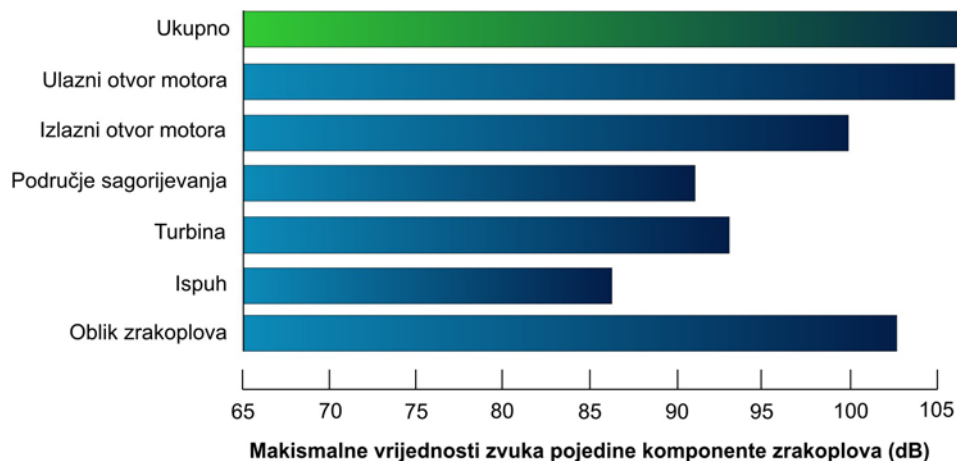
Kada se zrakoplov prilagodi gore navedenoj konfiguraciji, pilot prima signal lokalizera te ulazi u završni nagib za prilaz, nakon čega slijedi faza slijetanja. U ovom prilazu treba biti oprezan s obzirom da se u bilo koje vrijeme faza prilaženja može prekinuti i pilot mora biti spreman produžiti let. Razni su razlozi prekinute faze prilaženja. Prve sigurnosne provjere rade se pri izradi zrakoplova kada proizvođač mora pred civilnim zrakoplovnim vlastima demonstrirati prekinuto slijetanje te nastaviti produžavanje leta. Sigurnosni zahtjevi koji u tome trenutku moraju biti ispunjeni za mlazne zrakoplove su:

- stupanj poniranja zrakoplova mora imati slijedeće vrijednosti:
 - 2.1% za dvomotorne zrakoplove
 - 2.4% za tromotorne zrakoplove
 - 2.7% za četveromotorne zrakoplove
- navedena demonstracija izvodi se pod slijedećom konfiguracijom
 - kritičan motor ne radi
 - ostali motori rade i razvijaju potisak za polijetanje
 - težina zrakoplova mora biti ravna maksimalnoj strukturalnoj težini slijetanja

- stajni trapovi su uvučeni
- zakrilca i predkrilca su u položaju za prilaženje

Nakon faze prilaženja, slijedi faza slijetanja. Nju možemo definirati kao fazu koja počinje od trenutka kada se zrakoplov dovede u konfiguraciju za slijetanje. Za izvlačenje zakrilca i predkrilca u položaj za slijetanje i izvlačenju stajnih trapova potrebno je određeno vrijeme kako bi se let stabilizirao, poslije čega slijedi slijetanje.

U procesu slijetanja postoje tri faze. Prva faza je prilaz prema pravolinijskoj putanji. Druga faze predstavlja rotaciju zrakoplova pri čemu se on dovodi do pozicije da mu napadni kut krila dođe na vrijednost predviđenu za slijetanje. Prilikom dodira uzletno sletne staze neophodno je zrakoplov dovesti u konfiguraciju punoga kočenja. U što kraćem vremenu nosni se kotač spušta prema uzletno sletnoj stazi kako bi se iz sigurnosnih razloga izbjeglo odskakivanje zrakoplova. Dodirom nosnog kotača smanjuje se napadni kut na krilu, a time i sila uzgona. Nakon te faze dolazi do upotrebe aerodinamičke kočnice i spoilerera. Cilj ove faze je da se s jedne strane krila poveća otpor i na taj način doprinese boljem aerodinamičnom kočenju. Treća faza je pritisnuti nožne kočnice. To se izvodi u onom trenutku kada to konstrukciji sistema najviše odgovara. Noviji sustavi su toliko razvijeni da se nožna kočnica može pritisnuti prije nego je došlo do dodira sa uzletno sletnom stazom. Kada su sve tri faze ispunjene, možemo reći da je zrakoplov došao u konfiguraciju punoga kočenja.



Grafikon 18. Prikaz razine buke pojedinih komponenti zrakoplova pri slijetanju

6.4.1.2.1 Standardni postupak u slijetanju

U slijetanju tj. prilaženju, postoji veći broj postupaka, pa ih možemo usporediti sa standardnim postupkom u prilaženju. Standardni postupak predstavlja slijetanje zrakoplova sa visine od 1500 – 2000 ft iznad aerodroma na koji slijeće. U tom letu pilot prvo prihvaća signal *markera*, čime dovodi zrakoplov na os USS-e tj. liniju koja se poklapa s osi USS-e. Leteći u toj ravnini, pilot prihvaća signal kuta poniranja (koji je pod kutom od 3 stupnja u odnosu na horizontalnu ravninu *točka A*), a zatim prelazi u poniranje. Leteći pod kutom poniranja pilot dovodi zrakoplov iznad praga USS-e na visinu od 15 metara, nakon čega izvodi slijetanje. Tijekom cijeloga leta od kada je pilot primio signal *marker-a*, zrakoplov se nalazi u postupku slijetanja (stajni trap izvučen, predkrilca izvučena, zakrilca potpuno izvučena). Da bi se let mogao normalno odvijati (prvo u horizontalnom letu, pa onda u poniranju) potisak motora se mora povećati da se izjednači s ukupnim otporom zrakoplova, a povećani potisak daje sekundarnu pojavu - veću buku koju stvara sam motor.⁹

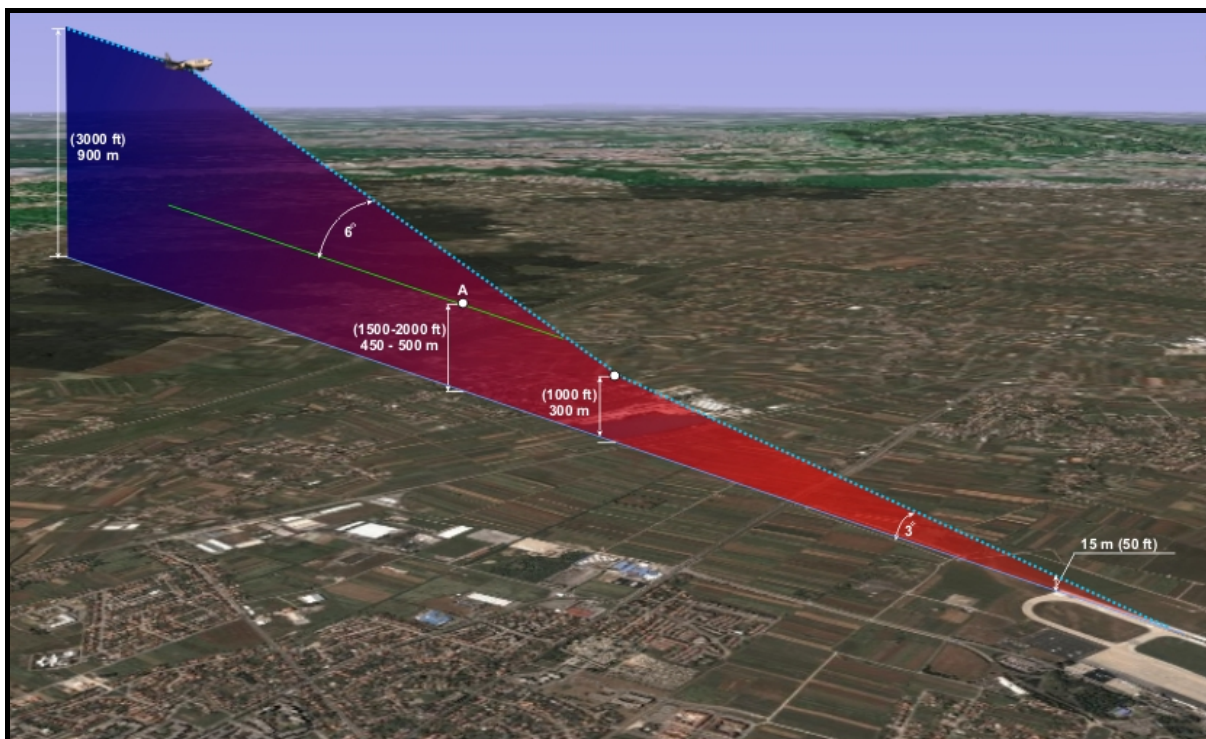


Slika 88. Prikaz standardnog postupka slijetanja na Zračnoj luci Zagreb

⁹ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

6.4.1.2.2 Prilaz u dva stupnja

Ovaj se postupak počinje razvijati u SAD-u, no za njegovu primjenu neophodno je opremiti zrakoplov elektronskom opremom i postaviti dodatne uređaje na aerodromu. Kao i u prethodnom postupku zrakoplov leti horizontalno na visini 900 metara (3000 ft) sve do točke B, gdje pilot hvata specijalan signal kuta poniranja koji je postavljen pod kutom od 6 stupnjeva pri čemu zrakoplov ponire pod tim kutom sve do točke C na približno 300 metara (1000 ft) visine, gdje pilot hvata signal standardnog kuta poniranja od 3 stupnja po kome se vrši zadnji dio prilaznja i konačno slijetanje. Dok su dosadašnjom praksom piloti slijetali na način da su prilazili USS-i pod kutom od 3 stupnja, u ovom postupku obvezni su prvi dio prilaza vršiti pod dvostruko većim kutom. Takav način slijetanja zahtijeva dodatno školovanje pilota.¹⁰

