


9. MODELIRANJE BUKE



Strengthening Educational Capacities by Building Competences and Cooperation
in the Field of Noise and Vibration Engineering

 www.senvibe.uns.ac.rs

4. Modeliranje buke

4.1 Merenje ili modeliranje

4.2 Algoritmi za prognizu buke na otvorenom prostoru

4.3 RLS standard – buka drumskog saobraćaja

4.4 SCHALL 03 standard – buka železničkog saobraćaja

4.5 ISO 9613-2 – buka industrijskih izvora

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- Divergencija i apsorpcija u vazduhu
- Apsorpcija terena i meteorološki uslovi
- Zeleni gusti zasadi
- Refleksije
- Barijere

4.7 Modeliranje buke u zatvorenim prostorima



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

4.1 Merenje ili modeliranje

- Nivo buke na mestu prijemenika:
 - Merenje primenom mernih procedura;
 - Proračun primenom modela.
- Ocena nivoa buke jedino primenom modela:
 - Prognoza nivoa buke za izradu planske dokumentacije;
 - Poređenje alternativa u primeni mera za smanjenje buke;
 - Izrada karata buke;
 - Ograničen pristup mernim tačkama;
 - Velika rezidualna buka;
 - Meteorološki uslovi.






3



Umesto sprovođenja procedure merenja, nivoi buke na mestu proračunske tačke ili prijemnika se mogu izračunati primenom modela.

Izračunavanje nivoa buke primenom modela je bolji i možda jedini praktični metod za ocenu nivoa buke u sledećim situacijama:

- Kada je potrebno prognozirati nivo buke za izradu planske dokumentacije;
- Kada je potrebno ispitati alternative u razvoju i primeni mera za redukciju buke;
- Kada je potrebno izraditi karte buke za šire područje, npr. područje grada;
- Kada je ograničen pristup nekim mernim tačkama;
- Kada merenje ne može da se sprovode u uslovima visoke rezidualne buke, npr. kada se određuje saobraćajna buka pored fabrike preseraja;
- Kada merenje ne može da se sprovode zbog nepovoljnih meteoroloških uslova.

4.1 Merenje ili modeliranje

Prednosti	Nedostaci
Detaljne informacije o izvorima buke	Potreban veoma veliki broj informacija
Detaljne informacije o nivoima buke za mnogo položaja	Tačnost rezultata zavisi od veštine i iskustva osobe koja stvara model
Proračun prostiranja buke	Tačnost rezultata zavisi od preciznosti polaznih podataka
Ocena hipotetičkih situacija	 
Jednostavnost ažuriranja situacije	

- Verifikacija proračuna merenjem!!!

4


Prednosti primene modela za ocenu nivoa buke:


- Dobijanje detaljnih informacija o izvorima buke koji imaju dominantan uticaj na generisanje ukupnog nivoa buke;
- Dobijanje detaljnih informacija o nivoima buke za veliki broj položaja, uključujući doprinose pojedinih izvora buke ukupnom nivou buke na određenom položaju;
- Proračun prostiranja buke od izvora buke do prijemnika;
- Ocena hipotetičke situacije, tj. provera različitih alternativa za smanjenje nivoa buke;
- Jednostavnost ažuriranja situacije izmenom podataka o npr. izvorima buke i sl.

Nedostaci primene modela za ocenu nivoa buke:

- Potreban veoma veliki broj informacija o topografiji terena, geometriji objekata i karakteristikama izvora;
- Tačnost rezultata u mnogome zavisi od veštine i iskustva osobe koja stvara model;
- Tačnost rezultata u mnogome zavisi od tačnosti unetih ulaznih podataka (topografija terena, zvučna snaga, struktura saobraćaja...).

Kada se nivo buke izračunava primenom nekog od modela neophodna je verifikacija proračuna merenjem nivoa buke u proračunskim tačkama.





Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

4.2 Algoritmi za prognozu buke na otvorenom

- Proračun nivoa buke primenom međunarodnih i nacionalnih standarda.
- Standardi definišu algoritme za izračunavanje.
- Algoritmi se sastoje iz dva dela:
 - Model izvora buke;
 - Model prostiranja buke.
- Rezultat primene algoritma – nivo buke u proračunskim tačkama.
- Proračun primenom softverskih alata.

Model izvora

Model drumskog saobraćaja
Model izvora
Podloga
Struktura

1

Model železničkog saobraćaja
Model izvora ili izračunavanje $L_{p,m}$

Industrijski i drugi izvori
Popis izvora
Nivo zvučne snage
Vreme angažovanja

+

**Model
prostiranja
buke**

2

=

**Nivo buke na
mestu
prijemnika ili u
čvorovima
mreže**

5

Nivoi buke se izračunavaju primenom međunarodnih ili nacionalnih standarda koji definišu algoritme izračunavanja.

Algoritmi se uglavnom baziraju na primeni dvodelnog modela (vidi sliku). U prvom delu se modelira izvor buke, a u drugom prostiranje buke (od referentne tačke do posmatrane tačke). Primena oba modela daje nivo buke u proračunskoj tački.

U prvom delu algoritma se definišu izvor buke i njihove karakteristike, npr. struktura saobraćaja, zvučna snaga industrijskih izvora i sl. U drugom modelu se definiše topografija terena i geometrija objekata koji utiču na prostiranje buke. Na kraju se definiše jedna ili više tačaka za izračunavanje i zatim se vrši proračun, uglavnom primenom softverskih alata.

4.2 Algoritmi za prognozu buke na otvorenom

- Model 1: Proračun nivoa buke u referentnoj tački:

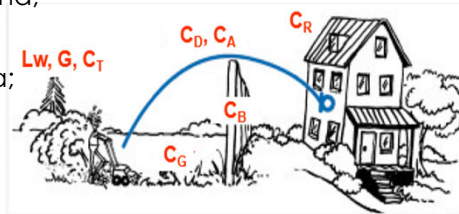
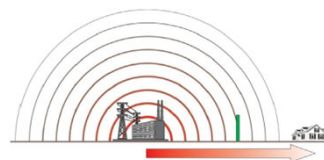
$$L = L_W + G + C_T \quad (4.1)$$

- L_W – nivo zvučne snage u dB;
- G – indeks usmerenosti u dB;
- C_T – korekcija u dB ako izvor nije stalno aktivan.

