

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Jelena Z. Tomić

**PRIMENA SOFT COMPUTING
TEHNIKA ZA PREDVIĐANJE NIVOVA
BUKE DRUMSKOG SAOBRAĆAJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Jelena Z. Tomić

**APPLICATION OF SOFT COMPUTING
TECHNIQUES IN TRAFFIC NOISE
PREDICTION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

Mentor:

dr Dragana Šumarac Pavlović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Miomir Mijić, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Zlatan Šoškić, redovni profesor
Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i
građevinarstvo u Kraljevu

dr Željko Đurović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Jelena Čertić, docent
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

Primena *soft computing* tehnika za predviđanje nivoa buke drumskog saobraćaja

Rezime

Intenzivan tehnološki i industrijski razvoj, iako doprinosi napretku civilizacije, ostavlja negativne posledice na čovekovu životnu i radnu sredinu. Pored zagađenja vazduha, zemljišta i vode, razvoj industrijskih i saobraćajnih kapaciteta prouzrokuje povećanje komunalne buke koja ima negativni uticaj na psihofizičko zdravlje i produktivnost stanovništva. Rezultati strateškog mapiranja buke na teritoriji Evropske unije nedvosmisleno pokazuju da drumski saobraćaj predstavlja dominantni izvor buke u urbanim sredinama. U literaturi su definisani različiti modeli za predviđanje buke drumskog saobraćaja čija primena omogućava procenu ugroženosti stanovništva saobraćajnom bukom i planiranje odgovarajućih mera za zaštitu životne sredine od povišenih nivoa zvuka. Međutim, primenom postojećih modela dobijaju se vrednosti koje značajno odstupaju od eksperimentalnih rezultata merenja nivoa buke na teritoriji Republike Srbije, što ukazuje na potrebu za razvojem novog modela za procenu ekvivalentnog nivoa buke drumskog saobraćaja.

U okviru ove disertacije na osnovu analize sastava saobraćaja definisane su značajne kategorije motornih vozila koje karakteriše različiti uticaj na ekvivalentni nivo buke. Na osnovu eksperimentalnih podataka za svaku od definisanih kategorija vozila, primenom *soft computing* tehnika, određen je prosečan nivo buke, čime je omogućeno predviđanje ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke u okruženju sa zanemarljivom refleksijom zvuka na osnovu informacija o protoku i sastavu saobraćaja. Razmatrana je primena optimizacionih metoda zasnovanih na inteligenciji roja i evolucionim algoritmima u uspostavljanju analitičke veze između nivoa saobraćajne buke i parametara saobraćajnog toka. Kako bi se omogućila prognoza buke u okruženju sa izraženim uticajem refleksije, definisani su i odgovarajući korekcionni faktori kojima se uzima u obzir uticaj okruženja, kao i određenih karakteristika saobraćajnice, na nivo buke na mestu prijema. Pored razvijenog matematičkog modela, kreirana je i veštačka neuralna mreža za predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke oko drumskih saobraćajnica. Validacija razvijenog matematičkog modela i kreirane neuralne mreže izvršena je statističkom analizom odstupanja izračunatih od izmerenih nivoa buke, kao i korelacionom analizom ovih nivoa. Pri tom je utvrđeno dobro slaganje merenih i proračunatih vrednosti. Uporedna analiza rezultata dobije-

nih primenom predloženih modela, kao i nekih od najčešće korišćenih modela za prognozu buke drumskog saobraćaja, pokazala je da primena novoformiranih modela omogućava tačnija predviđanja ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke.

U okviru disertacije je definisana i metodologija za izradu lokalnih mapa buke na osnovu podataka o izvorima zvuka, topografiji terena, reflektujućim površinama i preprekama prostiranju zvuka. Pri tom je definisan postupak modelovanja saobraćajnice kao izvora zvuka, kao i procene slabljenja zvuka prilikom prostiranja od izvora ka mestu prijema. Primenom C++ programskog jezika razvijen je programski paket za izradu lokalnih karata buke. Razvijeni modeli za predviđanje saobraćajne buke i softversko rešenje za izradu lokalnih karata buke omogućavaju prepoznavanje potrebe za zaštitom od povišenih nivoa zvuka, kao i planiranje i razvoj odgovarajućih mera i/ili sredstava za zaštitu od komunalne buke (poput upravljanja saobraćajnim tokom, projektovanja i postavljanja zvučnih barijera i dr.).

Ključne reči: buka drumskog saobraćaja, predviđanje buke, mapiranje buke, *soft computing* tehnike, optimizacija rojem čestica, genetski algoritam, veštačke neuralne mreže

Naučna oblast: elektrotehnika

Uža naučna oblast: akustika

UDK broj: 621.3

Application of soft computing techniques in traffic noise prediction

Abstract

Although technological and industrial development contributes to the progress of civilization, it has negative influences on human's living and working environment. In addition to air, soil and water pollution, the development of industrial and transport capacities causes increase in levels of communal noise which has negative impact on the psycho-physical health and productivity of the population. The results of strategic noise mapping in the European Union clearly indicate that road traffic represents dominant noise source in urban areas. Many authors in available literature defined different models for road traffic noise prediction, whose application enables noise mapping and noise protection planning. However, noise levels predicted by existing models deviate significantly from the experimental results of noise level measuring in the territory of Republic of Serbia, which indicates the need for development of a new model for equivalent noise level estimation.

Within the framework of this dissertation, significant categories of motor vehicles are defined based on the analysis of traffic structure and its influence on the equivalent noise level. On the basis of experimental data, for each of defined categories, the average noise level is estimated by application of soft computing techniques. Optimization methods based on swarm intelligence and evolutionary algorithms were used for establishing an analytic relationship between traffic noise level and traffic flow parameters. In order to enable prediction of noise level at an arbitrary distance from the road in an environment with significant sound reflection, correction due to sound reflection and distance correction are defined. In addition to the developed mathematical model, an artificial neural network for prediction of equivalent A-weighted level of road traffic noise has been designed. The validation of developed mathematical model and created neural network was performed by statistical analysis of the deviations between predicted and measured noise levels, as well as the correlation analysis of these levels. Results of statistical and correlation analysis show good agreement between measured and calculated values. A comparative analysis of the results obtained by proposed models and some of frequently used models for road traffic noise prediction has shown that the application of proposed models enables more precise prediction of traffic noise levels.

This dissertation defines a methodology for local noise mapping based on data on sound sources, terrain topography, reflective surfaces and noise barriers. The process of modeling of a roadway as a noise source and method for calculating the attenuation of sound during propagation outdoors are described in the scope of this paper. A software package for creating local noise maps was developed using C++ programming language. Developed models for traffic noise prediction and software solution for local noise mapping enable planning, development and comparison of different solutions for communal noise protection (such as traffic flow management, design and installation of sound barriers, etc.).