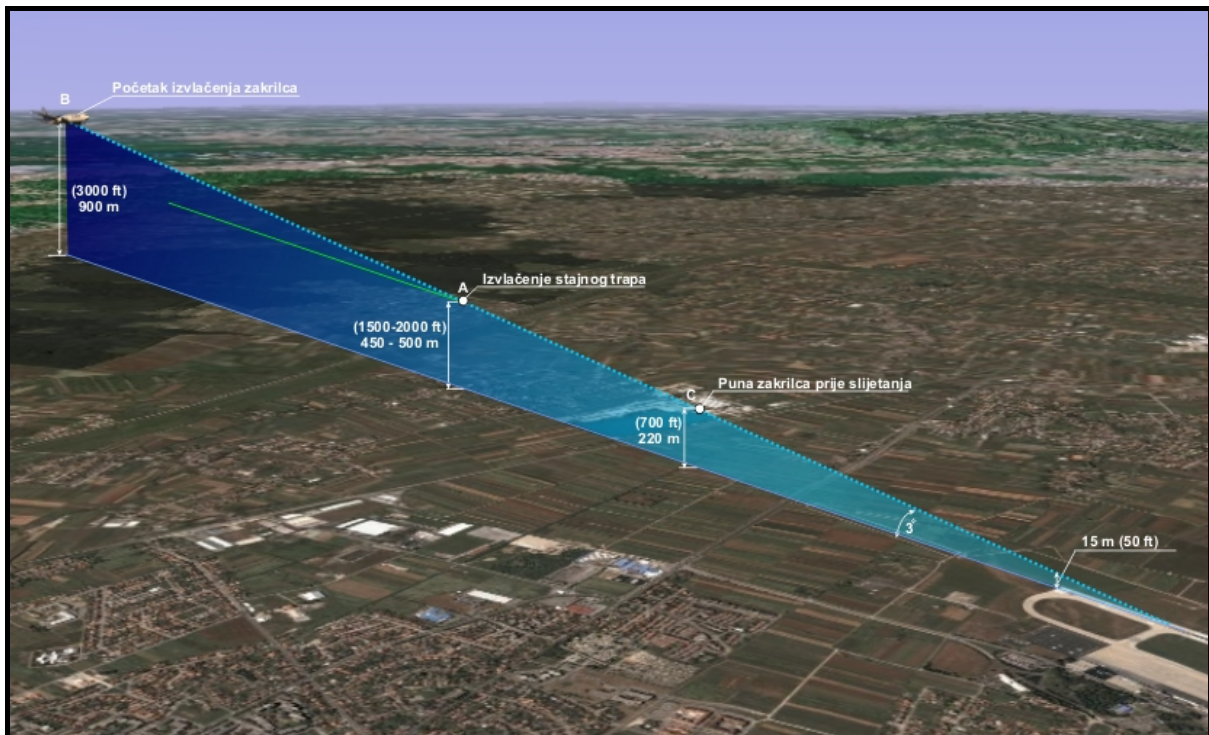


Slika 89. Prilaz u dva stupnja

¹⁰ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

6.4.1.2.3 Postupak Lufthansa-e

Postupak koji prakticira Lufthansa prema kojemu je i dobio ime je s operativne točke gledanja vrlo interesantan jer ne zahtijeva dodatnu opremu ni na zrakoplovima niti na zemlji. Prilaz do momenta hvatanja signala kuta poniranja vrši se na visini od 900m (3000 ft) od standardne pa je zbog toga, sve do dostizanja visine od oko 450 metara, buka koju stvara zrakoplov znatno manja. Isto tako, ovom procedurom buka je i dalje niža od standardne procedure jer je i otpor zrakoplova prilikom leta sa manje izvučenim zakrilcima manji te je tada za let u prilaženju potreban manji potisak, a to znači i manju buku. Iz razloga što se ovdje radi o slučaju gdje se zrakoplov duže vrijeme drži u konfiguraciji koja ima manji otpor u odnosu na standardnu proceduru, ova se procedura naziva procedurom *malog otpora – malog pritiska*. Konačno na 40 – 50 sekundi prije samog slijetanja izvlači se stajni trap, čime se zrakoplov dovodi u konačnu konfiguraciju za slijetanje. Od toga momenta ostaje dovoljno vremena da pilot uravnoteži let zrakoplova po putanji kuta poniranja i da konačno prizemlji. Ova procedura donosi i izvjesnu uštedu utrošenog goriva što joj daje poseban značaj.¹¹



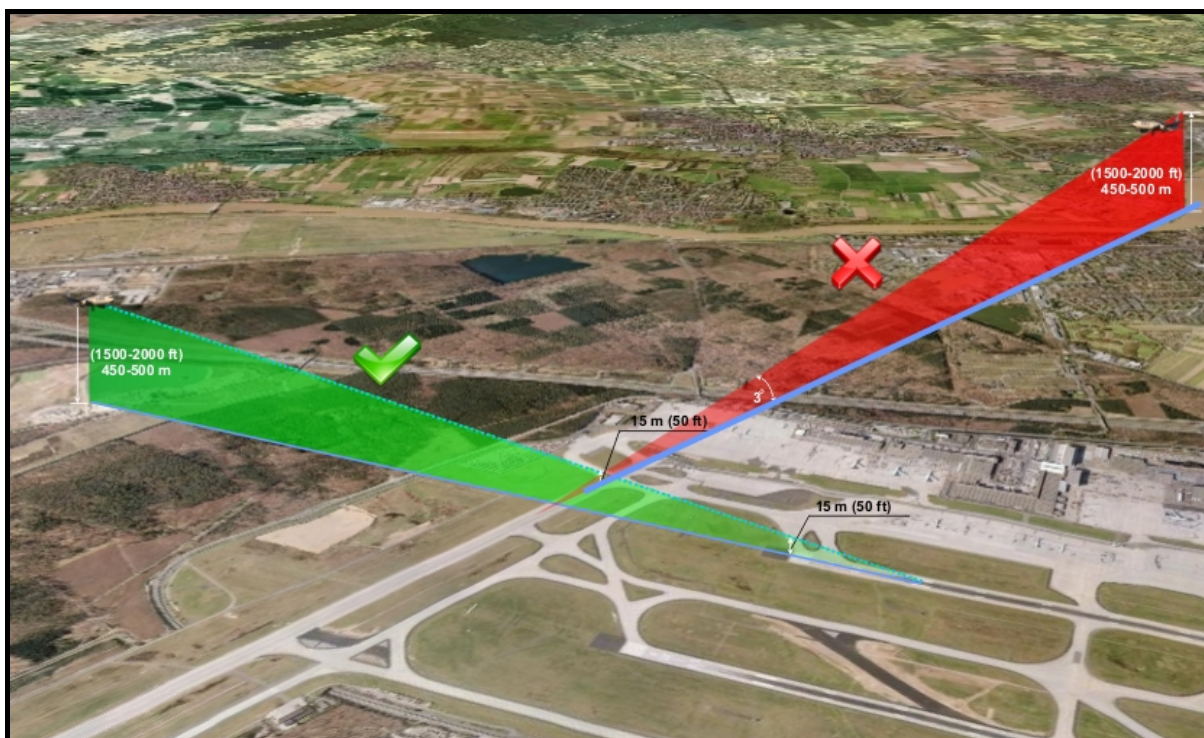
Slika 90. Postupak Lufthanse

¹¹ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

6.4.1.2.4 Selektivno korištenje USS-e

Svrha selektivnog korištenja USS-e (kod aerodroma koji imaju veći broj USS-a) je u činjenici da se (kad je to moguće) koriste one USS-e koje omogućavaju da zrakoplov u inicijalnoj fazi polijetanja, odnosno u fazi finalnog prilaženja, izbjegne mjesta osjetljiva za buku. Bitno je da selektivno korištenje USS-e ne smije utjecati na sigurnost leta, tako da se ova metoda ne koristi ukoliko:

- izabrana USS-a nije čista i suha (ukoliko je pokrivena snijegom, ledom, vodom ili gumenim otpacima)
- meteorološki su uvjeti takvi da se baza oblaka nalazi na visini manjoj od 150 metara iznad odabrane USS-e za slijetanje. Isto tako ako su uvjeti za polijetanje i slijetanje takvi da je horizontalna vidljivost manja od 1852 m (1NM)
- za izabranu USS-u komponenta bočnog vjetra zajedno sa udarima vjetra prelazi 29 km/h
- za izabranu USS-u komponenta repnog vjetra zajedno sa udarima vjetra prelazi 9 km/h
- se očekuje "smicanje vjetra" ili nevjeme koje može imati utjecaja na let u prilazu ili odletu.
- pilot smatra da time ugrožava sigurnost leta¹²