- Slabljenje pri prostiranju:

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R \quad (4.2)$$



- C_D – korekcija zbog divergencije zvučnih talasa;
- C_A – korekcija zbog apsorpcije vazduha;
- C_B – korekcija zbog barijere;
- C_G – korekcija zbog apsorpcije terena;
- C_R – korekcija zbog refleksija;
- C_Z – korekcija zbog zelenila.



Primenom prvog modela algoritma se izračunava nivo buke u referentnoj tački, na definisanom rastojanju od izvora, korišćenjem jednačine (4.1).

Primenom drugog modela algoritma se izračunava slabljenje pri prostiranju kao zbir slabljenja usled različitih efekata (4.2).

Sve korekcije uglavnom imaju negativne vrednosti, odnosno dovode do smanjenja nivoa buke koji je proračunat u referentnoj tački primenom prvog dela modela, osim korekcije zbog refleksije koja ima pozitivnu vrednost, jer refleksija na mestu prijema dovodi do povećanja nivoa buke. Korekcija zbog divergencije može da bude pozitivna (ako je rastojanje proračunske tačke do izvora manje od referentnog) ili negativna (ako je rastojanje proračunske tačke do izvora veće od referentnog).

4.3 RLS standard – buka drumskog saobraćaja

- Nemački standard za prognozu drumskog saobraćaja.
- Korišćen u mnogim zemljama do usvajanja CNOSSOS standarda.
- Vozila se tretiraju kao tačkasti izvori buke.
- Referentni nivo buke se definiše:
 - Na rastojanju 25 m od ose saobraćajnice;
 - Na visini 4 m u odnosu na teren;
 - Za akustički centar izvora buke na 0.5 m iznad kolovoza;
 - Za brzinu putničkih vozila u opsegu 30 ÷ 130 km/h;
 - Za brzinu teretnih vozila u opsegu 30 ÷ 80 km/h.
- Potrebni podaci:
 - Broj putničkih i teretnih vozila u toku jednog sata;
 - Brzina putničkih i teretnih vozila koja mora biti konstantna;
 - Nagib puta, ako je veći od 5%
 - Karakteristike površine puta.
- Teretno vozilo - vozilo veće težine od 2.8 t.

7

Izvor – RLS standard.

Nemački standard RLS 90 (iz 1990.) je standard za prognozu drumskog saobraćaja, koji se zbog svojih karakteristika koristio u mnogim zemljama koje nemaju svoje standarde, do usvajanja zajedničkog CNOSSOS standarda.

RLS 90 tretira vozila kao tačkaste pokretne izvore.

Referentni nivo buke se definiše:

- Na rastojanju 25 m od ose saobraćajnice;
- Na visini 4 m u odnosu na teren;
- Za akustički centar izvora buke na rastojanju 0.5 m iznad površine kolovoza;
- Za brzinu putničkih vozila u opsegu 30 ÷ 130 km/h;
- Za brzinu teretnih vozila u opsegu 30 ÷ 80 km/h.

Za izračunavanje referentnog nivoa buke, koji predstavlja nivo emisije izvora buke na posmatranoj poziciji, potrebni su sledeći podaci:

- Broj putničkih automobila i teretnih vozila (standardom se vozilo tretira kao teretno vozilo ako njegova težina premašuje 2.8 t) u toku jednog sata,
- Brzina putničkih automobila i teretnih vozila koja mora biti konstantna,
- Nagib puta, ako je veći od 5 %, i
- Karakteristike površine puta.

4.3 RLS standard – buka drumskog saobraćaja

- Ukupni referentni nivo buke:

$$\Rightarrow L_0 = L_{0,E} + C_{Ng} + C_{pp} \quad (4.3)$$

- $L_{0,E}$ – ukupni osnovni nivo buke;
- C_{Ng} – korekcija zbog nagiba puta;
- C_{pp} – korekcija zbog površine puta.

- Ukupni osnovni nivo buke:

$$\Rightarrow L_{0,E} = 10 \log \left(10^{0.1L_{0,A}} + 10^{0.1L_{0,K}} \right) \quad (4.4)$$

- $L_{0,A}$ – osnovni nivo buke putničkih automobila;

$$\Rightarrow L_{0,A} = 27.7 + 10 \log N_A + 10 \log \left[1 + (0.02 \cdot v_A)^3 \right] \quad (4.5)$$

- $L_{0,K}$ – osnovni nivo buke teretnih automobila.

$$\Rightarrow L_{0,K} = 23.1 + 10 \log N_K + 12.5 \log v_K \quad (4.6)$$

- N – broj vozila;
- v – brzina vozila.



Ukupni referentni nivo buke koji stvara drumski saobraćaj na rastojanju 25 m od linije izvora i na visini 4 m u odnosu na podlogu proračunske tačke, dobija se primenom jednačine (4.3).

Ukupni osnovni nivo buke se dobija energijskim sabiranjem osnovnih nivoa buke putničkih i teretnih automobila primenom jednačine (4.4), koji se određuju na osnovu odgovarajućeg broja vozila i odgovarajuće brzine vozila (4.5 i 4.6).

4.3 RLS standard – buka drumskog saobraćaja

- Korekcija zbog nagiba puta:

$$\longrightarrow C_{Np} = 0.6 \cdot |g| - 3 \quad (4.7)$$

- g – nagib puta u %;
- C_{pp} – korekcija zbog površine puta.
- Korekcija zbog podloge puta:
 - Presvučena betonska podloga: -2 dB (>60 km/h);
 - Porozni asfalt (15%): -5 dB (>60 km/h).



C_{pp} [dB]	Starije podloge Površina puta	maksimalno dozvoljene brzine		
		30km/h	40km/h	≥50km/h
	1	2	3	4
1	Asfalt	0	0	0
2	Beton	1.0	1.5	2.0
3	Kaldrma sa glatkom teksturom	2.0	2.5	3.0
4	Kaldrma sa grubom teksturom	3.0	4.5	6.0

9


Izvor – RLS standard.