Key words: road traffic noise, noise prediction, noise mapping, soft computing techniques, particle swarm optimization, genetic algorithm, artificial neural network

Scientific area: Electrical engineering

Scientific subarea: Acoustics

UDC number: 621.3

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Pregled matematičkih modela	5
2.1	Jednostavni empirijski modeli	5
2.2	CoRTN model	8
2.3	RLS-90 model	10
2.4	CNR model	13
2.5	Nordijski model (NMR-96)	15
2.6	FHWA model	18
2.7	RVS 3.02 model	19
2.8	Poređenje modela	20
3	Soft computing tehnike	24
3.1	Genetski algoritam	26
3.1.1	Opis algoritma	27
3.1.1.1	Kodiranje	27
3.1.1.2	Procena kvaliteta jedinke	28
3.1.1.3	Selekcija roditeljskih jedinki	29
3.1.1.4	Ukrštanje hromozoma	30
3.1.1.5	Mutacija gena	33
3.1.1.6	Zamena generacija	35
3.2	PSO optimizacija	35
3.2.1	Opis PSO algoritma	35
3.2.2	Konfiguracijski parametri PSO algoritma	38
3.3	Veštačke neuralne mreže	40
3.3.1	Opšti matematički model čvora	43
3.3.2	Topologija veštačke neuralne mreže	45
3.3.3	Obučavanje neuralnih mreža	46
3.3.3.1	Opšte pravilo obučavanja	48
3.3.3.2	Algoritam propagacije greške unazad	49
4	Razvoj matematičkog modela	58
4.1	Faze razvoja modela	59
4.2	Kategorizacija motornih vozila	61
4.3	Merenja nivoa buke drumskog saobraćaja	62
4.4	Procena referentnih nivoa buke vozila definisanih kategorija	64

4.4.1	Primena PSO algoritma	65
4.4.2	Primena genetskog algoritma	71
4.5	Predviđanje buke u urbanom okruženju	76
4.5.1	Širenje talasnog fronta	78
4.5.2	Refleksija zvuka	78
4.6	Verifikacija i validacija matematičkog modela	81
5	Neuralna mreža za predviđanje saobraćajne buke	83
5.1	Predviđanje nivoa saobraćajne buke primenom ANN mreže . . .	85
5.1.1	Obuka veštačke neuralne mreže	87
5.1.2	Testiranje neuralne mreže	90
5.2	Poređenje modela za predviđanje saobraćajne buke	91
6	Izrada lokalnih mapa buke	95
6.1	Modelovanje saobraćajnice kao izvora zvuka	95
6.2	Primena ISO 9613 standarda	97
6.2.1	Slabljenje pri prostiranju zvuka	99
6.2.1.1	Širenje talasnog fronta i disipacija zvučne energije	99
6.2.1.2	Uticao tla na nivo buke	99
6.2.1.3	Modelovanje difrakcije zvuka	100
6.2.1.4	Modelovanje refleksije	103
6.2.1.5	Umanjenje buke biljnim zasadima	104
6.3	Softver za izradu lokalnih mapa buke	105
6.3.1	Upotreba softverskog rešenja	107
7	Zaključak	111
	Literatura	115
A	Deskriptori buke u životnoj sredini	127
B	Maksimalno dozvoljeni nivoi buke motornih vozila u stacionarnim uslovima	132
C	Rezultati merenja trećinsko oktavnog spektra buke drumskog saobraćaja	133
D	Eksperimentalni podaci o protoku i strukturi saobraćaja i izmerenim nivoima buke	137

SADRŽAJ

E	Normalizovani terčni spektar saobraćajne buke	145
F	Algoritam PSO optimizacije	147
G	PSO optimizacija sa topologijom prstena	150
H	GA algoritam sa turnirskom selekcijom	154
I	GA algoritam sa <i>rank based</i> selekcijom	158

Tabele

2.1	Korekcija zbog putnog zastora ΔL_P	12
2.2	Uticao prosečne brzine vozila na nivo buke	15
2.3	Uticao putnog zastora na nivo buke	15
2.4	Referentni nivoi buke pri brzini 50 km/h $L_{Aeq,i}(50 \text{ km/h})$	21
2.5	Vrednosti koeficijenta C	21
2.6	Proračunati nivoi buke [dBA]	23
4.1	Granične vrednosti nivoa buke motornih vozila u pokretu	62
4.2	Kategorizacija motornih vozila za potrebe modelovanja buke	63
4.3	Karakteristike merne opreme	64
4.4	Granice prostora mogućih rešenja	66
4.5	Konfiguracijski parametri PSO algoritma	68
4.6	Vrednosti parametara	70
4.7	Referentni nivoi buke	70
4.8	Rezultati statističke analize odstupanja izmerenih od izračunatih vrednosti	71
4.9	Parametri primenjenog GA algoritma	74
4.10	Rezultati statističke analize odstupanja izmerenih nivoa buke od vrednosti dobijenih primenom predloženog matematičkog modela	82
5.1	Statistička i korelaciona analiza - trening set	88
5.2	Statistička i korelaciona analiza - test set	89
5.3	Statistička i korelaciona analiza - odabrana ANN mreža	89
5.4	Rezultati testiranja sposobnosti generalizacije ANN mreže	90
5.5	Poređenje modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja	92
6.1	Normalizovani spektar saobraćajne buke	97
6.2	Koeficijent slabljenja nivoa zvuka usled disipacije	100
6.3	Određivanje ΔL_s , ΔL_r i ΔL_m korekcionih nivoa	101
6.4	Vrednost koeficijenta refleksije ρ	104
6.5	Slabljenje zvuka pri prostiranju kroz gustu vegetaciju	104
A.1	Slabljenje težinskih krivi	128
A.2	Vrednost korekcionog faktora u zavisnosti od tipa izvora i karaktera buke prema ISO 1996-1:2003 standardu	130
A.3	Granične vrednosti indikatora buke	131

Slike

2.1	Veličine na osnovu kojih se primenom RLS-90 modela procenjuje uticaj refleksije zvuka na nivo buke u tački prijema	13
2.2	Primer određivanja razlike dužina difrakcione i direktne putanje	14
2.3	Veličine na osnovu kojih se primenom nordijskog modela procenjuje uticaj refleksije zvuka na nivo buke u tački prijema	18
2.4	Zavisnost nivoa buke od procenta teških vozila	22
3.1	Primer jednopozicionog ukrštanja	31
3.2	Primer višepozicionog ukrštanja	31
3.3	Primer uniformnog ukrštanja	32
3.4	Kretanje čestice u okviru dvodimenzionalnog prostora mogućih rešenja	37
3.5	Primena veštačkih neuralnih mreža	41
3.6	Građa biološkog neurona	42
3.7	MP neuron	43
3.8	Opšti model veštačkog neurona	44
3.9	Aktivacione funkcije	45
3.10	Grafički prikaz sigmoidne funkcije za različite vrednosti parametra λ	46
3.11	Topologije višeslojne veštačke neuralne mreže	47
3.12	Šema obučavanja ANN mreže	48
3.13	Inkrementalno obučavanje neuralne mreže	53
3.14	Obučavanje primenom Levenberg-Markvartove metode	57
4.1	Kretanje čestica	69
4.2	MSE najkvalitetnijeg kandidata za rešenje (tokom iteracija PSO algoritma)	70
4.3	Grafički prikaz korelacije izmerenih i proračunatih nivoa buke	71
4.4	Poređenje proračunatih i izmerenih nivoa buke	72
4.5	Promena vrednosti gena	75
4.6	MSE najkvalitetnijeg kandidata za rešenje (tokom iteracija GA algoritma)	76
4.7	Definisanje virtuelnog izvora	79
4.8	Procena intenziteta zvuka virtuelnog izvora	80
4.9	Grafički prikaz korelacije nivoa buke određenih merenjima i izračunavanjima prema predloženom matematičkom modelu	82
5.1	Faze razvoja ANN mreže	84

5.2	Promena srednje kvadratne greške predviđanja tokom iteracija obučavanja neuralne mreže	89
5.3	Grafički prikaz korelacije izmerenih nivoa buke i nivoa buke procenjenih primenom ANN mreže	90
5.4	Poređenje nivoa buke procenjenih primenom neuralne mreže i odgovarajućih izmerenih vrednosti	91
5.5	Poređenje rezultata merenja i proračuna ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke	93
6.1	Prikaz izmerenih trećinsko oktavnih spektara saobraćajne buke .	97
6.2	Određivanje l_l i l_r rastojanja	102
6.3	Modelovanje refleksije zvuka uvođenjem virtuelnog izvora	103
6.4	Propagacija zvuka kroz gustu vegetaciju	105
6.5	Model zvučne barijere	106
6.6	Ulazna datoteka	107
6.7	Izlazna datoteka	110