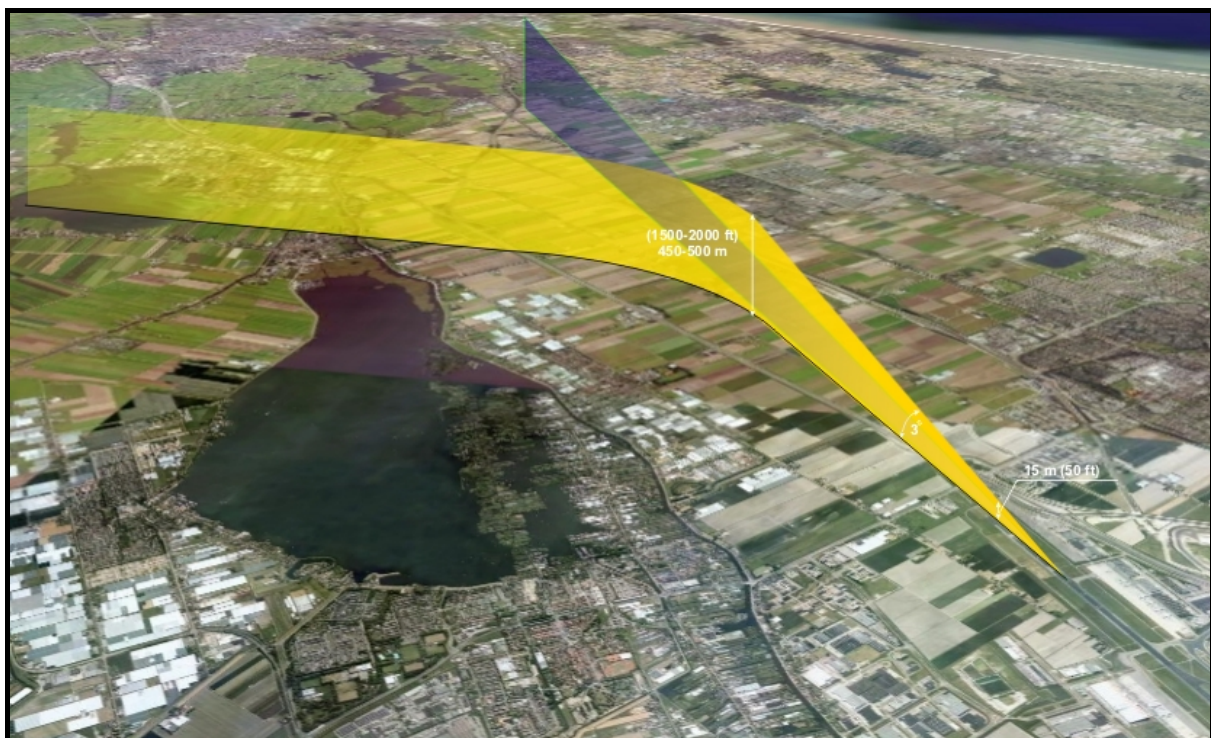


Slika 91. Selektivno korištenje dvije ili više uzletno sletnih staza

¹² J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

6.4.1.2.5 Prilaženje / odlet na krivolinijskoj putanji

Upotrebom sistema za slijetanje koji radi na mikrovalovima (Microwave Landing System – MLS) moguće se u prilazu služiti krivolinijskom putanjom, pa tek završno prilaženje izvršiti letenjem u ravnini osi USS-e. Ukoliko se u osi USS-e nalazi naseljeno područje, moguće je izbijeći prelijetanje istog i tako smanjiti buku u naselju. Za ovu proceduru je neophodna specijalna elektronska oprema u zrakoplovu i na zemlji. Situacija je slična ako se u odletu umjesto pravolinijskog leta pristupa zaokretu te na taj način izbjegne naselje. Ovim načinom se buka u naselju smanjuje.¹³

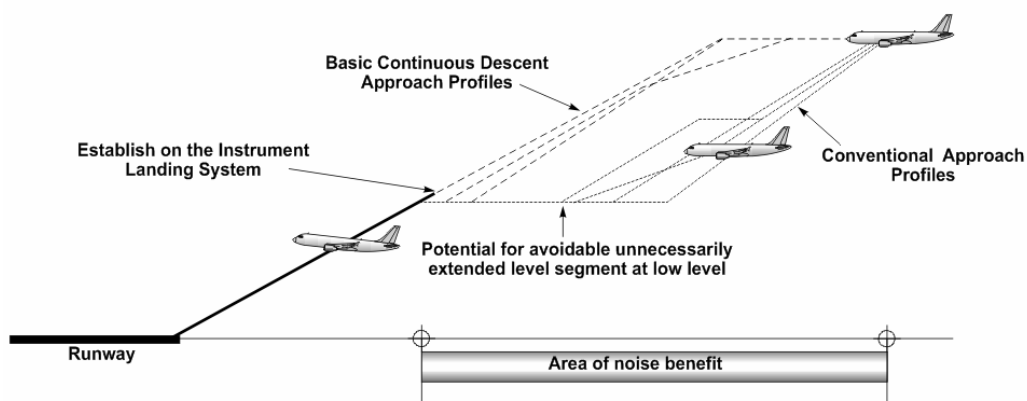


Slika 92. Prilaženje po krivolinijskoj putanji

¹³ J. Golubić; **Promet i okoliš**, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.

6.4.2. Implementacija CDA tehnike pri slijetanju u svrhu redukcije buke zrakoplova na Zračnoj luci Zagreb

Kako bi se omogućilo povećanje protočnosti prometa i smanjenje razine buke iznad zračne luke, razvijena je tehnika slijetanja pod nazivom „prilaženje sa neprekinutim snižavanjem visine“ (Continuous Descent Approach - CDA). Procedura prilaženja sa neprekinutim snižavanjem visine, omogućuje zadržavanje zrakoplova na višim nivoima leta, tj., odgađa sam početak operacije spuštanja te time omogućuje pilotima snižavanje s krstareće visine do momenta presijecanja linije prilaženja pod odgovarajućim kutom („glideslope“) za završno prilaženje. Ovakav oblik prilaza za posljedicu ima znatno smanjivanje razine buke, potrošnje goriva i emisije štetnih ispušnih plinova prema naseljima, koja se nalaze u neposrednoj blizini zračne luke. Preko CDA prilaza ostvaruje se duže zadržavanje na većoj visini, jer se razina buke znatno smanjuje kad je udaljenost između izvora buke i prijemnika buke povećana i za male udaljenosti. Da bi se CDA procedura mogla primijeniti, kontrola zračne plovidbe treba odrediti specifičnu ili minimalnu brzinu nadolazećeg zrakoplova te dati informaciju pilotu o udaljenosti točke dodira uzletno-sletne staze, da bi pilot osigurao vertikalni profil zrakoplova. Takva kontrola brzine maksimizira kapacitet uzletno-sletne staze. Prilazna kontrola vodi zrakoplove primjenom postupaka radarskog vektoriranja i odobrava neprekidno spuštanje do razine međuprilaza, tako da se razina dostigne na smjeru usmjerivača udaljenosti od oko 8 NM od točke dodira. Neprekidno snižavanje do odobrene razine provodi se brzinom snižavanja od 300 ft/NM (kut snižavanja oko 3°).



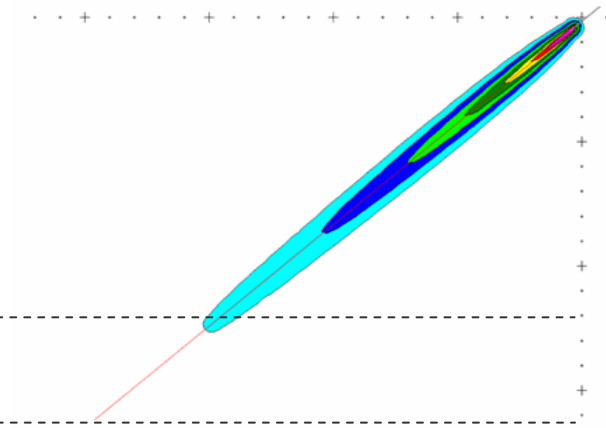
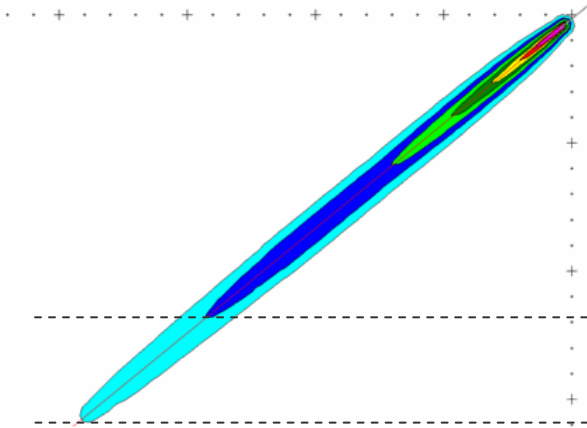
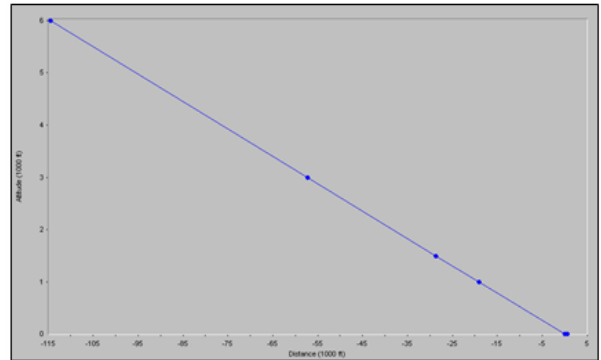
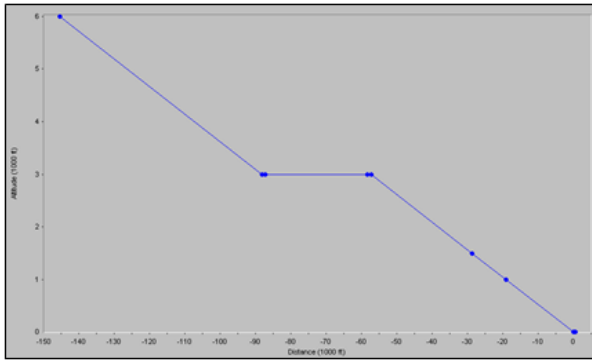
Slika 93. Konceptualni dijagram CDA procedure

Ključni čimbenik koji omogućuje CDA tehniku prilaznja za slijetanje, je optimizacija tehnike prilaza – upravljanja zrakoplovom uz primjenu tehnike pilotiranja “mala snaga motora – mali otpor“. U praksi to znači da pilot leti na minimalnoj snazi što je moguće duže, uz izvlačenje konfiguracije zrakoplova u optimalnom trenutku, kako bi trenje u letu smanjio na minimum i na što kraće vrijeme. Prednost CDA tehnike je da se može koristiti na bilo kojem zrakoplovu, na svakoj zračnoj luci i u svim oblicima prometovanja, pod uvjetom da su piloti spremni i obučeni za njenu primjenu. Korištenje CDA tehnike je praktični primjer kako se inovativnim pristupom može razriješiti gorući problem smanjenja potrošnje goriva, uz istovremeno pozitivno djelovanje na okoliš zračne luke glede smanjenja buke. Preduvjet za masovnu uporabu nove tehnike je donošenje normativne regulative te odgovarajuća obuka pilota i kontrolora letenja.