Ukoliko je nagib puta veći od 5 %, potrebno je korigovati osnovni nivo buke zbog nagiba puta, jer se nivo buke pri tim uslovima povećava na isti način u slučaju uzbrdice i nizbrdice. Korekcija zbog nagiba puta se izračunava jednačinom (4.7).

Karakteristike podloge kojom je presvučen put mogu dodatno uticati na ukupni nivo buke koji generiše drumski saobraćaj zbog interakcije pneumatika i podloge, kao jednog od glavnih izvora buke pri većim brzinama.

Novije konstrukcije smanjuju nivo buke za brzine iznad 60 km/h, tako da je korekcija za presvučenu betonsku podlogu -2 dB, a za porozni asfalt sa više od 15 % pora -5 dB.

Starije konstrukcije podloga uglavnom povećavaju nivo buke. Korekcije se određuju iz prikazane tabele.





Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

4.3 RLS standard – buka drumskog saobraćaja

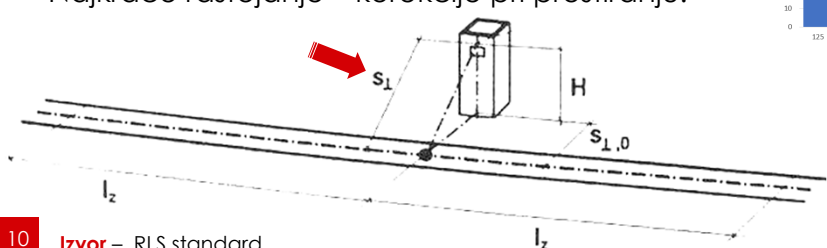
- Ukupni referentni nivo buke je A-ponderisana vrednost nivoa buke.
- Korekcije za dobijanje frekvencijskog spektra:

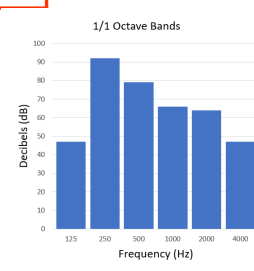
f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
ΔL[dB]	-14	-10	-7	-4	-7	-12

- Merodavni nivo buke na mestu prijema:

➔

$L_m = L_0 + C_D + C_G + C_B + C_Z + C_R$
(4.8)
- Najkraće rastojanje – korekcije pri prostiranju:





10

Izvor – RLS standard.

Ukupni referentni nivo buke koji stvara drumski saobraćaj na rastojanju 25 m od linije izvora i na visini 4 m u odnosu na podlogu proračunske tačke određen primenom RLS standarda je A-ponderisana vrednost nivoa buke.

Frekvencijski oktavni spektar buke u opsegu 125 Hz ÷ 4 kHz se može dobiti korigovanjem ukupnog referentnog nivoa buke vrednostima datim u tabeli.

Merodavni nivo buke na mestu prijema se određuje korekcijom ukupnog referentnog nivoa zbog uticaja različitih faktora pri prostiranju buke (4.8).

Sve korekcije koje opisuju prostiranje zvučnih talasa od izvora buke do proračunske (prijemne) tačke izračunavaju se na osnovu najkraćeg rastojanja prijemne tačke do pozicije akustičkog centra izvora buke koje je ilustrovano na slici.

SenMBe


Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Nemački standard za prognozu železničkog saobraćaja.
- Korišćen u mnogim zemljama do usvajanja CNOSSOS standarda.
- Referentni nivo buke se definiše:
 - Na rastojanju 25 m od ose saobraćajnice;
 - Na visini 3.5 m iznad gornje ivice šine;
 - Za akustički centar izvora buke na 0.5 m iznad gornje ivice šine.
- Potrebni podaci:
 - Tip voza;
 - Procenat vozila sa disk-kočnica, p ;
 - Dužina voza, L ;
 - Brzina voza, v ;
 - Tip pruge.

11

Izvor – SCHALL standard.




Nemački standard SCHALL 03 (iz 1990.) je standard za prognozu železničkog saobraćaja, koji se zbog svojih karakteristika koristio u mnogim zemljama koje nemaju svoje standarde, do usvajanja zajedničkog CNOSSOS standarda.


Referentni nivo buke se definiše:

- Na rastojanju 25 m od ose saobraćajnice;
- Na visini 3.5 m iznad gornje ivice šine;
- Za akustički centar izvora buke je na rastojanju 0.6 m iznad gornje ivice šine.

Za izračunavanje referentnog nivoa buke, koji predstavlja nivo emisije izvora buke na posmatranoj poziciji, potrebni su sledeći podaci:


- Tip voza;
- Procenat disk-kočnica;
- Dužina voza;
- Brzina voza;
- Tip pruge.




Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Klasa vozova:
 - Isti tip voza;
 - Ista brzina;
 - Isti procenat vozila sa disk pločicama.
- Referentni nivo buke za određenu klasu:



$$L_{0,E,i} = 51 + C_{TV} + C_p + C_N + C_L + C_v \quad (4.9)$$

- 51 dB – osnovni nivo buke;
- C_{TV} – korekcija za uticaj tipa voza;
- C_p – korekcija za uticaj procenta vozila u kompoziciji sa disk kočnicama;
- C_N – korekcija za uticaj broja vozova;
- C_L – korekcija za uticaj dužine voza;
- C_v – korekcija za uticaj brzine voza.

- Ukupni referentni nivo buke za sve klase:

$$L_{0,E} = \sum_{i=1}^k 10^{0.1 \cdot L_{0,E,i}} \quad (4.10)$$

12

Izvor – SCHALL standard.

k – broj klasa vozova.

Referentni nivo buke se određuje za određenu klasu vozova istog tipa, brzine i procenta vozila sa disk kočnicama.