1 Uvod

Kao pratilac brojnih životnih aktivnosti, zvuk predstavlja sastavni deo naše svakodnevnice, pa je stoga predmet interesovanja različitih naučnih disciplina (kako inženjerskih, tako i medicinskih, socioloških i dr.). Zvuk je osnovno sredstvo ljudske komunikacije, a može biti i alat, ali i izražajno sredstvo u pojedinim granama umetnosti. Međutim, svojim delovanjem, zvuk može uznemiravati, pa čak i ugroziti zdravlje ljudi. Prema definiciji, svaki neželjeni zvuk koji ometa čovekov rad ili odmor predstavlja buku. Buka je nusproizvod tehnološkog razvoja društva, s obzirom da urbanizacija, industrijalizacija, kao i porast obima saobraćaja, rezultuju generisanjem i povećanjem energije zvučnih pojava koje su neprijatne i neželjene za čovekovo okruženje. Stepenn smetnje koji buka izaziva zavisi od više faktora: intenziteta zvuka, frekvencijskog sadržaja buke, doba dana, ali i subjektivnog doživljaja osobe, pa tako, u određenim okolnostima, i zvuci relativno niskog energetskeg nivoa mogu predstavljati buku. Na buku su posebno osetljiva deca mlađa od šest godina, kao i osobe starije od 65 godina, ali i žene u srednjim godinama života [1].

Prema Svetskoj zdravstvenoj organizaciji, buka ima značajan uticaj na psihofizičko zdravlje stanovništva. Nekada se smatralo da je fizičko dejstvo buke na ljudski organizam ograničeno na čovekov organ sluha. Međutim, brojna istraživanja ukazuju da neželjeni zvuk ozbiljno pogađa centralni i vegetativni nervni sistem, a posledično i kardiovaskularni, imunološki i digestivni sistem, kao i brojne druge organe izazivajući promene i funkcionalne smetnje [2–4]. Niz studija je pokazao da povišeni nivo buke tokom spavanja dovodi do promena u srčanom ritmu, skraćuje periode dubokog sna čineći ga površnim, što za posledicu ima pad radne sposobnosti i smanjenje produktivnosti stanovništva, umor, kao i dugoročne psihosocijalne efekte. Iako je većina zdravstvenih poremećaja kratkotrajna i prolazna, usled dugotrajnog izlaganja buci oni mogu prerasti i u

hronične. Pored negativnih efekata po psihosomatsko zdravlje ljudi, buka može imati i ekonomski uticaj na tržište nekretnina, pa tako povišeni nivoi zvuka mogu prouzrokovati pad cene kvadrata za 5% [5].

Iz navedenih razloga, juna 2002. godine Evropski parlament usvaja Direktivu 2002/49/EC o proceni i upravljanju bukom u životnoj sredini (u stručnim krugovima najčešće označavana sa END, *European Noise Directive*) [6]. Prema END direktivi, zemlje članice Evropske unije su u obavezi da na svakih pet godina izrađuju strateške karte buke za aglomeracije, kao i prometne drumske i železničke saobraćajnice, kako bi se prepoznala područja sa povišenim nivoima zvuka, a potom i odredio broj ljudi ugroženih bukom. Na osnovu dobijenih karata buke, nadležni organi treba da osmisle akcione planove za zaštitu ugroženog stanovništva od buke u životnoj sredini. Akcioni planovi definišu mere i sredstva za zaštitu od buke, kao i mere za umanjenje nivoa zvuka u slučaju prekoračenja maksimalno dozvoljenih vrednosti. U dosadašnjem procesu pristupanja Evropskoj uniji, Srbija je izvršila usklađivanje svog zakonodavstva sa zakonodavstvom Evropske unije i donela Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini [7], kao i prateće podzakonske akte [8–12].

Prema podacima o ugroženosti stanovništva dobijenim strateškim mapiranjem buke na teritoriji Evropske unije [13], u urbanim sredinama 54% populacije (odnosno 56.001.200 stanovnika) izloženo je celodnevnim nivoima zvuka većim od 55 dBA, dok je 15% populacije (tj. 15.754.500 stanovnika) izloženo nivoma većim od 65 dBA. Van aglomeracija, dodatnih 33.437.244 stanovnika živi u područjima u kojima je celodnevni nivo buke veći od 55 dBA, dok je 7.657.083 stanovnika izloženo celodnevnoj buci čiji ekvivalentni nivo premašuje 65 dBA. Od 89.438.444 stanovnika koji žive u zonama sa povišenim nivoima zvuka, oko 89 miliona ljudi je ugroženo saobraćajnom bukom (uključujući buku drumskog, železničkog i avionskog saobraćaja). S obzirom na to da je približno 68 miliona stanovnika izloženo povišenim nivoima buke drumskog saobraćaja, može se zaključiti da drumski saobraćaj predstavlja dominantni izvor komunalne buke.

U cilju smanjenja nivoa saobraćajne buke, u razvijenim zemljama propisani su maksimalno dozvoljeni nivoi buke motornih vozila. Međutim, čak i sa zakonskom favorizacijom “tihih” vozila potrebno je vremena da se zastareli vozni park zameni, pa je stoga neophodno preduzeti druge mere za umanjenje nivoa buke, poput akustičkog zoniranja urbanog prostora, postavljanja zvučnih barijera, zvučne zaštite stambenih objekata, upravljanja saobraćajnim tokom (zabrane prometa pojedinih kategorija vozila, ograničenja brzine, smanjenje protoka vozila i dr.).

Odgovarajući model za predviđanje ekvivalentnog nivoa buke drumskog saobraćaja je od ključne važnosti za procenu ugroženosti stanovništva bukom i sprovođenje adekvatnih mera za zaštitu od buke. Iz navedenog razloga, formirani su brojni matematički modeli uspostavljanjem analitičkih veza između eksperimentalno izmerenih nivoa buke i odabranih parametara drumskog saobraćaja. Kod većine dostupnih modela analitičke veze određivane su regresionom analizom. Međutim, primenom postojećih modela dobijaju se vrednosti koje značajno odstupaju od izmerenih nivoa buke na teritoriji Republike Srbije. Jedan od uzroka tih odstupanja je napredak u razvoju transportnih sredstava tokom poslednjih nekoliko decenija, koji je doveo do smanjenja razlika među pojedinim kategorijama vozila, kao i do razvoja novih tipova vozila koja su postala značajan izvor saobraćajne buke. Takođe, postojeći modeli su prilagođeni karakteristikama voznog parka urbane sredine za koju su razvijeni. Stoga se i javlja potreba za razvojem novog modela za procenu nivoa buke drumskog saobraćaja. S obzirom da pojedine kategorije vozila imaju različiti uticaj na ekvivalentni nivo buke, potrebno je uvesti detaljniju kategorizaciju motornih vozila i odrediti faktore uticaja pojedinih kategorija vozila, kako bi se omogućila tačnija predviđanja, ali i upravljanje saobraćajnim tokom u cilju smanjenja ekvivalentnog nivoa buke. Pošto ovakav model ima veći broj ulaznih parametara, regresiona analiza predstavlja nepouzdanu sredstvo za njegovo formiranje. Sa druge strane, *soft computing* tehnike su posebno pogodne za rešavanje problema koji nemaju egzaktno i jedinstveno rešenje, pa imaju potencijal za procenu uticaja pojedinih parametara na nivo buke drumskog saobraćaja.