Zakon o zračnoj plovidbi (N.N. 132/98 i 178/04.) članak 101. u Republici Hrvatskoj govori o postupku prilaznja sa neprekinutim snižavanjem. U spomenutom članku je navedeno da se CDA postupak može primjenjivati samo tijekom ILS prilaznja u cilju uštede goriva i smanjenja buke, ako to prometna situacija dopušta, a na zahtjev pilota, ili prijedlog kontrolora zračnog prometa. Neprekinuto snižavanje do odobrene razine provodi se brzinom snižavanja od 300 stopa/NM (kut snižavanja oko 3°)

U svrhu prikaza benefita u redukciji buke između konvencionalnog prilaza i CDA prilaza izrađena je karta buke za zrakoplov Airbus 319/320 sa prilazom na Zračnu luku Zagreb – prag 05. Za izradu karte buke korišten je INM program te podaci o zrakoplovu i procedurama prilaza koji su standardni u svijetu.

Na Zračnoj luci Zagreb napravljena je simulacije uz pomoć INM programa te se iz rezultat te simulacije između konvencionalnog i CDA prilaza vidi na kartama buke (slika 85.), pri čemu je očito da zadržavanje zrakoplova na većoj visini i dopuštanje postupka sa neprekinutim snižavanjem visine doprinosi redukciji buke na zemlji čija površina pokrivenosti buke ovisi od zrakoplova do zrakoplova tj. o njegovoj pogonskoj skupini i aerodinamici. Kod zrakoplova Airbus 319/320 zona buke od 55 i 60 dB može biti znatno smanjena u prilazu i do nekoliko kilometara.



Slika 94. Simulacija odnosa konvencionalnog (step down) i CDA prilaza izrađena na INM sustavu
Zračne luke Zagreb

6.4.3. Redukcija i kontrola buke zrakoplova pri operacijama na zemlji

Kada se govori o buci proizvedenoj kod operacija na zemlji, misli se na buku nastalu od zrakoplovnog izvora koja se stvara kod operacija opsluživanja, održavanja zrakoplova i tijekom njegova remonta. Iako se takav tip buke kontrolira kako bi se otklonile pritužbe okolnog stanovništva, najčešće se poduzimaju još neke mjere za njegovu kontrolu u odnosu na sigurnost osoblja. Često se smanjenje buke od 10 dB ili više u određenim područjima blizu zračne luke može postići ispravnom upotrebom određenih uzoraka raznih izvora buke. Preseljavanje testiranja motora zrakoplova na područja podalje od zračnih luka te iskorištavanje bilo koje posebne meteorološke i terenske okolnosti kao i druge alternative mogla bi biti prihvatljivija rješenja. Određeni vremenski period također je povoljan za zvučno širenje. Zato, operacije održavanja kod ovih vremenskih uslova trebaju biti izbjegnute noću kada stanovništvo spava.

Ukoliko zrakoplovi rade u blizini hangara ili zgrada, efekt zaklanjanja hangarom može smanjiti razinu buke pored hangara od 10 do 25 dB. Najučinkovitija metoda reduciranja buke kod održavanja rada motora mlaznog zrakoplova je upotreba prigušivača. Prenosiv ili stacionarni prigušivač obično omogućuju redukciju u razini zvuka od 10 do 25 dB, ovisno o izolaciji između prigušivača i zrakoplovnog motora. Svakim se danom poduzimaju sve veće mjere kako bi se smanjila buka. Zračne su luke pod pritiskom javnosti i vlasti uvode dodatne mjere za smanjenje negativnog utjecaja buke na okoliš poput: ograničenja prihvata bučnih zrakoplova, uvođenjem postupaka u prilazu i odletu radi smanjenja buke, uvođenjem prilazno-odletnih putanja iznad manje naseljenih ili nenaseljenih područja, zatvaranjem zračnih luka noću, zvučnom izolacijom kuća odnosno zgrada, zoniranjem prostora, preseljavanjem itd. Kako bi se standardiziralo mjerenje intenziteta buke pri certificiranju zrakoplova, ICAO je propisao standardne uvjete i referentne točke u blizini USS-e kojima se utvrđuje razina buke u slijetanju odnosno polijetanju.

6.4.3.1. Smjer širenja buke zrakoplova prilikom servisiranja i testiranja motora na Zračnoj luci Zagreb

Zračna luka Zagreb središte je za servisiranje zrakoplova državnog prijevoznika Croatia Airlines. Na području zračne luke nalaze se i dva hangara Croatia Airlines-a sa popratnom stajankom u kojem se izvode radovi na zrakoplovima. Flotu Croatia Airlinesa čine četiri zrakoplova Airbus, tipa A320, četiri A319 i tri zrakoplova tipa ATR-42. Glavni radovi na tim zrakoplovima izvode se u hangaru Croatia Airlinesa, no ukoliko se treba napraviti proba motora nju je moguće, uz stajanku ispred hangara, napraviti i na glavnoj stajanci zračne luke ukoliko tim procesom nije ugrožen promet ili sigurnost osoblja. Česta je pojava da se testiranja motora izvode baš na glavnoj poziciji iz razloga što za manji kvar nije isplativo dovesti zrakoplov do stajanke ispred hangara te zbog 30 sekundi probe motora izvlačiti zrakoplov 20 minuta izvan prometa. Testiranje motora zrakoplova izvodi se najčešće na pozicijama od 12-21 uz obavezno prisustvo vatrogasaca. Najčešća su to testiranja motora do 30% snage na glavnoj stajanci, no na stajanci Croatia Airlinesa snaga može biti znatno jača. Zrakoplovi su na glavnoj stajanci okrenuti prema zgradi, tj potisak motora je okrenut smjerom prema Zagrebu (okolnim selima uz ogradu zračne luke). Jaka buka moguća je u večernjim satima prilikom testiranja motora kada zrakoplovi nisu operativni. U to vrijeme promet je slaboga intenziteta pa je svako testiranje motora veliki izvor buke za okolno stanovništvo.

6.4.3.2. Uvođenje vremenskih restrikcija na zračne luke

Svaka zračna luka strogo je definirala vremensku granicu od kada i do kada zrakoplovi smiju letjeti te gornje granice buke koje su dopustive. U početku su te restrikcije bile usmjerene na općenito stanje i reputaciju zračne luke i provodile su se jedino ako je to bilo u interesu zračne luke. U današnje vrijeme mjerenje buke zrakoplova i uvođenje restrikcija sastavni su dio rada zračnih luka. U razvijenim zemljama uvedene su i noćne restrikcije kojima se smanjuje ili eliminiraju bučne operacije tijekom kasnih noćnih sati, kada su ljudi najosjetljiviji na buku. Takve restrikcije mogu imati veliki L_{dn} jer se na glavnu vrijednost dodaje 10 dB penala. Te restrikcije traju između 22:00 i 07:00 sati dok traje L_{dn} . Najjednostavnije rješenje za zrakoplovne kompanije u sprečavanju bučnih operacija je da ne lete ka onim zemljama gdje su na snazi restrikcije o buci zrakoplova. U današnje vrijeme svjetski poznate zračne luke uvele su restrikcije na način da je promjena flote s jedne strane ili plaćanje taksi zbog buke

neizbježna. U večernjim satima ta taksa mora biti viša, dok u noćnim satima mora biti najviša. Tako isti zrakoplov za noćno slijetanje plaća mnogo više penale, a posljedica je veće uvođenje dnevnih operacija.

6.5. Zaključak

Uvođenjem tehničko-tehnoloških rješenja u svrhu redukcije buke u zoni zračne luke izbjegnut je neželjeni efekt iste. U tu svrhu uvedene su četiri metodologije. Prva metodologija vezana je uz redukciju buke zrakoplova u samom izvoru, gdje se u prvom redu misli na proizvodnju tiših zrakoplovnih motora i razvoju prihvatljivije aerodinamičke strukture sa što manje površina koje stvaraju otpor, a time i veću buku. Druga metodologija vezana je za urbanističko planiranje zemljišta. Izrada karte kontura buke na kojoj se može vidjeti izloženost pojedinih zona može poslužiti kao dobar temelj za daljnje širenje naselja kako bi se izbjeglo izlaganje stanovništva u izloženom području te se ta zemlja pokrivena bukom iskoristila u druge svrhe kao što su poljoprivredne. Treća metodologija odnosi se na operacijske procedure u smislu polijetanja i slijetanja. Za polijetanje se koliko je moguće gleda na redukciju potiska. Kod operacija slijetanja razvijeno je nekoliko tehnika slijetanja ovisno o mogućnosti i zahtjevima terena. Neka od njih su slijetanja sa povećanom visinom te kutom poniranja pri čemu se na koridorima mogu izbjeći neka naselja u prilazu, do krivolinijskih putanji kada se zrakoplovi postavljaju na koridore iznad nenaseljenih područja. Sve procedure slijetanja i polijetanja mogu se koristiti tek nakon što je zadovoljen uvjet sigurnosni leta. Četvrta i moglo bi se reći najrigoroznija metodologija koja se počela primjenjivati u svijetu jest metodologija zabrane leta pojedinih zrakoplova, pri čemu je to veliki financijski udar na zrakoplovne kompanije koje imaju svoju flotu.