Referentni nivo buke za određenu klasu vozova određuje se korekcijom osnovnog nivoa od 51 dB (jednačina 4.9) za uticaj:

- Tipa voza;
- Procenta vozila u kompoziciji sa disk kočnicama;
- Broja vozova
- Dužine voza;
- Brzine voza.

Ukupni referentni nivoa buke za sve klase određuje se energijskim sabiranjem referentnih nivoa buke za sve pojedinačne klase (4.10).

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Korekcija osnovnog nivoa buke za tip voza:

	Tip voza	C _{TV}
1	Vozovi sa dozvoljenom brzinom većom od 100km/h sa apsorberima na točkovima	-4
2	Vozovi sa disk kočnicama na točkovima (modeli 403,420,472)	-2
3	Vozovi sa točkovima sa disk kočnicama (Bx vagoni i lokomotive)	-1
4	Podzemna železnica	2
5	Gradski motorni vozovi	3
6	Ostali tipovi	0

- Korekcija osnovnog nivoa buke za procenat vozila sa disk-kočnicama:

➡ $C_p = 10 \log(5 - 0.04 \cdot p)$ (4.11)





13 Izvor – SCHALL standard.

Osnovni nivo buke vozova se koriguje zbog uticaja tipa voza na ukupni nivo buke vrednostima iz tabele.

Osnovni nivo buke je izračunat za stoprocentno učešće vozila (vagona i lokomotive) sa disk-kočnicama na točkovima.

Za drugačiji procenat vozila sa disk-kočnicama, osnovni nivo se koriguje korekcijom koja je pozitivna bez obzira na vrednost procenta (4.11).

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Osnovni nivo buke izračunat za:
 - Prolazak jednog voza u toku jednog sata;
 - Dužina voza – 100 m;
 - Brzina voza – 100 km/h.
- Korekcija zbog broja vozova:

$C_N = 10 \log(N)$ (4.12)
- Korekcija zbog dužine voza:

$C_L = 10 \log(0.01 \cdot L)$ (4.13)
- Korekcija zbog brzine voza:

$C_v = 20 \log(0.01 \cdot v)$ (4.14)
- Ukupni referentni nivo buke je A-ponderisana vrednost nivoa buke.
- Korekcije za dobijanje frekvencijskog spektra (vidi RLS standard).

14

Izvor – SCHALL standard.

Osnovni nivo buke je izračunat za prolazak jednog voza u toku jednog sata, dužine 100 m, brzinom od 100 km/h.

Ukoliko su podaci o strukturi saobraćaja drugačiji, osnovni nivo se koriguje jednačinama (4.12) ÷ (4.13).



Korekcija zbog broja vozova je uvek pozitivna.

Korekcija zbog dužine voza je pozitivna za dužine veće od 100 m, a negativna za dužine manje od 100 m.

Korekcija zbog brzine voza je pozitivna za brzine veće od 100 km/h, a negativna za brzine manje od 100 km/h.

Ukupni referentni nivo buke koji stvara železnički saobraćaj na rastojanju 25 m od linije izvora i na visini 3.5 m u odnosu na gornju ivicu šine određen primenom SCHALL 03 standarda je A-ponderisana vrednost nivoa buke.

Frekvencijski oktavni spektar buke u opsegu 125 Hz ÷ 4 kHz se može dobiti korigovanjem ukupnog referentnog nivoa buke vrednostima koje su iste kao i kod RLS standarda.

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Merodavni nivo buke:

$$\Rightarrow L_m = 10 \log \left[\sum_{i=1}^k 10^{0.1 \cdot L_{0,E,i}} \right] + C_{TP} + C_D + C_G + C_B + C_Z + C_R - S \quad (4.15)$$

- Korekcija za manju smetnju buke železničkog saobraćaja: - 5 dB.
- Korekcija zbog vrste pragova i podloge:

Tip pruge		C_{TP}
1	Tramvajske šine – šine sa travnatom okolinom	-2
2	Podloga od šodera – betonski pragovi specijalne konstrukcije	0
3	Podloga od šodera – drveni pragovi	0
4	Podloga od šodera – betonski pragovi	2
5	Tvrd kolosek i šine položene na uličnom kolovozu	5

15

Izvor – SCHALL standard.

Merodavni nivo buke na mestu prijema se određuje korekcijom ukupnog referentnog nivoa zbog uticaja tipa pruge i različitih faktora pri prostiranju buke (4.15).

Pored toga standard podrazumeva da se od izračunatog nivoa buke oduzima 5 dB. Razlog leži u pretpostavci da isti nivo smetnje, kao i drumski saobraćaj, ima voz ako je njegov nivo buke veći za 5 dB.

Vrsta pragova kod železničkih pruga i vrsta podloge na koju su pragovi postavljeni, mogu uticati na promenu referentnog nivoa buke i iz tih razloga se on koriguje vrednostima iz prikazane tabele.

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

4.4 SCHALL standard – buka železničkog saobraćaja

- Najkraće rastojanje – korekcije pri prostiranju:

16

Izvor – SCHALL standard.

Sve korekcije koje opisuju prostiranje zvučnih talasa od izvora buke do proračunske (prijemne) tačke izračunavaju se na osnovu najkraćeg rastojanja prijemne tačke do pozicije akustičkog centra izvora buke koje je ilustrovano na slici.

SenMBE

Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

4.5 ISO 9631-2 – buka industrijskih izvora

- Međunarodni standard za prognozu buke industrijskih izvora.
- Korišćen u mnogim zemljama do usvajanja CNOSSOS standarda.
- Opisuje i metod za izračunavanje slabljenja pri prostiranju buke.
- Rezultat:
 - A-ponderisani ekvivalentni nivo buke;
 - Oktavni/tercni spektar ekvivalentnog nivoa buke.
- Potrebni podaci:
 - Zvučna snaga (oktavni/tercni spektar);
 - Usmerenost izvora;
 - Položaj izvora u odnosu na reflektujuće površine;
 - Rastojanje prijemne tačke do izvora buke;
 - Karakteristike i geometrija terena.
- Izvor buke se posmatra kao tačkasti izvor buke.