U okviru ove doktorske disertacije, na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja ekvivalentnog nivoa buke izvršenih u okruženju sa zanemarljivom refleksijom zvuka (od vertikalnih prepreka), primenom *soft computing* tehnika uspostavljena je funkcionalna veza između odabranih parametara saobraćajnog toka i ekvivalentnog nivoa buke na referentnom rastojanju od ose saobraćajnice. Takođe je omogućena i procena podužne zvučne snage drumske saobraćajnice kao linijskog izvora zvuka na osnovu informacija o protoku i strukturi saobraćaja. Kako bi se omogućilo predviđanje buke oko drumske saobraćajnice, a između građevinskih objekata koji je okružuju, odnosno u zoni koja je najugroženija bukom drumskog saobraćaja, razvijen je matematički model koji u procesu predviđanja buke procenjuje i uticaj refleksije zvuka od okolnih objekata. Takođe je formulisana i metodologija za izradu lokalnih karata buke kako bi se omogućila procena zvučnog polja u okruženju u kojem postoje vertikalne prepreke prostiranju zvuka. Primenom C++ programskog jezika razvijen je sof-

tverski paket za mapiranje buke (koji se bazira na ISO 9613 standardu [14]). Primena formiranog matematičkog modela i razvijenog programskog paketa omogućava prepoznavanje potrebe za sprovođenjem mera za snižavanje nivoa buke, kao i razvoj i poređenje različitih rešenja za zaštitu čovekove okoline od povišenih nivoa zvuka (kao što su kontrola saobraćajnog toka, postavljanje zvučnih barijera i dr.), a samim tim i formulisanje odgovarajućih akcionih planova.

2 Pregled matematičkih modela

Počevši od pedesetih godina dvadesetog veka, kada su zabeleženi prvi pokušaji predviđanja saobraćajne buke, brojni autori ponudili su veliki broj matematičkih modela za procenu nivoa buke drumskog saobraćaja, razvijenih na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja. Svi modeli raspoloživi u literaturi baziraju se na uspostavljanju analitičkih veza između nivoa saobraćajne buke i izabranih parametara saobraćajnog toka. Kod većine dostupnih modela ti parametri su protok lakih i teških vozila, a analitičke veze između odabranih parametara i nivoa buke određivane su primenom regresione analize. S obzirom da su formirani na osnovu eksperimentalnih podataka, postojeći modeli u sebe uključuju i pojedine karakteristike i specifičnosti saobraćajnog toka (kao i putnog zastora) urbane sredine za koju su razvijeni i iz tih razloga nisu adekvatni za primenu u drugim sredinama u kojima godine starosti, struktura i karakteristike voznog parka mogu biti drugačije. U okviru ovog poglavlja, u kratkim crtama, prikazani su neki od najčešće korišćenih modela za predviđanje nivoa buke drumskog saobraćaja.

2.1 Jednostavni empirijski modeli

Jedan od prvih modela za predviđanje saobraćajne buke objavljen je u okviru priručnika za kontrolu buke iz 1952. godine [15]. Dati model omogućava procenu ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska u prijemnoj tački čija je udaljenost od ose saobraćajnice veća od 20 stopa (oko 6 m). Ekvivalentni nivo saobraćajne buke L računa se prema formuli:

$$L = 68 + 8,5 \log Q - 20 \log d \text{ [dBA]}, \quad (2.1)$$

gde je

Q – protok motornih vozila¹, [vozila/h],

d – odstojanje prijemne tačke od ose saobraćajnice izraženo u stopama.

Prikazani model namenjen je predviđanju buke oko saobraćajnice na kojoj je prosečna brzina kretanja motornih vozila u opsegu od 35 mph do 45 mph (približno od 55 km/h do 75 km/h).

Godine 1965, Lamur uspostavlja funkcionalnu vezu između protoka motornih vozila i kvantila L_{50} , odnosno nivoa saobraćajne buke koji je premašen tokom 50% vremena. Prema Lamurovom modelu [16] vrednost L_{50} nivoa moguće je proceniti primenom jednačine:

$$L_{50} = 52 + 10 \log \left(\frac{Q}{d} \right) \text{ [dBA]} \quad (2.2)$$

ukoliko je udeo teških vozila u saobraćajnom toku manji od 15%, a protok motornih vozila između 1200 vozila/h i 1500 vozila/h .

Nakon tri godine, Džonson [17] predlože prvi matematički model za predviđanje buke drumskog saobraćaja čija primena omogućava procenu uticaja brzine kretanja vozila na emisiju saobraćajne buke. U skladu sa predloženim modelom, vrednost L_{50} nivoa izračunava se prema formuli:

$$L_{50} = 51,5 + 10 \log \left(\frac{Q}{d} \right) + 30 \log \left(\frac{v}{40} \right) \text{ [dBA]}, \quad (2.3)$$

pri čemu v označava prosečnu brzinu kretanja motornih vozila izraženu u mph. Primena Džonsonovog modela daje dobro slaganje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima ako je procenat teretnih vozila manji od 40% [17].

Godine 1969, u okviru izveštaja Istraživačkog programa američkog nacionalnog udruženja za drumski saobraćaj (NCHRP, *National Cooperative Highway Research Program*) analiziran je uticaj strukture saobraćajnog toka na nivo buke drumskog saobraćaja. Definisane su dve kategorije motornih vozila: laka i teška vozila, a potom, na osnovu eksperimentalnih podataka, i funkcionalna veza između kvantila L_{50} i udela teških vozila u saobraćajnom toku. U skladu sa izloženim matematičkim modelom, vrednosti kvantila L_{50} na proizvoljnom rastojanju d [ft] od ose saobraćajnice moguće je proceniti na osnovu protoka

¹protok motornih vozila predstavlja broj motornih vozila tokom jednočasovnog vremenskog perioda

motornih vozila, Q [vozila/h], procenta teških vozila, p [%], i prosečne brzine kretanja vozila, v [mph], primenom sledeće jednačine [18]:

$$L_{50} = 20 + 10 \log \left(\frac{Qv^2}{d} \right) + 0,4 \cdot p \text{ [dBA]}. \quad (2.4)$$

Godine 1977, M. A. Burges [19] predlaže matematički model za predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke, L_{Aeq} , razvijen na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja nivoa buke drumskog saobraćaja na teritoriji grada Sidneja. Primenom regresione analize uspostavljena je funkcionalna veza između parametara saobraćajnog toka (protoka vozila Q [vozila/h] i procenta teških vozila p [%]) i ekvivalentnog nivoa buke:

$$L_{Aeq} = 55,5 + 10,2 \log Q + 0,3 \cdot p - 19,3 \log d \text{ [dBA]}, \quad (2.5)$$

pri čemu je odstojanje tačke prijema od ose saobraćajnice d izraženo u metrima.