7. Zaključak

Na Zračnoj luci Zagreb implementiran je sustav za mjerenje i analizu buke zrakoplova sukladno regulativama koje su donesene u zemljama Europske unije te uvjetovanim pristupnim pregovorima Republike Hrvatske kao buduće članice EU. Sustav je preuzet od danske firme Bruel & Kjaer koja je vodeća u svijetu na području akustike i praćenja buke zrakoplova. Sam sustav sastavljen je od tri fiksne stanice i jedne mobilne te popratnih programa za kontrolu i mjerenje buke.

Nakon priprema sustava i instalacije programa započelo je mjerenje i daljnja analiza dobivenih vrijednosti. Iako se mjerenje vrši od travnja 2007. godine, u svrhu ovoga magistarskog rada uzet je period od 01. siječnja do 30. rujna 2008. godine. Uz mjerenje na NMT stanicama i ENM programu, istodobno se radilo na obradi podataka potrebnih za izradu karata kontura buke. Tom je obradom utvrđeno da na Zračnu luku Zagreb slijeću zrakoplovi kratkog i srednjeg doleta kategorije 3 prema certifikaciji, što znači da se radi o modernim i tihim zrakoplovima. Jedini zrakoplov koji slijeće i polijeće na Zračnu luku Zagreb, a pripada kategoriji 2 jest Tupolev 154 zrakoplovne kompanije Aeroflot. Prema saznanjima taj bi se zrakoplov za europsko tržište trebao zamijeniti zrakoplovom tipa Airbus koji je zrakoplov 3 kategorije prema certifikaciji, zbog velikih troškova koje plaća (penala) pri slijetanju i polijetanju na aerodromima unutar Europske unije. Kako bi se pristupilo paralelno i izradi karte buke moralo se odraditi nekoliko pripremnih analiza te obrada podataka iz baze podataka Zračne luke Zagreb. Jedna od njih bila je specifikacija komercijalnih zrakoplova prema maksimalnoj težini, a kao rezultati se pokazalo da su to sve zrakoplovi maksimalne težine na polijetanju od 13 do 100 tona. Uz obradu podataka vezanih za operacije vršilo se mjerenje na stanicama za mjerenje buke Zračne luke Zagreb. Nakon prikupljenih podataka s mjernih stanica načinjena je analiza razine buke pri polijetanju i slijetanju za svaki pojedini prag uzletno sletne staze. Prema podacima dobivenim od meteo službe te prometnog centra Zračne luke Zagreb, pragovi na uzletno sletnoj stazi koriste se za operacije polijetanja i slijetanja u omjeru 90% prag 05 i 10% prag 23. Iz toga razloga načinjena je analiza svakoga praga zasebno kako bi se ustanovila razina buke ovisno o polijetanju i slijetanju zrakoplova. Zračna luka Zagreb prilagodila se standardima mjerenja buke u Europskoj uniji na način da je uvela trodnevno mjerenje tj. izvršena je podjela na tri dijela: dan, večer i noć. Prema EU direktivi trajanje dana mjeri se od 07-19 h, večeri od 19-23 h a noći od 23-07 h. Taj je zakon donesen u smislu preporuke, no dozvoljeno je državi koja ga je usvojila navedeni zakon pravo

izmjene tog vremena za +/- jedan sat. Zračna luka Zagreb odredila je da to bude vrijeme za dan od 06-18, večer 18-22 i noć 22-06 sati. Ova je odredba nešto stroža budući da je smanjen večernji period kojem je penalizacija 5 dB te povećan noćni period kojem je penalizacija 10 dB. Mjerenjima u vremenskom periodu od 01. siječnja do 30. rujna dobiveno je ukupno 49319 izmjerenih zapisa (*events*) preko 50 dB na sve četiri mjerne stanice (NMT) i to prema podjeli od čega je 24427 zapisa snimljeno je na stanici NMT 1, 24072 na stanici NMT 2, 509 na NMT 3 stanici, dok je mobilna stanica bila postavljena unutar zgrade te su njena mjerenja zanemariva. Gledano prema vremenu događanja tj. podjeli na dan, večer, noć (Lden) 81,7% zapisa snimljeno je u razdoblju dana, 13,3% u večernjem razdoblju, dok je svega 5% zapisa snimljeno u noćnom razdoblju. Prema radnom iskustvu u operativnom sektoru Zračne luke Zagreb, od tih 5% većina je letova na samoj granici od 22:00 sata budući da prema redovnom redu letenja iza 23:00 sata nema operacija. U odnosu na druge zračne luke u Europi kao što su zračna luka u Frankfurtu i Munchenu te Amsterdamu, Zračna luka Zagreb ima manji broj operacija (razmak između operacija) te je time i ukupna buka manja.

S obzirom da je granica za rezidencijalno područje (miješane namjene) 65 dB, napravljena je analiza prema svim razinama buke. Prema skali razine buke za razdoblje od 01. siječnja 2008. do 30. rujna 2008. dobiveni rezultati pokazuju slijedeće vrijednosti: ispod 65 dB = 50 %, od 65-70 dB = 15%, 70-75 dB = 16,9%, 75-80 dB = 9,3%, 80-85 dB = 7,3%, 85-90 dB = 0,8%, 90-95 dB = 0,4%. Kako bi se napravio uvid u ekvivalentnu razinu buke kroz promatrani vremenski period, napravljena je analiza razine buke na stanicama NMT1 i NMT2 te su se dobili slijedeći rezultati: ekvivalentna razina buke na pragu 05 varira od 73 – 77 dB, dok je na pragu 23 od 65 – 71 dB. Uzrok ovako povišenoj razini Leq je blizina stanica koje se nalaze 300 metara od praga uzletno sletne staze. Kao što je već spomenuto, EU regulativa zahtijeva godišnju kalkulaciju na bazi Lden-a, a prema formuli koja je propisana EU direktivom načinjen je proračun Lden-a za gore navedeni vremenski period od 01. siječnja 2008. do 30. rujna 2008., pri čemu vrijednost Lden varira ovisno o mjesecu od 78 dB za stanicu NMT1 i 72 dB za stanicu NMT2. Odnos povećanja razine Lden na pragu 05 je sama blizina stanice pragu te kut slijetanja zrakoplova koji je u operaciji slijetanja manji od kuta polijetanja. Kako bi se u budućnosti mogli još preciznije izraditi proračuni i mjerenja, temeljem ovoga istraživanja preporuka je da se na temelju dobivenih rezultata postave dodatne mjerne stanice na os polijetanja i slijetanja u blizini naselja koja se nalaze na tim koridorima. To pokazuje i sama karta kontura buke te njezin oblik. Gledajući kartu buke, površina područja koja su izložena buci je slijedeća: 55dB = 11.10 km², 60dB = 4.78 km², 65dB = 1.90 km², 70dB = 0.95 km², 75 dB = 0.28 km², 80 dB = 0.09 km², 85 dB = 0.01 km².

Kada se uzme u obzir stanovništvo u izloženom području, može se reći da se većina stanovnika (legalno sagrađene kuće) prema karti buke za razdoblje od 01. siječnja 2008. do 30. rujna 2008 koja je rađena za ovaj magistarski rad nalaze u zoni do 65 dB.

Kako se mjerenje ne bi vršilo samo unutar zone zračne luke, NMT 4 mjerna stanica nakon probnih mjerenja ručnim mjeračem postavljena je u naselje Donja Lomnica u svrhu kontinuiranog praćenja buke. Prema rezultatima mjerenja može se zaključiti da se buka u naselju Donja Lomnica nalazi ispod 65 dB Leq vrijednosti. Kako bi se napravila detaljnija analiza sa razine buke od jednoga sata, period je skraćen na 15 minuta gdje se uvidom u rezultate mjerenja vidi da je razina buke u noćnim satima od 40 – 50 dB, dok se (s obzirom na slijetanja) u jutarnjim satima (od 08:00) povećava na 55 – 65 dB. Pravovremena reakcija na zračnoj luci Zagreb te implementacija sustava za mjerenje buke zrakoplova pokazale su i prijevremenu spremnost za rješavanja problema buke zrakoplova. S povećanjem prometa u budućnosti se očekuje i povećanje buke nastale operacijama slijetanja i polijetanja zrakoplova. Gledajući postojeće stanje buke, ona može narasti s povećanjem prometa, no po mom mišljenju za sprječavanje njenog dodatnog širenja treba uvesti naplatu pri prekoračenju dozvoljene razine buke te definirati druge metode slijetanja i polijetanja u svrhu redukcije iste. Kako bi se napravio korak dalje obzirom na spomenuti rast prometa te moguće povećanje buke zrakoplova izrađena je simulacijama u svrhu redukcije iste. U toj simulaciji napravljena je usporedba tzv. konvencionalnog i CDA prilaza. Ovom simulacijom došlo se do zaključka da je povećana razina buke u području od 55 i 60 dB pri CDA prilazu u odnosu na konvencionalni prilaz znatno smanjena zbog zadržavanja zrakoplova na većoj visini, pri čemu to rezultira kasnijim preletom naseljenih područja. Također s obzirom na sve rigoroznije zakone i ograničenja vezanih uz očuvanje okoliša koje propisuje Europska unija uvođenjem CDA tehnike dokazano je da uz znatnu redukciju buke također dolazi i do redukcije ispušnih plinova te uštede goriva. CDA procedura bila bi najjednostavnija i najefektivnija metoda za redukciju buke te ostalih štetnih elemenata kako na Zračnoj luci Zagreb tako i na svim zračnim lukama na području Republike Hrvatske.