➡

$$L_f = L_W + G + C \quad (4.16)$$

- G – indeks usmerenosti;
- C – korekcije zbog prostiranja buke.

17

Izvor – ISO 9613-2.





Međunarodni standard ISO 9613-2 (iz 1996. godine) je opšti standard za prognozu buke tačkastih izvora buke (npr. industrijskih izvora buke), kao i prognozu prostiranja buke na otvorenom prostoru za različite tipove izvora.

Metod kao rezultat daje A-ponderisani ekvivalentni nivo buke, ali omogućava izračunavanje i oktavnih/tercnih nivoa buke u opsegu 63 Hz ÷ 8 kHz pomoću datog algoritma, ukoliko su na raspolaganju odgovarajući podaci (oktavni/tercni spektar zvučne snage).

Potrebni podaci za proračun ekvivalentnog nivoa buke na nekom rastojanju od izvora buke su:

- Zvučna snaga (oktavni/tercni spektar);
- Usmerenost izvora;
- Položaj izvora u odnosu na reflektujuće površine;
- Rastojanje prijemne tačke do izvora buke;
- Karakteristike i geometrija terena.

Ekvivalentni nivo buke u funkciji frekvencije se računa na osnovu zvučne snage izvora buke, indeksa usmerenosti izvora i korekcija zbog prostiranja buke (4.16).

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- Razni efekti dovode do promene nivoa buke pri prostiranju.
- Uglavnom se nivo buke smanjuje, osim kod efekta refleksije gde se nivo buke pojačava.
- Ukupno slabljenje dato jednačinom (4.2).
- Korekcija zbog divergencije zvučnih talasa i apsorpcije u vazduhu**
 - Divergencija: talasni front se širi – ista energija se raspodeljuje, dolazi do slabljenja;
 - Apsorpcija usled disipacije u vazduhu.
- Proračun:
 - Drumski/železnički saobraćaj:

➡

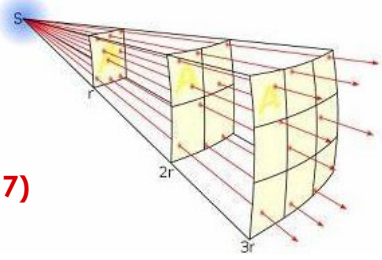
$$C_D = 15.8 - 10 \cdot \log s_{\perp} - 0.0142 \cdot s_{\perp}^{0.9}$$

(4.17)
 - Industrijski izvori buke:

➡

$$C_D = -11 - 20 \log d - \frac{d}{200}$$

(4.18)



s_{\perp}, d – Najkraće rastojanje prijemne do emisije tačke.

18


Izvor – ISO 9613-2.


Na promenu nivoa buke (uglavnom slabljenje) pri prostiranju zvučnih talasa od izvora buke do proračunske tačke utiču različiti efekti. Jedino efekat refleksije zvučnih talasa od reflektujućih površina na mestu prijema zvuka utiče na pojačanje nivoa buke.

Ukupno slabljenje nivoa buke pri prostiranju buke od emisije do prijemne tačke određuje se jednačinom (4.2).

Pri prostiranju zvučnih talasa dolazi do širenja (divergencije) talasnog fronta na kome se uniformno raspodeljuje ista količina energije zvuka i usled toga dolazi do slabljenja nivoa buke. Takođe, različiti efekti (npr. disipacija) dovode do slabljenja, odnosno apsorpcije energije zvuka.

U zavisnosti od tipa izvora buke, korekcija za uticaj divergencije zvučnih talasa i apsorpcije zvučnih talasa u vazduhu određuje se primenom jednačine (4.17) za drumski i železnički saobraćaj, odnosno jednačine (4.18) za industrijske (tačkaste izvore buke) na osnovu najkraćeg rastojanja od prijemne do emisije tačke (vidi slike na slajdu br. 10 i 14 za drumski i železnički saobraćaj). Jednačina (4.18) je data za slučaj tačkastog izvora buke u slobodnom prostoru, bez prisustva refleksionih površina (vidi tematsku jedinicu 1).





Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

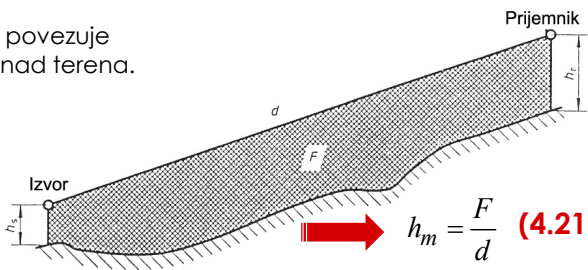
4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- Korekcija zbog apsorpcije terena i meteoroloških uslova**
- Proračun:
 - Drumski/železnički saobraćaj:

$$\Rightarrow C_G = -4.8 \cdot 10^{-\frac{1}{2.3} \left[\frac{h_m}{s_{\perp}} \left(8.5 + \frac{100}{s_{\perp}} \right) \right]^{1.3}} \quad (4.19)$$
 - Industrijski izvori buke:

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R$$

$$\Rightarrow C_G = \frac{h_m}{d} \left(34 + \frac{600}{d} \right) - 4.8 \quad (4.20)$$
- h_m - srednja visina linije koja povezuje prijemnu i emisionu tačku iznad terena.



$$\Rightarrow h_m = \frac{F}{d} \quad (4.21)$$


19


Izvor – ISO 9613-2.

Apsorpcione karakteristike terena iznad kojeg se prostiru zvučni talasi, kao i meteorološki uslovi koji važe u toku prostiranja, mogu dovesti do slabljenja nivoa buke koje se izračunava u zavisnosti od:

- Najkraćeg rastojanja prijemne tačke do emisione tačke;
- Srednje visine linije koja povezuje prijemnu i emisionu tačku iznad konfiguracije terena, koja se određuje kao odnos površine (F) iznad terena do linije optičke vidljivosti izvora i prijemnika i najkraćeg rastojanja izvora buke i prijemnika (4.21).

Za drumski i železnički saobraćaj korekcija se određuje primenom jednačine (4.19), a za industrijske izvore buke primenom jednačine (4.20).