Pored Burgesovog modela, jedan od najčešće korišćenih empirijskih modela za procenu buke drumskog saobraćaja jeste Grifitov model [18, 20], čija primena omogućava predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke na osnovu vrednosti L_{10} , L_{50} i L_{90} kvantila²:

$$L_{Aeq} = L_{50} + 0,018 (L_{10} - L_{90})^2 \text{ [dBA]}, \quad (2.6)$$

pri čemu se vrednosti kvantila određuju na osnovu parametara saobraćajnog toka (protoka motornih vozila Q [vozila/h] i procenta teških vozila p [%]) i odstojanja od ose saobraćajnice d [m] primenom sledećih izraza:

$$\begin{aligned} L_{10} &= 61 + 8,4 \log Q + 0,15p - 11,5 \log d \text{ [dBA]} \\ L_{50} &= 44,8 + 10,8 \log Q + 0,12p - 9,6 \log d \text{ [dBA]} \\ L_{90} &= 39,1 + 10,5 \log Q + 0,06p - 9,3 \log d \text{ [dBA]} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Godine 1995, Fagoti uvodi detaljniju kategorizaciju motornih vozila kako bi utvrdio uticaj pojedinih kategorija vozila na ekvivalentni nivo saobraćajne buke [21]. Vozila se dele u četiri kategorije: automobili, kamioni, autobusi i motori, a ekvivalentni A-ponderisani nivo buke određuje se primenom sledeće jednačine:

$$L_{Aeq} = 33,5 + 10 \log(Q_l + Q_m + 8Q_p + 88Q_b) \text{ [dBA]}, \quad (2.8)$$

²deskriptori buke su definisani u prilogu A

gde je

Q_l – protok automobila, [vozila/h],

Q_m – protok motora, [vozila/h],

Q_p – protok kamiona, [vozila/h],

Q_b – protok autobusa, [vozila/h].

2.2 CoRTN model

CoRTN model [22] je razvijen 1988. godine u okviru saradnje TRRL (*Transport and Road Research Laboratory*) laboratorije i Ministarstva saobraćaja Velike Britanije. Dati model je korišćen za izradu strateških karata buke za aglomeracije i glavne drumske saobraćajnice na teritoriji Velike Britanije. Komercijalni softverski paketi za izradu strateških karata buke, SoundPlan i CadnaA, implementiraju CoRTN model kao jedan od opcionih metoda za predviđanje nivoa buke.

Primena CoRTN modela omogućava predviđanje L_{10} nivoa, pri čemu se proračun može izvršiti za jednočasovni ili osamnaestostočasovni (06:00-24:00 h) vremenski period. Saobraćajni tok se modeluje linijskim izvorom zvuka koji se nalazi na rastojanju 3,5 m od ivice kolovoza i visini 0,5 m iznad kolovozne površine. Ako se duž saobraćajnice menja protok motornih vozila, struktura saobraćajnog toka, brzina motornih vozila i/ili karakteristike saobraćajnice (nagib ili kolovozni zastor), datu saobraćajnicu je potrebno podeliti na više segmenata tako da duž svakog od dobijenih segmenata pomenute karakteristike saobraćajnog toka i saobraćajnice ostaju nepromenjene. Svaki segment se predstavlja zasebnim linijskim izvorom čija poduzna zvučna snaga zavisi od protoka motornih vozila, udela teških vozila u saobraćajnom toku, brzine kretanja vozila, tipa (i karakteristika) putnog zastora i nagiba puta. Ukupni nivo buke na mestu prijema dobija se sabiranjem zvučnih energija pojedinačnih izvora (segmenata saobraćajnice).

Prema CoRTN modelu, vrednost nivoa buke koju stvara drumski saobraćaj na 10 m rastojanja od bliže ivice kolovoza, a koja je premašena tokom 10% (posmatranog) jednočasovnog vremenskog intervala, moguće je proceniti primenom sledeće jednačine:

$$L_{10}(1 \text{ h}) = 42,2 + 10 \log Q + \Delta L_V + \Delta L_S + \Delta L_P + \Delta L_\alpha \text{ [dBA]}, \quad (2.9)$$

gde je

Q – protok motornih vozila, [vozila/h],

ΔL_V – korekcija nivoa buke za uticaj brzine vozila i procenta teških vozila,

ΔL_S – korekcija nivoa buke za uticaj nagiba puta,

ΔL_P – korekcija nivoa buke za uticaj kolovoznog zastora,

ΔL_α – korekcija nivoa buke u slučaju linijskog izvora ograničene dužine.

Uticaj teških vozila, kao i brzine kretanja motornih vozila v [km/h], na nivo saobraćajne buke dat je izrazom:

$$\Delta L_V = 33 \log \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log \left(1 + \frac{5p}{v} \right) - 68,8 \text{ [dB]}, \quad (2.10)$$

gde p [%] označava udeo teških vozila u saobraćajnom toku. Pri tom se sva vozila sa masom većom od 1,525 t smatraju teškim motornim vozilima.

Prema CoRTN modelu, sa svakim procentom nagiba puta, g [%], nivo buke se povećava za 0,3 dB, tako da je:

$$\Delta L_S = 0,3 \cdot g \text{ [dB]}. \quad (2.11)$$

Ako je brzina vozila manja od 75 km/h, a površina kolovoza presvučena asfaltom, proračunati nivo buke je potrebno umanjiti za 1 dB. Pri brzinama većim od 75 km/h uticaj kolovoznog zastora na nivo buke dat je formulom:

$$\Delta L_P = \begin{cases} 10 \log (90 \cdot TD + 30) - 20, & \text{u slučaju betonskog zastora} \\ 10 \log (20 \cdot TD + 60) - 20, & \text{u slučaju asfaltnog zastora} \end{cases} \quad (2.12)$$

gde je sa TD označena dubina teksture kolovozne površine izražena u milimetrima.

Ako se segment saobraćajnice (koji se predstavlja zasebnim linijskim izvorom) sa pozicije prijemne tačke vidi pod uglom α [°], tada je:

$$\Delta L_\alpha = 10 \log \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.13)$$

Primena CoRTN modela omogućava procenu vrednosti kvantila L_{10} u proizvoljnoj prijemnoj tački čije je horizontalno rastojanje od bliže ivice kolovoza

veće od 4 m. Ako d [m] označava odstojanje izvora buke od tačke prijema, korekcija nivoa buke za uticaj širenja talasnog fronta izračunava se prema formuli:

$$\Delta L_D = -10 \log \left(\frac{d}{13,5 m} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.14)$$

Uticaj terena iznad kog se prostiru zvučni talasi (od izvora zvuka ka posmatranoj tački prijema) na nivo saobraćajne buke u datoj prijemnoj tački dat je izrazom:

$$\Delta L_T = \begin{cases} 5,2I \log \left(\frac{3}{d_h + 3,5} \right) \text{ [dB]}, & h_m < 0,75 \\ 5,2I \log \left(\frac{6h_m - 1,5}{d_h + 3,5} \right) \text{ [dB]}, & 0,75 \leq h_m < (d_h + 5)/6 \\ 0 \text{ dB}, & (d_h + 5)/6 \leq h_m \end{cases} \quad (2.15)$$

gde je d_h [m] horizontalno rastojanje između prijemne tačke i izvora, h_m [m] srednja visina linije koja spaja izvor i prijemnu tačku, dok I označava koliki procenat tla (iznad kog se zvuk prostire od izvora ka tački prijema) je porozan.

Ako između izvora buke i tačke prijema postoji zvučna barijera, primena CoRTN modela omogućava proračun slabljenja usled difrakcije zvuka na osnovu razlike dužina puteva difraktovanog i direktnog talasa [22].

2.3 RLS-90 model

Ministarstvo saobraćaja Savezne Republike Nemačke 1990. godine formulisalo je RLS-90 standard [23] za predviđanje buke drumskog saobraćaja. RLS-90 standardom je uspostavljena funkcionalna veza između parametara saobraćajnog toka (protoka vozila, procenta teških vozila, ograničenja brzine) i prosečnog nivoa buke na odstojanju 25 m od ose saobraćajnice, kao i uticaj pojedinih karakteristika saobraćajnice na emisiju buke. Prema RLS-90 standardu, vrednost ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke na rastojanju 25 m od ose saobraćajnice (u otvorenom prostoru bez vertikalnih prepreka) moguće je proceniti primenom sledeće jednačine:

$$L_0 = 37,3 + 10 \log (Q \cdot (1 + 0,082 \cdot p)) + \Delta L_V + \Delta L_S + \Delta L_P \text{ [dBA]}, \quad (2.16)$$

gde je

$$Q - \text{protok motornih vozila, [vozila/h]},$$

p – udeo teških vozila u saobraćajnom toku, [%],

ΔL_V – korekcija nivoa buke za uticaj brzine vozila,

ΔL_S – korekcija nivoa buke za uticaja nagiba puta,

ΔL_P – korekcija nivoa buke za uticaj putnog zastora.