Literatura

Knjige

- [1] Brüel&Kjær; **Environmental Noise**; Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S., Neurum, Denmark, 2001.
- [2] Golubić J.: **Promet i okoliš**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.
- [3] IATA – International Air Transport Association; **Airport Development Reference Manual**, 9th Edition, Montreal – Geneva, January 2004.
- [4] Pavlin S.: **Aerodromi I**, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
- [5] Smith M. J. T.: **Aircraft Noise**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1998.

Časopisi i znanstveni radovi

- [6] Asensio C., Pavon I., Ruiz M., Pagan R., Recuero M.; **Estimation of directivity and sound power levels emitted by aircrafts during taxiing**; Grupo de Investigacio en Instrumentacio Acustica Aplicada, Universidad Politecnica de Madrid, Spain; 2006.
- [7] Arafa M. H., Osman T.A., Abdel-Latif I.A.; **Noise assessment and mitigation schemes for Hurghada airport**; Department of Mechanical Design and Production Engineering, Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt, 2006.
- [8] AIAA paper 2001-2170 in the proceedings of the 7th AIAA-CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, The Netherlands on 28-30 May, 2001.
- [9] Brüel&Kjær ; **Technical Documentation; INM Link Version 3**; Type 7834; 2003.
- [10] Clemente J., Gaja E., Clemente G., Reig A.; **Sensitivity of the FAA Integrated Noise Model to input parameters**; Applied Acoustics, 2004.
- [11] Chow L. C., Lempereur P., Mau K.; **Aircraft Airframe Noise and Installation Effects- Research Studies**, Air&Space Europe, Vol I., No 3., 1999.

- [12] Chow L. C., Higgins J.; **Reduction of Airframe Noise from landing Gear**; Air&SpaceEurope RESEARCH & TECHNOLOGY; 2000
Clarke J.P.; **The role of advanced air traffic management in reducing the impact of aircraft noise and enabling aviation growth**; International Center for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA
- [13] Drage P., Wiesler B., Beek P., Lier L., Parchen R., Tibaut P.; **Prediction of noise radiation from basic configurations of landing gears by means of computational aeroacoustics**
- [14] ECAC.CEAC Doc 29; **Report on Standard Method of Computing; Noise Contours around Civil Airports**; European Civil Aviation Conference; Second Edition; 1997.
- [15] Eurocontrol; **Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment**; WP 4 – Aircraft sound sources; Netherlands, 2006.
- [16] González J. G.; **Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise**; EU Academie; 2004.
- [17] Guo Y.; **On noise reduction by flap side edge fences**; The Boeing Company, Journal of Sound and Vibration 277; Huntington Beach, USA, 2003.
- [18] Guo Y.; **A statistical model for landing gear noise prediction**; The Boeing Company, Huntington Beach, CA, USA 2004.
- [19] Harris Miller Miller & Hanson Inc; **Noise Measurements and Analysis Along the VOR/DME Approach Corridor to Mather Airport**;. TECHNICAL MEMORANDUM; Sacramento County Airport System; Sacramento International Airport; 2003.
- [20] Hosder S.; **Clean Wing Airframe Noise Modeling for Multidisciplinary Design and Optimization**; Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia, July 29, 2004.
- [21] Jopson I.; Rhodes D., Havelock P.; **Aircraft noise model validation – how accurate do we need to be?**; UK Civil Aviation Authority
- [22] Lilley G. M.; **The prediction of airframe noise and comparison with experiment**; Penn State University, Journal of Sound and Vibration, 2000.
- [23] Lépinay I.; **EGNOS Flight Trials at Nice Airport**; Noise Impact Study; EUROCONTROL Experimental Centre EEC/ENV/2002/007

- [24] Morrell P.; Lu Y.; **Aircraft noise social cost and charge mechanisms ± a case study of Amsterdam Airport Schiphol**; Air Transport Group, College of Aeronautics, Cranfield University, Cranfield, Bedfordshire UK, 2000
- [25] Neise W., Enghardt L.; **Technology approach to aero engine noise reduction**; Aerospace Science and Technology 7 (2003) 352–363; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institute of Propulsion Technology, Turbulence Research Division, Berlin, 2003.
- [26] Price M., Raghunathan S., Curran R.: **An integrated systems engineering approach to aircraft design**, Centre of Excellence for Integrated Aircraft Technologies, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen’s University Belfast, Belfast, 2007.
- [27] Porter N. D., Rhodes D. P.; **Aircraft Noise in London: Past, Present and Future**; Environmental Research and Consultancy Department, CAA, London
- [28] Rylander R., Bjorkman M.; **Annoyance by aircraft noise around small airports**; Journal of Sound and Vibration; Department of Environmental Medicine, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 1997.
- [29] Restrict K.; **Error Sensitivity Analysis of the Integrated Noise Model**; EUROCONTROL Experimental Centre; EEC/ENV/2002/006; 2003
- [30] Rushwald I.; Continuing Work on Aircraft Noise Reduction; Noise Engineering – The Boeing Company Summary of the Aircraft Noise Technology Workshop (São Paulo, December 3rd, 2001); AIRPORT NOISE SYMPOSIUM, San Diego, February 26th, 2002
- [31] Smith M. J. T.; White S.; **A Practical Method for Estimating Operational Lateral Noise Levels**; Environmental Research and Consultancy Department; ERCD REPORT 0206; 2003
- [32] Smith M.J.T.; **‘Hushkits’ - Re-certificated Aircraft and the Environment An Opinion**, Air&Space Europe, Vol II., No 2., 2000.
- [33] Slooff J.W., Wolf W.B., Wal H.M.M., Maseland J.E.J.; Aerodynamic and aero-acoustic effects of flap tip fences; presentation held at the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibition, at Reno, NV on 14-17 January 2002.
- [34] Volume D: Airspace; **Aircraft Noise Assessment**; New Parallel Runway Draft Eis/Mdp For Public Comment; BAC Australia

- [35] White S., Ollerhead J. B., Cadoux R. E., Smith M. J. T.; **Quota Count Validation Study: Noise Measurements and Analysis**; ERCD REPORT 0205; Environmental Research and Consultancy Department, April 2003.
- [36] Waitz I., Townsend J., Gershenfeld J. C., Greitzer E., Kerrebrock J.; **Aviation and the environment**; Report to the United States Congress; A National Vision Statement, Framework for Goals and Recommended Actions; December 2004.
- [37] Zaporozhetsa O., Tokareva V., Attenborough K., **Predicting noise from aircraft operated on the ground**; National Aviation University (NAU), 1, Cosmonaut Komarov Prospect, Kyiv 03058, Ukraine, 2003.
- [38] Zorić I.; **Mjerenje i ocjenjivanje buke zračnog prometa**; Magistarski rad; Sveučilište u Zagrebu; Elektrotehnički fakultet; Zagreb; 1984.

Internet

- [39] Luxembourg Airport Authority [<http://www.aeroport.public.lu/en/index.html>]. Luxembourg: 2005.
- [40] Airport Technology [<http://www.airport-technology.com>]. London: 1999.
- [41] Quietly Superior Engineering [<http://www.quietlysuperior.com/History.html>]. Washington: 1984.
- [42] NPC Noise Pollution Clearinghouse [<http://www.nonoise.org/index.htm>]. Montpelier/Vermont
- [43] Katedra za telekomunikaciju, Elektrotehnički fakultet Beograd [<http://telekomunikacije.etf.bg.ac.yu>]. Beograd
- [44] Politics news, [<http://www.politics.co.uk>]. London
- [45] Fluent [<http://www.fluent.com>]. Chicago/Illinois: 2006.
- [46] Zrakoplovstvo.net [<http://www.zrakoplovstvo.net>].
- [47] San Francisco International Airport [<http://www.flysfo.com/>]. San Francisco: 2007.
- [48] German Airports Association [http://www.adv-net.org/eng/gfx/um_laerm.php]. Berlin: 2007.
- [49] Wikipedia [<http://en.wikipedia.org>].
- [50] SMR Engineering & Development [<http://www.smr.ch>]. Bienne/Switzerland

- [51] Fly Light – Recreational Aviation Australia [<http://www.auf.asn.au/index.html>]. Fyshwick/Australia: 2007.
- [52] Akustik Data Engineering Office [http://www.akustik-data.de/index_e.html]. Berlin/Germany: 2005.
- [53] CAD Civil Aviation Department [<http://www.cad.gov.hk/english/home.html>]. Hong Kong: 2004.
- [54] Colorado Springs Airport [<http://www.springsgov.com/AirportIndex.asp>]. Colorado Springs/Colorado: 2003.
- [55] NASA [<http://www.nasa.gov>]. Washington/USA: 2007
- [56] U.S.Environmental Protection Agency [<http://www.epa.gov/>]. Washington/USA: 2007.
- [57] Onera – The French Aerospace Lab [<http://www.onera.fr>]. Chatillon: 2007.
- [58] FAA – Federal Aviation Administration [<http://www.faa.gov>]. Washington/USA: 2007.
- [59] FICAN - The Federal Interagency Committee on Aviation Noise [<http://www.fican.org/>]. Burlington: 2007.
- [60] IATA – International Air Transport Association [<http://www.iata.org/index.htm>]. Montreal/Canada: 1997-2007.
- [61] JAL – Japan Airlines [<http://www.jal.com/en>]. Tokyo/Japan
- [62] O'Hare Community Noise Resource Center [<http://www.ohare.com>]. Chicago/USA: 2004.
- [63] AV8N [<http://www.av8n.com/>]: 1996.-2007.
- [64] AeroSpaceWeb [<http://www.aerospaceweb.org/aircraft>]: 1997.-2008.
- [65] NBAA – National Business Aviation Association [<http://web.nbaa.org>]. Washington: 1995.-2008.