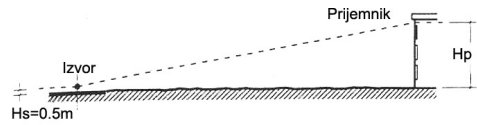
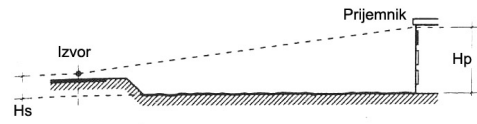
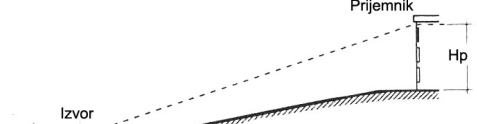
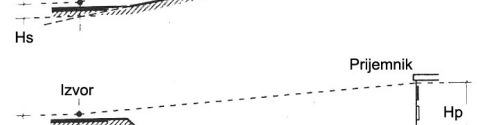
Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- **Određivanje srednje visine**
 - Slučaj 1: Ravan teren između prijemnika i izvora buke:

➡ $h_m = 0.5(H_s + H_p)$ **(4.21)**
 - Slučaj 2: Teren između prijemnika i izvora buke nije ravan:

➡ $h_m = 0.25(H_s + 2H_u + H_p)$ **(4.22)**

20

Izvor – ISO 9613-2.

Za slučaj kada je teren između izvora buke i prijemnika ravan (slika desno), srednja visina se određuje primenom jednačine (4.21), gde je H_s - visina izvora buke u odnosu na teren, a H_p - visina prijemne tačke iznad terena.

Ukoliko saobraćajnica nije u ravni sa okolnim terenom, određuje se visina u odnosu na liniju terena između izvora i prijemnika (slika desno, 2., 3., i 4. slučaj).

Za slučaj kada teren između izvora buke i prijemnika nije ravan, već postoje udubljenja i ispupčenja (slika levo), srednja visina se određuje primenom jednačine (4.22), gde je H_u - rastojanje najniže (odnosno najviše) tačke do linije optičke vidljivosti izvora buke i prijemnika.

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

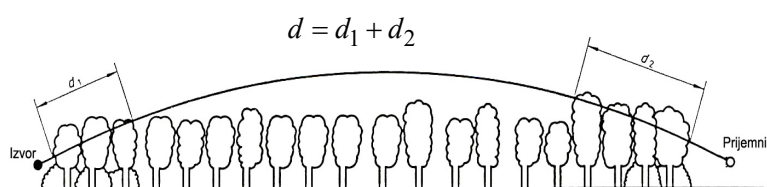
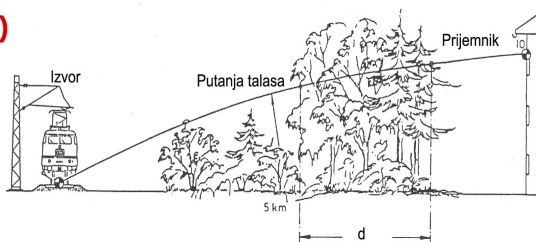
• Korekcija zbog zelenih gustih zasada

- Apsorpcija zvučnih talasa pri prolasku kroz zasade.
- Maksimalno smanjenje buke 5 dB.
- Proračun:

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R$$

$$\Rightarrow C_Z = -0.06d \quad (4.23)$$

- d – dužina zasada (vidi sliku).
- Talas se prostire po zakrivljenoj putanji!!!
- Poluprečnik putanje 5 km.



21

Izvor – ISO 9613-2.

Zeleni zasadi u određenoj meri mogu smanjiti nivo buke apsorpcijom zvučnih talasa pri prolasku zvučnih talasa kroz njih. Maksimalna redukcija koja se može postići zelenim zasadima iznosi 5 dB i može se odrediti primenom jednačine (4.23) i zavisi od dužine zelenog zasada kroz koji se prostire zvučni talas.

Pri izračunavanju dužine d treba voditi računa da se zvučni talas ne prostire pravolinijski, već po zakrivljenoj putanji, što je posledica refrakcije (savijanja zvučnih talasa) usled uticaja meteoroloških uslova sredine (slika desno). Pri proračunu dužine d treba uzeti da je poluprečnik zakrivljene putanje zvučnih talasa 5 km.

Na donjoj slici je prikazan primer izračunavanja dužine zasada d koji ima uticaj na prostiranje zvučnih talasa i koji se izračunava kao zbir dva rastojanja zasada kroz koje se prostiru zvučni talasi zbog zakrivljenosti putanje zvučnih talasa.

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

• Korekcija zbog refleksije

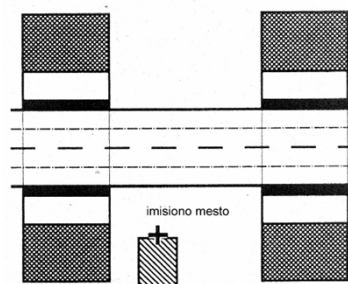
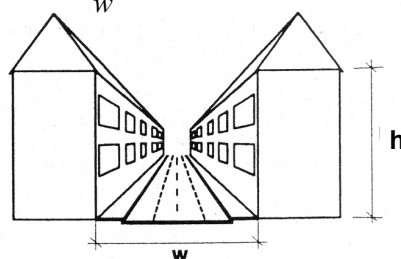
- Saobraćajnica između dva niza paralelnih objekata.
- Nivo buke se povećava zbog refleksije.
- Proračun – potpuno reflektujuće površine (max. 3.2 dB):

$$\Rightarrow C_R = 4 \frac{h}{w} \quad (4.24)$$

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R$$

- Proračun – reflektujuće površine obložene apsorpcionim materijalom (max. 1.6 dB):

$$\Rightarrow C_R = 2 \frac{h}{w} \quad (4.25)$$




22

Izvor – ISO 9613-2.