Kategorijom teških vozila obuhvaćena su motorna vozila čija masa premašuje 2,8 t.

Uticaj brzine kretanja vozila na nivo buke drumskog saobraćaja dat je izrazom:

$$\Delta L_V = L_{lv} - 37,3 + 10 \log \left(\frac{100 + (10^{0,1D} - 1) \cdot p}{100 + 8.23 \cdot p} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.17)$$

gde je

$$D = L_{lv} - L_{hv}, \quad (2.18)$$

$$L_{lv} = 27,7 + 10 \log (1 + (0,02 \cdot v_{lv})) \text{ [dBA]}, \quad (2.19)$$

$$L_{hv} = 23,1 + 12,5 \log v_{hv} \text{ [dBA]}. \quad (2.20)$$

Pr tom su sa v_{lv} [km/h] i v_{hv} [km/h] označena ograničenja brzine kretanja lakih i teških motornih vozila, redom. RLS-90 model je moguće primeniti za predviđanje saobraćajne buke oko deonica puta na kojima je maksimalna dozvoljena brzina kretanja lakih vozila manja od 130 km/h, dok ograničenje brzine za teška motorna vozila nije veće od 80 km/h.

Prema RLS-90 standardu, korekcija nivoa buke zbog nagiba puta se proračunava ukoliko je nagib puta, g [%], veći od 5%:

$$\Delta L_S = \begin{cases} 0,6 \cdot g - 3 \text{ [dB]}, & \text{ako je } g > 5\% \\ 0 \text{ dB}, & \text{ako je } g \leq 5\% \end{cases}. \quad (2.21)$$

Karakteristike putnog zastora utiču na nivo buke koja nastaje interakcijom podloge i pneumatika motornih vozila. Presvlačenje kolovoza novim putnim zastorom može umanjiti nivo saobraćajne buke na deonicama puta na kojima je ograničenje brzine kretanja motornih vozila veće od 60 km/h, tako da je za takve deonice standardom definisana korekcija od -2 dB za betonsku podlogu, odnosno -5 dB za porozni asfalt sa više od 15% pora. S obzirom na to da stariji putni zastori mogu povećati nivo buke, pri čemu je porast buke izraženiji pri većim

brzinama kretanja vozila, RLS-90 standardom su za različite tipove kolovoznog zastora, u zavisnosti od ograničenja brzine, definisani odgovarajući korekcionni nivoi (tabela 2.1).

Tabela 2.1: Korekcija zbog putnog zastora, ΔL_P [dB], prema RLS-90 standardu [23]

Putni zastor	Ograničenje brzine		
	30 km/h	40 km/h	≥ 50 km/h
Asfalt	0	0	0
Beton	1,0	1,5	2,0
Kaldrma sa glatkom teksturom	2,0	2,5	3,0
Kaldrma sa grubom teksturom	3,0	4,5	6,0

Kako bi se odredio nivo buke drumskog saobraćaja na proizvoljnom rastojanju od saobraćajnice potrebno je korigovati referentni nivo buke, izračunat primenom jednačine 2.16, za uticaj širenja talasnog fronta i disipacije zvučne energije:

$$\Delta L_D = 15,8 - 10 \log d - 0,0142 \cdot d^{0,9} \text{ [dB]}. \quad (2.22)$$

Pri tom je sa d označeno najkraće rastojanje između prijemne tačke i ose saobraćajnice, izraženo u metrima.

Uticaj terena iznad kog se prostiru zvučni talasi na nivo buke u prijemnoj tački dat je izrazom:

$$\Delta L_G = -4,8 \cdot 10^{-\frac{1}{2,3} \left(\frac{h_m}{d} (8,5 + \frac{100}{d}) \right)^{1,3}} \text{ [dB]}, \quad (2.23)$$

gde je h_m [m] srednja visina linije koja spaja izvor i prijemnu tačku, a normalna je na liniju izvora.

Ako se saobraćajnica nalazi između dva niza reflektujućih površina (stambenih objekata, potpornih zidova, itd.) procenjeni nivo buke u tački prijema koja je pozicionirana između reflektujućih površina potrebno je korigovati za uticaj refleksije zvučnih talasa. Povećanje nivoa buke usled refleksije zvuka određuje se primenom sledeće jednačine:

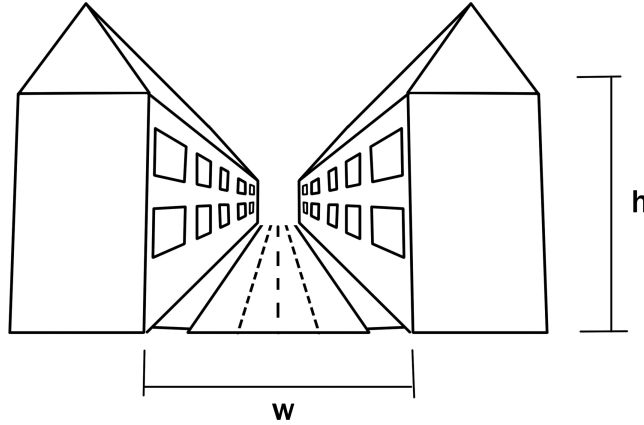
$$\Delta L_R = 4 \frac{h}{w} \text{ [dB]}, \quad (2.24)$$

pri čemu maksimalna korekcija nivoa buke iznosi 3,2 dB. Sa w [m] označeno je rastojanje između okolnih objekata (slika 2.1), dok je h [m] srednja visina objekata. Ako su reflektujuće površine obložene apsorpcionim materijalima, korek-

cija nivoa buke se izračunava prema formuli:

$$\Delta L_R = 2 \frac{h}{w} \text{ [dB]}, \quad (2.25)$$

dok maksimalno povećanje nivoa buke iznosi 1,6 dB.



Slika 2.1: Veličine na osnovu kojih se primenom RLS-90 modela procenjuje uticaj refleksije zvuka na nivo buke u tački prijema [24]

Ako između prijemne tačke i saobraćajnice postoji zvučna barijera, potrebno je izračunati slabljenje nivoa zvuka usled difrakcije primenom sledeće jednačine:

$$\Delta L_B = -7 \cdot \left(5 + \frac{70 + 0,25d}{1 + 0,2z} zK^2 \right) \text{ [dB]}, \quad (2.26)$$

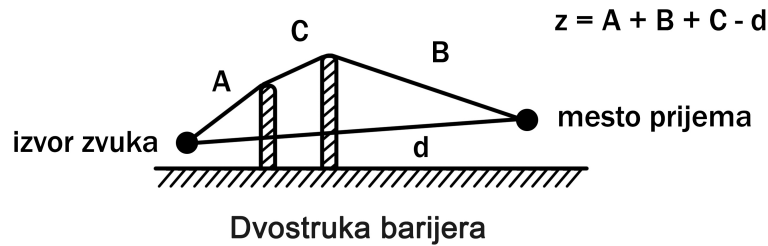
u kojoj je sa z [m] označena razlika puteva difraktovanog i direktnog talasa, dok je K meteorološka korekcija koja se računa prema formuli:

$$K = \exp\left(-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{A \cdot B \cdot d}{2z}}\right). \quad (2.27)$$

Sa A [m] je označeno najkraće rastojanje od izvora do gornje ivice barijere, dok je B [m] najkraće rastojanje između prijemne tačke i gornje ivice barijere (slika 2.2).