http://www.its.caltech.edu/~guillaum/US_PSU.htm

Prezentacije

- [66] Aircraft Noise, ICAIA
- [67] Boeing & LVNL AAT: Advanced Arrival Techniques
- [68] EU Aircraft Noise Research - Activity & Challenges; Dominique COLLIN; Moscow; 2003
- [69] ICCAIA – Aircraft Noise Presentation
- [70] Schumacher J.; On going research to reduce aircraft noise at source; AIRBUS; THENA 3rd Workshop; Brussels April, 28th-29th 2003
- [71] Sub-sonic Airplanes; Noise Technical Issues; Belur N. Shivashankara; Community Noise Technology Strategy Focal; The Boeing Company; Seattle, Washington; March 1998

Popis slika

Slika 1. Prikaz zračnog područja (Airside) i zemljanog (Landside) Zračne luke Zagreb <i>Izvor: Slika je preuzeta sa programa GoogleEarth</i>	8
Slika 2. Osnovne komponente buke zrakoplova <i>Izvor: S. Hosder; Clean Wing Airframe Noise Modeling for Multidisciplinary Design and Optimization; Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia, July 29, 2004.</i>	9
Slika 3. Izvori buke na zrakoplovu <i>Izvor: Slika preuzeta sa internet stranice www.airliners.net</i>	10
Slika 4. Promjena u redukciji buke zrakoplova u razdoblju od 1950 – 1995. godine <i>Izvor: W. Neise, L. Enghardt; Technology approach to aero engine noise reduction; Aerospace Science and Technology 7 (2003) 352–363; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institute of Propulsion Technology, Turbulence Research Division, Berlin, 2003</i>	14
Slika 5. Usporedba širenja buke kod zrakoplovnog mlaznog motora iz 1960 (lijeva slika) i 1990 godine (desna slika) <i>Izvor: J. G. González; Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; EU Academie; 2004.</i>	15
Slika 6. Prikaz izvora buke koju stvara struktura zrakoplova <i>Izvor: Slika je preuzeta sa internet stranice www.airliners.net</i>	20
Slika 7. Širenje buke generirane prelaskom zraka preko aeroprofila krila <i>Izvor: S. Hosder; Clean Wing Airframe Noise Modeling for Multidisciplinary Design and Optimization; Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia, July 29, 2004.</i>	21
Slika 8. Opstrujavanje zraka oko krila <i>Izvor: An integrated systems engineering approach to aircraft design; M. Price, S. Raghunathan, R. Curran; Centre of Excellence for Integrated Aircraft Technologies, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University Belfast, UK 2007</i>	21
Slika 9. Stvaranje vrtloga koji proizvodi buku <i>Izvor: On going research to reduce aircraft noise at source; Jan Schumacher; AIRBUS; THENA 3rd Workshop; Brussels, April, 28th-29th 2003</i>	21
Slika 10. Prikaz računalne analize opstrujavanja zraka oko nosnoga kotača Boeinga 747	22
Slika 11. Izvori buke kod helikoptera <i>Izvor: M. J.T. Smith, Aircraft Noise, Cambridge University Press, 1998.</i>	24
Slika 12. Širenje buke izazvane rotorom helikoptera <i>Izvor: http://www.its.caltech.edu/~guillaum/US_PSU.htm</i>	24

Slika 13. Zvučni tlak opada obrnuto razmjerno s udaljenošću od izvora, a zvučni intenzitet obrnuto razmjerno s kvadratom udaljenosti.	27
Slika 14. Valna duljina	30
Slika 15. Audiogram normalnog ljudskog uha	33
Slika 16. Slušno područje ljudskog uha	34
Slika 17. Karakteristični nivoi zvuka u rasponu od 0-110 dB na otvorenom i zatvorenom prostoru <i>Izvor: Izrađeno prema slici od Noise Measurements and Analysis Along the VOR/DME Approach Corridor to Mather Airport; HARRIS MILLER MILLER & HANSON INC. ; TECHNICAL MEMORANDUM; Sacramento County Airport System; Sacramento International Airport; 2003</i>	40
Slika 18. Prikaz refleksije vala	42
Slika 19. Refleksija zvučnog vala pri kosoj incidenciji	42
Slika 20. Refleksija od neravne površine: a - kada su neravnine mnogo manje od valne duljine, b - kada su neravnine paralelne sa valnom duljinom	43
Slika 21. Prikaz difuzne refleksije sa raspršivanjem dijela reflektirane energije	43
Slika 22. Prikaz pojave difrakcije	44
Slika 23. Prolaz zvuka kroz veliki i mali otvor	45
Slika 24. Refrakcija uslijed negativnog gradijenta temperature	46
Slika 25. Refrakcija uslijed pozitivnog gradijenta temperature	46
Slika 26. Refrakcija pri nailasku vjetra	46
Slika 27. Udaljenost potrebna za pad od 3 dB u ovisnosti o temperaturi i vlažnosti	48
Slika 28. Prigušenje preko mekog tla u ovisnosti o kutu upada	49
Slika 29. Prigušenje u ovisnosti o strukturi tla	49
Slika 30. Prikaz utjecaja temperature na rasprostiranje zvuka	50
Slika 31. Utjecaj temperature na širenje zvuka	51
Slika 32. Varijacija A-vrednovanog zvuka kroz vrijeme	54
Slika 33. Razina izloženosti jednog događaja	55
Slika 34. Prikaz linije L_{eq} obzirom na kretanje zvuka	55
Slika 35. Točke za mjerenje buke u svrhu certifikacije zrakoplova	61
Slika 36. Satelitski prikaz Zračne luke Zagreb <i>Izvor: GoogleEarth</i>	70
Slika 37. NMT (Noise Monitoring Terminal) stanica sa mikrofonom <i>Izvor: Erik Aflalo, B&K prezentacija Airport Noise Management</i>	71
Slika 38. Prikaz analizatora zvuka, mikrofona i kalibratora <i>Izvor: Erik Aflalo, B&K prezentacija Airport Noise Management</i>	72
Slika 39. Prikaz meteorološke stanice i dobivenih podataka o vjetru <i>Izvor: Erik Aflalo, B&K prezentacija Airport Noise Management</i>	73

Slika 40. Prikaz Garmin GPS-a za mobilne terminale <i>Izvor: Erik Aflalo, B&K prezentacija Airport Noise Management</i>	73
Slika 41. Prikaz zaslona sa podacima koje šalje mobilna stanica <i>Izvor: Erik Aflalo, B&K prezentacija Airport Noise Management</i>	73
Slika 42. Prikaz pozicioniranja postojećih mjernih stanica <i>Izvor: GoogleEarth</i>	75
Slika 43. Prikaz najčešće zauzetih pozicija zrakoplovima te NMT3 <i>Izvor: Izradio Igor Štimac, izvor pozadine: GoogleEarth</i>	75
Slika 44. Prikaz poklapanja buke koju stvaraju dva zrakoplova <i>Izvor: Izradio Igor Štimac, izvor pozadine: GoogleEarth</i>	76
Slika 45. Moguće lokacije novih NMT-a stanica <i>Izvor: Izradio Igor Štimac, izvor pozadine: GoogleEarth</i>	78
Slika 46. Prikaz strukture umrežavanja stanica <i>Izvor: System Drawing – Zagreb International Airport, B&K</i>	79
Slika 47. Indikacija rada sustava	82
Slika 48. Prikaz zaslona sa aktiviranim ENM-om	83
Slika 49. Položaj sela Donja Lomnica u odnosu na Zračnu luku Zagreb <i>Izvor: Google Earth</i>	91
Slika 50. Smjer polijetanja zrakoplova iznad naselja Donja Lomnica	92
Slika 51. Mobilna stanica za mjerenje buke zrakoplova Type 2250	92
Slika 52. Terensko mjerenje buke - preleti zrakoplova iznad Donje Lomnice	93
Slika 53. Lokacija mobilne stanice NMT 4	94
Slika 54. Korelacija između FAIS i ENM programa za praćeni zrakoplov u slijetanju	95
Slika 55. Prikaz grafikona buke praćenog zrakoplova u slijetanju	95
Slika 56. Korelacija razine buke zrakoplova sa položajem i visinom u slijetanju u odnosu na podatke mjerene na stanici	96
Slika 57. Korelacija između FAIS i ENM programa za praćeni zrakoplov u polijetanju	97
Slika 58. Prikaz grafikona buke praćenog zrakoplova u polijetanju	97
Slika 59. Korelacija razine buke zrakoplova sa položajem i visinom u slijetanju u odnosu na podatke mjerene na stanici	98
Slika 60. Raspored lokacije NMT stanica prema propisima za certifikaciju zrakoplova	99
Slika 61. Provjera razine buke sa certifikata i stvarne mjerene vrijednosti	100
Slika 62. Prikaz prilaznih i odletnih vektora na Zračnoj luci Zagreb izrađenih na INM-u	101
Slika 63. INM baza podataka	105
Slika 64. Specifikacija zrakoplova iz baze podataka	105
Slika 65. Prikaz izvještaja sa podacima u INM programu	108
Slika 66. Prikaz karte kontura buke za razdoblje od 01.01. do 30.09.2008. na Zračnoj luci Zagreb	109