Ako saobraćajnica prolazi između dva niza paralelnih objekata, potpornih zidova ili barijera, nivo buke na mestu prijemne tačke se povećava zbog uticaja višestruke refleksije zvučnih talasa. Refleksija zvučnih talasa jedino povećava nivo buke na mestu prijemnika od svih razmatranih efekata koji utiču na prostiranje zvučnih talasa.

Za slučaj potpuno reflektujućih površina, maksimalno povećanje nivoa buke je 3.2 dB i može se izračunati primenom jednačine (4.24), a za slučaj reflektujućih površina koje su obložene apsorpcionim materijalom, maksimalno povećanje nivoa buke je 1.6 dB i izračuna se primenom jednačine (4.25).

Veličine koje određuju uticaj refleksije zvučnih talasa na nivo buke u prijemnoj tački prikazane su na slici.




Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

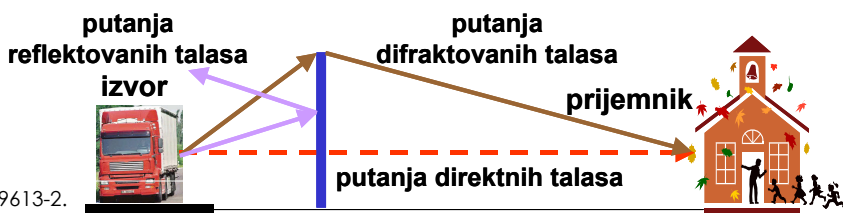
4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- **Korekcija zbog barijere**

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R$$

0

- Primarna funkcija barijere je smanjenje nivoa buke.
- Bez barijere – zvučni talasi se prostiru direktnim putem.
- Sa barijerom:
 - Deo energije se reflektuje;
 - Deo energije se apsorbuje;
 - Deo energije se prostire oslabljen direktnim putem;
 - Deo energije se usled difrakcije prostire do prijemnika.
- Slabljenje barijere određeno razlikom dužine puta difrakcionog i reflektovanog talasa.
- Zanimaruje se efekat apsorpcije terena i meteoroloških parametara.





Primarna funkcija barijere je da smanji nivo buke koji se direktnim putem prenosi od mesta izvora do mesta prijema.

Bez barijere se zvučni talasi prostiru direktnom putanjom od izvora buke do prijemnika. Postavljanjem barijere se deo energije reflektuje od pregrade, deo energije se apsorbuje pregradom, a deo energije, oslabljen zbog izolacionih karakteristika pregrade, nastavlja da se prostire do prijemnika. Deo energije se zbog efekta difrakcije savija oko gornje i bočnih ivica barijere i nastavlja da se prostire do prijemnika.

Slabljenje nivoa buke barijerom određeno je razlikom dužine puta koji pređe difrakcioni zvučni talas i dužine puta koji prelazi direktan zvučni talas.

Kada se pri proračunu nivoa buke na mestu prijemnika uzima u obzir efekat smanjenja nivoa buke zbog prisustva barijere, tada se zanemaruje slabljenje zbog apsorpcije terena i meteoroloških uslova.

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- Korekcija zbog barijere**

$$C = C_D + C_A + \boxed{C_B} + \overset{0}{C_G} + C_Z + C_R$$
- Slabljenje A-ponderisanog nivoa buke:

$$\Rightarrow C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0.25 \cdot s_{\perp}}{1 + 0.2 \cdot z_{\perp}} \right) \cdot z_{\perp} K_{w\perp}^2 \right] \quad (4.26)$$
- Slabljenje barijere u funkciji frekvencije:

$$\Rightarrow C_B = \begin{cases} - \left[20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \right] & N \geq -0.2 \\ 0 & N < -0.2 \end{cases} \quad (4.27)$$
- Korekcija zbog meteoroloških uslova:

$$\Rightarrow K_{w\perp} = \exp \left(- \frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{A_{\perp} \cdot B_{\perp} \cdot s_{\perp}}{2 \cdot z_{\perp}}} \right) \quad (4.28)$$
- Fresnelov broj:

$$\Rightarrow N = \pm \frac{2}{\lambda} (z_{\perp} - s_{\perp}) \quad (4.29)$$

24

Izvor – ISO 9613-2.

• λ - talasna dužina zvučnih talasa.

Jednačina (4.26) definiše slabljenje A-ponderisanog nivoa buke usled primene barijere, a primenjuje se u opisanim standardima za prognozu buke drumskog saobraćaja (RSL 90), buke železničkog saobraćaja (SCHALL 03) i industrijske buke (ISO 9613).

Korekcija za meteorološke uslove je određena jednačinom (4.28).

Ukoliko je potrebno odrediti frekvencijsku karakteristiku slabljenja nivoa buke primenom barijera za tačkaste i linijske koherentne izvore buke, slabljenje se može odrediti jednačinom (4.27), gde je N – Fresnelov broj koji se određuje jednačinom (4.29). U jednačini (4.29) λ je talasna dužina zvučnih talasa.

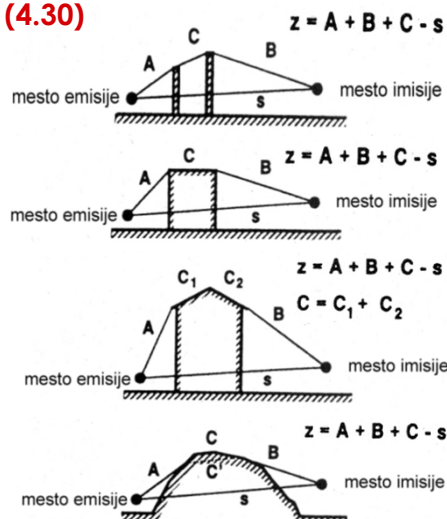
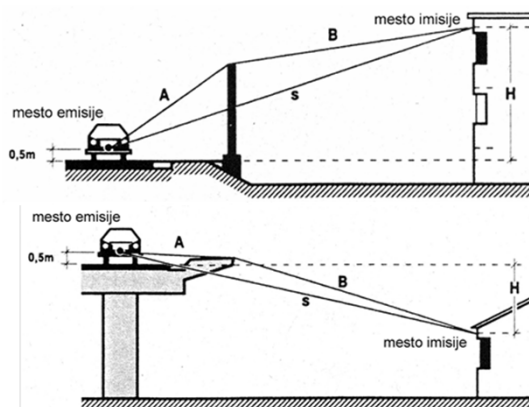
4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