2.4 CNR model

Nacionalni savet za naučna istraživanja (*Consiglio Nazionale delle Ricerche*, CNR) Republike Italije razvio je CNR model za predviđanje buke drumskog



Slika 2.2: Primer određivanja razlike dužina difrakcione i direktne putanje [24]

saobraćaja koji je prilagođen karakteristikama i specifičnostima drumskog saobraćaja na javnim putevima Republike Italije [25, 26].

U skladu sa CNR modelom, ekvivalentni A-ponderisani nivo saobraćajne buke u proizvoljnoj prijemnoj tački računa se prema formuli:

$$L_{Aeq} = 35,1 + 10 \log(Q_{lv} + 6 \cdot Q_{hv}) - 10 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \Delta L_V + \Delta L_R + \Delta L_P + \Delta L_S \text{ [dBA]}, \quad (2.28)$$

gde je

Q_{lv} – protok lakih motornih vozila, [vozila/h],

Q_{hv} – protok teških motornih vozila, [vozila/h],

d – najkraće rastojanje između prijemne tačke i ose saobraćajnice, [m],

d_0 – referentno rastojanje od 25 m,

ΔL_V – korekcija nivoa buke za uticaj brzine kretanja motornih vozila (tabela 2.2),

ΔL_R – povećanje nivoa buke usled refleksije zvuka,

ΔL_S – korekcija nivoa buke za uticaja nagiba puta (ukoliko je nagib puta veći od 5%, sa svakim narednim procentom nagiba nivo buke se povećava za 0,6 dB),

ΔL_P – korekcija nivoa buke za uticaj kolovoznog zastora (tabela 2.3).

Tabela 2.2: Uticaj prosečne brzine vozila na nivo buke [18]

Brzina vozila [km/h]	$\Delta L_V [dB]$
30-50	0,0
60	1,0
70	2,0
80	3,0
100	4,0

Tabela 2.3: Uticaj putnog zastora na nivo buke [18]

Putni zastor	$\Delta L_P [dB]$
Gladak asfalt	-0,5
Grub asfalt	0,0
Cement	1,5
Makadam	4,0

2.5 Nordijski model (NMR-96)

Primena NMR-96 modela [27] omogućava predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke drumskog saobraćaja, L_{Aeq} , u proizvoljnoj prijemnoj tački na osnovu sledećih podataka:

- protoka lakih i teških motornih vozila,
- srednje brzina kretanja vozila (ukoliko je poznata) ili ograničenja brzine,
- rastojanja prijemne tačke od ose saobraćajnice,
- tipa tla (porozno ili neporozno),
- visina i pozicija barijera,
- pozicija reflektujućih površina.

Pri tom su u kategoriju teških vozila svrstana motorna vozila čija masa premašuje 3,5t. Procenjeni nivo zvuka predstavlja očekivanu vrednost nivoa saobraćajne buke pri brzini vetra manjoj od 2 m/s.

U okviru nordijskog modela drumski saobraćaj se smatra linijskim izvorom buke koji je pozicioniran na visini 0,5 m iznad ose saobraćajnice. Ukoliko se duž saobraćajnice menja brzina kretanja vozila (ograničenje brzine), protok motornih vozila ili struktura saobraćajnog toka, datu saobraćajnicu je potrebno

podeliti na više segmenata tako da duž svakog od formiranih segmenata pomenute karakteristike saobraćajnog toka ostaju nepromenjene (dok se linijski izvori kojima se modeluju susedni segmenti međusobno razlikuju po podužnoj zvučnoj snazi).

Ekvivalentni A-ponderisani nivo zvuka linijskog izvora saobraćajne buke u posmatranoj prijemnoj tački proračunava se primenom jednačine:

$$L_{Aeq} = L_0 + \Delta L_D + \Delta L_{GB} + \Delta L_\alpha + \Delta L_S + \Delta L_R \text{ [dBA]}, \quad (2.29)$$

gde je

L_0 – referentni nivo zvuka na rastojanju 10 m od linije izvora,

ΔL_α – korekcija nivoa buke u slučaju linijskog izvora ograničene dužine,

ΔL_D – korekcija nivoa buke za uticaj širenja talasnog fronta,

ΔL_{GB} – korekcija nivoa buke za uticaj tla i prepreka prostiranju zvuka,

ΔL_G – korekcija nivoa buke za uticaj nagiba puta,

ΔL_R – povećanje nivoa buke usled refleksije zvuka.

Za svaku od definisanih kategorija vozila, nordijski standard definiše nivo izloženosti buci pri prolasku motornog vozila ($L_{AE,lv}$ za lako, a $L_{AE,hv}$ za teško vozilo) kao funkciju prosečne brzine kretanja vozila (v_{lv} , odnosno v_{hv}):

$$L_{AE,lv} = \begin{cases} 73,5 + 25 \log(v_{lv}/50) \text{ [dBA]}, & v_{lv} \geq 40 \text{ km/h} \\ 71.1 \text{ dBA}, & 30 \text{ km/h} \leq v_{lv} < 40 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2.30)$$

$$L_{AE,hv} = \begin{cases} 80,5 + 30 \log(v_{hv}/50) \text{ [dBA]}, & 50 \text{ km/h} < v_{hv} \leq 90 \text{ km/h} \\ 80.5 \text{ dBA}, & 30 \text{ km/h} \leq v_{hv} \leq 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

tako da se referentni ekvivalentni nivo buke tokom vremenskog intervala T [s] može odrediti na osnovu brojeva lakih i teških motornih vozila u toku posmatranog vremenskog intervala, N_{lv} i N_{hv} , primenom sledeće jednačine:

$$L_0 = 10 \log \left(10^{(L_{AE,lv} + 10 \log \frac{N_{lv}}{T})/10} + 10^{(L_{AE,hv} + 10 \log \frac{N_{hv}}{T})/10} \right) \text{ [dBA]}. \quad (2.31)$$

Ako se sa pozicije prijemne tačke linijski izvor vidi pod uglom α [°], tada je:

$$\Delta L_\alpha = 10 \log \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.32)$$

Zbog širenja talasnog fronta prilikom udaljavanja zvučnog talasa od izvora zvuka dolazi do slabljenja nivoa buke, pa je referentni nivo zvuka potrebno korigovati ako je rastojanje d [m] između prijemne tačke i linije izvora različito od 10 m. Korekcija nivoa zvuka za uticaj širenja talasnog fronta se određuje primenom sledeće jednačine:

$$\Delta L_D = -10 \log \left(\frac{d}{10 m} \right) \text{ [dB]}. \quad (2.33)$$

Ako je teren između saobraćajnice i prijemne tačke ravan i tvrd (neporozan), bez fizičkih prepreka prostiranju zvuka, $\Delta L_{GB} = 0$ dB. Ako je teren mek (porozan), prilikom refleksije zvuka od tla deo zvučne energije biva apsorbovan (dok se refleksija talasa od tvrdog tla smatra potpunom, odnosno bez gubitka energije). Ukoliko, pak, zvučni talas prilikom prostiranja nailazi na prepreku, do tačke prijema deo zvučne energije dospeva difrakcijom. Nordijskim standardom [27] detaljno je opisan postupak procene uticaja tla i difrakcije zvuka na ekvivalentni nivoa buke drumskog saobraćaja u zadatoj prijemnoj tački.