Slika 67. Zrakoplovi Tu154 i Airbus 320	110
Slika 68. Primjer korelacija zrakoplova između ENM i arhive FAIS programa	111
Slika 69. Grafički prikaz razine buke zrakoplova Airbus dobiven preko ENM programa	112
Slika 70. Određivanje maksimalne vrijednosti razine buke za pojedini period	112
Slika 71. Prikaz mlaznice za redukciju buke <i>Izvor: I. Rushwald; Continuing Work on Aircraft Noise Reduction; Noise Engineering – The Boeing Company Summary of the Aircraft Noise Technology Workshop (São Paulo, December 3rd, 2001); AIRPORT NOISE SYMPOSIUM, San Diego, February 26th, 2002</i>	119
Slika 72. Podjela razine buke na zrakoplovu <i>Izvor: http://urbana.mie.uc.edu</i>	119
Slika 73. Prikaz hush kit sustava ugrađenih na zrakoplovima tipa Boeing 727 <i>Izvor: www.airliners.net</i>	121
Slika 74. Obično prestrujavanje krila i detekcija buke na krilima	122
Slika 75. Postavljanje dijela za izgladivanje obstrujavanja zraka i smanjenje buke na tome dijelu	122
Slika 76. Oblik i pozicioniranje barijera uz zakrilca <i>Izvor: The contents of this report have been initially prepared for publication as AIAA paper 2001-2170 in the proceedings of the 7th AIAA-CEAS Aeroacoustics Conference, Maastricht, The Netherlands on 28-30 May, 2001.</i>	123
Slika 77. Usporedba buke na krilu bez barijere, sa gornjom i donjom barijerom i samo sa donjom barijerom <i>Izvor: Aerodynamic and aero-acoustic effects of flap tip fences J.W. Slooff, W.B. de Wolf, H.M.M. van der Wal and J.E.J. Maseland This report is based on a presentation held at the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibition, at Reno, NV on 14-17 January 2002.</i>	123
Slika 78. Prikaz spojlera <i>Izvor: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:DSCF0645.JPG</i>	124
Slika 79. Kraća i duža verzija vertikalnog krilca <i>Izvor: D. Shafer, J. Pembridge, M. Reilly; Winglets; www.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/WingletsS04.ppt</i>	125
Slika 80. Prikaz vertikalnog krilca <i>Izvor: D. Shafer, J. Pembridge, M. Reilly; Winglets; www.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/WingletsS04.ppt</i>	125
Slika 81. Računalni prikaz BWB zrakoplova <i>Izvor: http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/FS-2003-11-81-LaRC.html</i>	127
Slika 82. Prikaz barijere na međunarodnoj zračnoj luci Miami <i>Izvor: http://www.gsd.harvard.edu/people/faculty/schwartz/projects.html</i>	128
Slika 83. Prikaz usmjeravanja zvuka sa postavljanjem barijera u obliku nasipa	128
Slika 84. Primjer standardnog polijetanja <i>Izvor: http://www.av8n.com/how/htm/takeoff.html#tab-takeoff-simple-</i>	130

Slika 85. Standardno polijetanje s povećanim nagibom	130
Slika 86. Prikaz tri segmenta definiranih od strane FAA u polijetanju <i>Izvor: J.Golubić: Promet i okoliš, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.</i>	132
Slika 87. Prikaz tri segmenta definiranih od strane ICAO u polijetanju <i>Izvor: J.Golubić: Promet i okoliš, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.</i>	133
Slika 88. Prikaz standardnog postupka slijetanja na Zračnoj luci Zagreb	136
Slika 89. Prilaz u dva stupnja	137
Slika 90. Postupak Lufthanse	138
Slika 91. Selektivno korištenje dvije ili više uzletno sletnih staza	139
Slika 92. Prilaženje po krivolinijskoj putanji	140
Slika 93. Konceptualni dijagram CDA procedure	141
Slika 94. Simulacija odnosa konvencionalnog (step down) i CDA prilaza izrađena na INM sustavu Zračne luke Zagreb	143

Popis tablica

Tablica 1. Osnovni izvori buke zrakoplova <i>Izvor: J. Golubić; Promet i okoliš, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 1999.</i>	10
Tablica 2. Brzina zvuka u raznim tvarima	29
Tablica 3. Valne duljine zvuka u zraku	30
Tablica 4. Zvučni intenziteti i titrajne brzine za odgovarajuće tlakove	32
Tablica 5. Subjektivna glasnoća za neke karakteristične slučajeve	34
Tablica 6. Primjeri emitirane zvučne snage nekih izvora	35
Tablica 7. Podaci o zvučnim snagama i razinama snage nekih realnih izvora zvuka	36
Tablica 8. Izračunate vrijednosti stupnja apsorpcije m u ovisnosti o vlažnosti i temperaturi	48
Tablica 9. Usklađenost korištenja zemlje sa prosječnom razinom zvuka dan-noć <i>Izvor: http://www.nonoise.org/library/ane/ane.htm</i>	56
Tablica 10. Identifikacija pojedinih pozicija u prilazu i odletu	62
Tablica 11. Prikaz penalizacije i podjele doba dana	81
Tablica 12. Prikaz srednjih (L_{eq}) i maksimalnih (L_{max}) vrijednosti buke zrakoplova prilikom preleta mjerne stanice NMT 1 (prag 05) na Zračnoj luci Zagreb	84
Tablica 13. Prikaz srednjih (L_{eq}) i maksimalnih (L_{max}) vrijednosti buke zrakoplova prilikom preleta mjerne stanice NMT 2 (prag 23) na Zračnoj luci Zagreb	84
Tablica 14. Prikaz prosječne veličine buke zrakoplova u slijetanju, u odnosu prema približavanju pragu 05	85
Tablica 15. Prikaz prosječne veličine buke zrakoplova u polijetanju od praga 05 prema 23	86
Tablica 16. Prikaz kretanja veličine buke zrakoplova u slijetanju, u odnosu prema približavanju pragu 23	87
Tablica 17. Prikaz prosječnih veličina buke zrakoplova u polijetanju od praga 23 prema 05	87
Tablica 18. Prikaz broja operacija prema razdobljima dana	87
Tablica 19. Prikaz ukupnog broja događaja mjerenja prema skali od 65-95 dB (u blizini USS i terminala).	88
Tablica 20. Vrijednosti buke preleta (event – trajanje oko 15-30 sekundi) pri polijetanju	91
Tablica 21. Vrijednosti buke (event – trajanje oko 15-30 sekundi) pri slijetanju iznad naselja Donja Lomnica	93
Tablica 22. Prikaz zastupljenosti komercijalnih zrakoplova prema prometu u razdoblju od 01.01. do 30.09.2008. <i>Izvor: FAIS, Zračna luka Zagreb</i>	102

Tablica 23. Specifikacije komercijalnih zrakoplova koji slijeću na Zračnu luku Zagreb <i>Izvor: INM Training Manual, B&K, HMMH, Denmark, 2006.</i>	104
Tablica 24. Usporedni prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama polijetanja i slijetanja (preleti iznad NMT stanica)	113
Tablica 25. Postupak standardnog polijetanja <i>Izvor: http://www.av8n.com/how/htm/takeoff.html#tab-takeoff-simple-numbers#tab-takeoff-simple-numbers</i>	130
Tablica 26: Postupak standardnog polijetanja s povećanim nagibom <i>Izvor: http://www.av8n.com/how/htm/takeoff.html#tab-takeoff-simple-numbers#tab-takeoff-simple-numbers</i>	130

Popis grafikona

Grafikon 1. Usporedba buke mlaznice turbojet motora u ranijim godina i danas <i>Izvor: J. G. González; Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; EU Academie; 2004.</i>	14
Grafikon 2. Usporedba buke zrakoplova u pojedinim fazama leta <i>Izvor: On going research to reduce aircraft noise at source; Jan Schumacher; AIRBUS; THENA 3rd Workshop; Brussels April, 28th-29th 2003</i>	16
Grafikon. 3. Odnos izvora buke kod zrakoplova pri slijetanju <i>Izvor: J. G. González; Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; EU Academie; 2004.</i>	16
Grafikon 4. Odnos izvora buke kod zrakoplova pri polijetanju <i>Izvor: J. G. González; Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; EU Academie; 2004.</i>	16
Grafikon 5. Pregled prosjeka Leq po mjesecima na stanici NMT 1 unutar zone Zračne luke Zagreb	88
Grafikon 6. Pregled prosjeka Leq po mjesecima na stanici NMT 2 unutar zone Zračne luke Zagreb	89
Grafikon 7. Prikaz Leq na dan 01.10.2008. kroz period od 01:00 do 13:45 h	94
Grafikon 8. Standardni odnos brzine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju	106
Grafikon 9. Standardni odnos visine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju	106
Grafikon 10. Standardni odnos potiska i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u polijetanju	106
Grafikon 11. Standardni odnos brzine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju	107
Grafikon 12. Standardni odnos visine i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju (CDA i Step down)	107
Grafikon 13. Standardni odnos potiska i udaljenosti u INM programu za zrakoplov Airbus 320 u slijetanju	107
Grafikon 14. Grafički prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama slijetanja (preleti iznad stanica)	113
Grafikon 15. Grafički prikaz Leq vrijednosti za zrakoplove Airbus 320 i Tupolev 154 na mjernim stanicama pri operacijama polijetanja (preleti iznad stanica)	114
Grafikon 16. Ograničenja na zračnim lukama od 1970. – 2007. godine	117
Grafikon 17. Prikaz veličine buke nastale od pojedinih komponenti zrakoplova pri polijetanju <i>Izvor: Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; Jorge Guerra González; EU Academie; 2004.</i>	131

Grafikon 18. Prikaz razine buke pojedinih komponenti zrakoplova pri slijetanju
Izvor: Environmental Noise; Main Focus: Aircraft Noise; Jorge Guerra González; EU Academie; 2004.

135