• Korekcija zbog barijere

- Razlika dužine putanja difrakcionih i direktnih talasa:

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R$$

$$\Rightarrow z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} + C_{\perp} - s_{\perp} \quad (4.30)$$

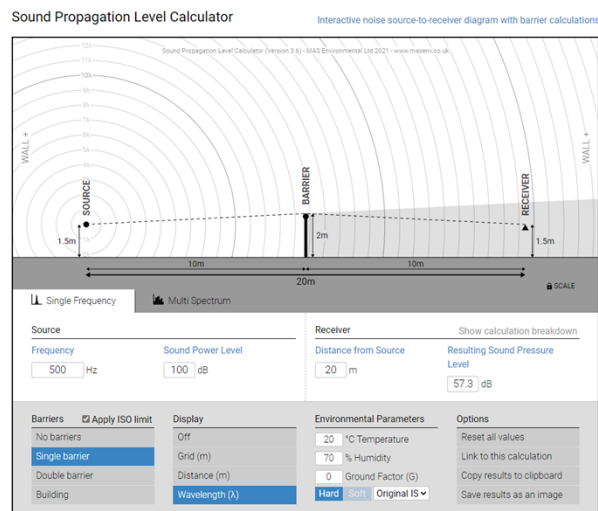


25 Izvor – ISO 9613-2.

Razlika dužine putanja difrakcionih i direktnih zvučnih talasa se određuje primenom jednačine (4.30). Na slikama sa slajda su prikazani primeri određivanja rastojanja izvora do gornje ivice barijere, A , rastojanja prijemnika do gornje ivice barijere, B , i sume rastojanja prelomnih ivica kod barijera sa više prelomnih ivica, C .

4.6 Slabljenje buke pri prostiranju

- **Korekcija zbog barijere**
 - Kalkulator.



26

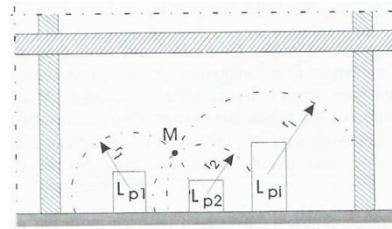
Izvor: <https://noisetools.net/barriercalculator>

Za proračun barijere može se koristiti web kalkulator koji je dostupan na linku:
<https://noisetools.net/barriercalculator>.

4.7 Modeliranje buke u zatvorenim prostorima

- Industrijski pogon sa N izvora buke:
 - Poznata zvučna snaga;
 - Poznat indeks usmerenosti;
 - Poznate akustičke karakteristike pogona.
- Nivo buke od pojedinačnog izvora buke

$$L_p \approx L_w + 10 \log \left(\frac{\gamma}{4\pi r^2} + \frac{4}{B} \right) [\text{dB}]$$



- Ukupni nivo buke se dobija energijskim sabiranjem pojedinačnih doprinosa svih izvora buke.
- Integralna jednačina za proračun nivoa buke u tački M:

$$\Rightarrow L_M(f) = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{4\pi r_{M,i}^2} 10^{0.1 L_{w,i}(f)} + \frac{4}{B(f)} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{w,i}(f)} \right] \quad (4.31)$$

- $r_{M,i}$ – rastojanje tačke M do i -tog izvora buke.

Ako u industrijskom pogonu ima N izvora buke čiji je spektar zvučne snage poznat, kao i indeks usmerenosti, tada se nivo buke koji stvaraju pojedinačni izvori buke može odrediti primenom **jednačine (2.17)**, ukoliko su poznate akustičke karakteristike pogona.

Ukupni nivo buke se određuje energijskim sabiranjem pojedinačnih doprinosa svih izvora buke. Ukupni nivo buke se može odrediti i primenom jednačine (4.31).

Za oznake i značenja veličina u (4.31) **videti tematsku jedinicu 2.**

Pitanja za proveru znanja (1)

1. Koje su prednosti, odnosno nedostaci modeliranja buke?
2. Struktura algoritama za prognozu buke na otvorenom prostoru?
3. Osnovne karakteristike RLS standarda i algoritam za proračun drumskog saobraćaja?
4. Osnovne karakteristike SCHALL 03 standarda i algoritam za proračun železničkog saobraćaja?
5. Osnovne karakteristike ISO 9613-2 standarda i algoritam za proračun buke industrijskih izvora?
6. Efekti koji utiču na slabljenje nivoa buke pri prostriraju na otvorenom prostoru?
7. Proračun buke u industrijskim pogonima?

Na kraju nastavne jedinice studenti treba da (1):

- ✓ Razumevaju potrebu za modeliranjem buke.
- ✓ Poznaju prednosti i nedostatke modeliranja buke.
- ✓ Znaju osnovne karakteristike RLS standarda.
- ✓ Umeju da proračunaju buku drumskog saobraćaja primenom RLS standarda.
- ✓ Znaju osnovne karakteristike SCHALL 03 standarda.
- ✓ Umeju da proračunaju buku železničkog saobraćaja primenom SCHALL 03 standarda.
- ✓ Znaju osnovne karakteristike ISO 9613-2 standarda.
- ✓ Umeju da proračunaju buku industrijskih izvora buke primenom ISO 9613-2 standarda.
- ✓ Umeju da proračunaju korekciju zbog divergencije i apsorpcije u vazduhu.
- ✓ Umeju da proračunaju korekciju zbog apsorpcije terena i meteoroloških uslova.

SENVIBE PROJECT Task 5.2
Development of e-learning and b-learning materials



MODELIRANJE BUKE


Pripremljeno:

Prof. dr Momir Prašćević, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu u Nišu
17. 02. 2022.

"This project has been funded with support from the European Commission. This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein"



Strengthening Educational Capacities by Building Competences and Cooperation
in the Field of Noise and Vibration Engineering

 www.senvibe.uns.ac.rs