Kako sa povećanjem nagiba puta raste i nivo buke drumskog saobraćaja, NMR-96 model uvodi korekciju nivoa buke za uticaj nagiba saobraćajnice G [%]:

$$\Delta L_G = \frac{2G}{100} + \frac{3G}{100} \log(1 + p) \text{ [dB]}. \quad (2.34)$$

U navedenoj jednačini figuriše i udeo teških vozila u saobraćajnom toku p [%].

Primena NMR-96 modela omogućava modelovanje refleksije zvuka od površine čija je vrednost koeficijenta apsorpcije manja od 0,6. Korekcija nivoa buke za uticaj refleksije zvuka izračunava se primenom sledeće jednačine:

$$\Delta L_R = 10 \log \left(1 + \frac{\alpha_r \cdot d}{\alpha \cdot d_s} \right) \text{ [dB]}, \quad 0 \leq \alpha < 180^\circ, \quad (2.35)$$

gde je

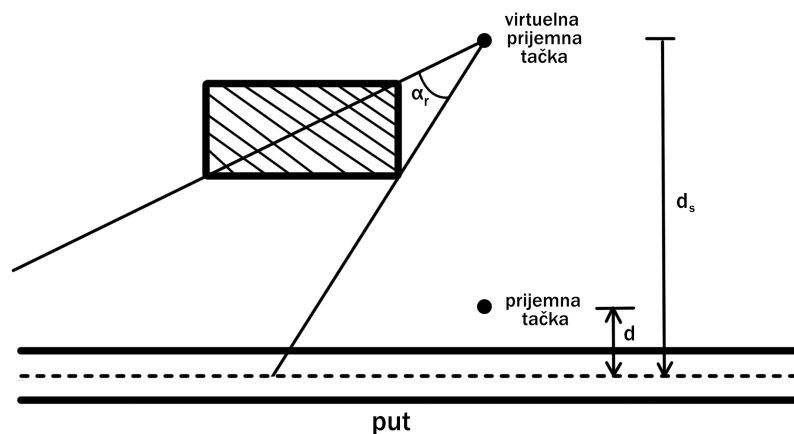
d – odstojanje prijemne tačke od linije izvora (ose saobraćajnice), [m],

d_s – normalno rastojanje između virtuelne prijemne tačke i linije izvora, [m],

α – ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi izvor zvuka, [°],

α_r – ugao pod kojim se vidi reflektujuća površina sa pozicije prijemne tačke, [°].

Pri tom se virtuelna prijemna tačka dobija preslikavanjem prijemne tačke u odnosu na refleksionu ravan, kao što je prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3: Veličine na osnovu kojih se primenom nordijskog modela procenjuje uticaj refleksije zvuka na nivo buke u tački prijema [27]

2.6 FHWA model

Savezna administracija za autoputeve (FHWA, *Federal Highway Administration*) Sjedinjenih Američkih Država 1978. godine razvila je model za predviđanje saobraćajne buke [28] koji je u međuvremenu više puta korigovan, pri čemu su menjani referentni nivoi buke pojedinih kategorija motornih vozila. Radi detaljnijeg opisa strukture saobraćajnog toka, definisane su sledeće kategorije vozila:

- automobili – motorna vozila sa dve osovine i četiri točka,
- srednji kamioni – motorna vozila sa dve osovine i šest točkova,
- teški kamioni – motorna vozila sa tri ili više osovina.

Za svaku od definisanih kategorija vozila, ekvivalentni A-ponderisani nivo saobraćajne buke tokom jednočasovnog vremenskog intervala u proizvoljnoj

prijemnoj tački se izračunava prema formuli:

$$L_{Aeq,i} = (L_0)_{E_i} + 10 \log \left(\frac{Q_i d_0}{v_i} \right) - 25 \\ + 10 \log \left(\frac{d_0}{d} \right)^{1+\beta} + 10 \log \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) + \Delta L_B \text{ [dBA]}, \quad (2.36)$$

gde je

Q_i – protok vozila i -te kategorije, [vozila/h],

d – najkraće rastojanje između prijemne tačke i ose saobraćajnice, [m],

d_0 – referentno rastojanje od 15 m,

v_i – brzina vozila i -te kategorije, [km/h],

α – ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi saobraćajnica, [°],

β – parametar čija je vrednost 0 ako je teren između saobraćajnice i prijemne tačke tvrd (neporozan), dok u slučaju mekog (poroznog) tla vrednost parametra β iznosi 0,5,

ΔL_B – slabljenje usled difrakcije (ukoliko između saobraćajnice i prijemne tačke postoji zvučna barijera),

dok je referentni nivo $(L_0)_{E_i}$ definisan za svaku od kategorija motornih vozila kao funkcija prosečne brzine vozila date kategorije:

$$(L_0)_{E_i} = \begin{cases} 38,1 \log(v_i) - 2,4 \text{ [dBA]}, & \text{za automobile} \\ 33,9 \log(v_i) + 16,4 \text{ [dBA]}, & \text{za srednje kamione} \\ 24,6 \log(v_i) + 38,5 \text{ [dBA]}, & \text{za teške kamione} \end{cases} \quad (2.37)$$

2.7 RVS 3.02 model

RVS 3.02 predstavlja austrijski model za predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke. Ovim modelom su definisane sledeće kategorije motornih vozila:

- laka vozila - automobili,
- srednje teška vozila - autobusi, motori i teretna vozila bez prikolice,

- srednje teška vozila sa smanjenom emisijom buke,
- teška motorna vozila - teretna vozila sa prikolicom,
- teška vozila sa smanjenom emisijom buke.

Kao i u slučaju nordijskog modela, drumski saobraćaj se modeluje linijskim izvorom zvuka koji se nalazi 0,5m iznad površine kolovoza. Ekvivalentni A-ponderisani nivoa buke drumskog saobraćaja u proizvoljnoj prijemnoj tački se određuje primenom jednačine [29]:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^5 10^{(L_{Aeq,i} + 10 \log Q_i)/10} \right) + 10 \log \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right) - 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \text{ [dBA]}, \quad (2.38)$$

gde je

$L_{Aeq,i}$ – referentni nivo buke vozila i -te kategorije, [dB(A)],

Q_i – protok vozila i -te kategorije, [vozila/h],

α – ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi saobraćajnica, [°],

d – najkraće rastojanje između prijemne tačke i linijskog izvora, [m],

d_0 – referentno rastojanje od 1 m.

Referentni nivoi buke vozila i -te kategorije predstavlja funkciju brzine kretanja vozila, v_i [km/h], i tipa kolovoznog zastora, a dobije se prema formuli:

$$L_{Aeq,i} = L_{Aeq,i}(50 \text{ km/h}) + C \cdot \log \left(\frac{v_i}{50 \text{ km/h}} \right) \text{ [dBA]}, \quad (2.39)$$

pri čemu su vrednosti $L_{Aeq,i}(50 \text{ km/h})$ nivoa i koeficijenta C date u tabelama 2.4 i 2.5, respektivno.

2.8 Poređenje modela

U okviru ove oblasti izvršena je uporedna analiza rezultata proračuna nivoa buke drumskog saobraćaja dobijenih primenom učestalo korišćenih modela za predviđanje saobraćajne buke. Radi detaljnijeg poređenja modela menjana je

Tabela 2.4: Referentni nivoi buke pri brzini 50 km/h $L_{Aeq,i}(50 \text{ km/h})$ [29]

Kategorija vozila	Putni zastor		
	granit	asfalt	beton
laka vozila	52	47	48
srednje teška vozila	60	54	55
srednje teška vozila sa smanjenom emisijom buke	60	52	53
teška vozila	62	59	60
teška vozila sa smanjenom emisijom buke	62	56	57

Tabela 2.5: Vrednosti koeficijenta C [29]

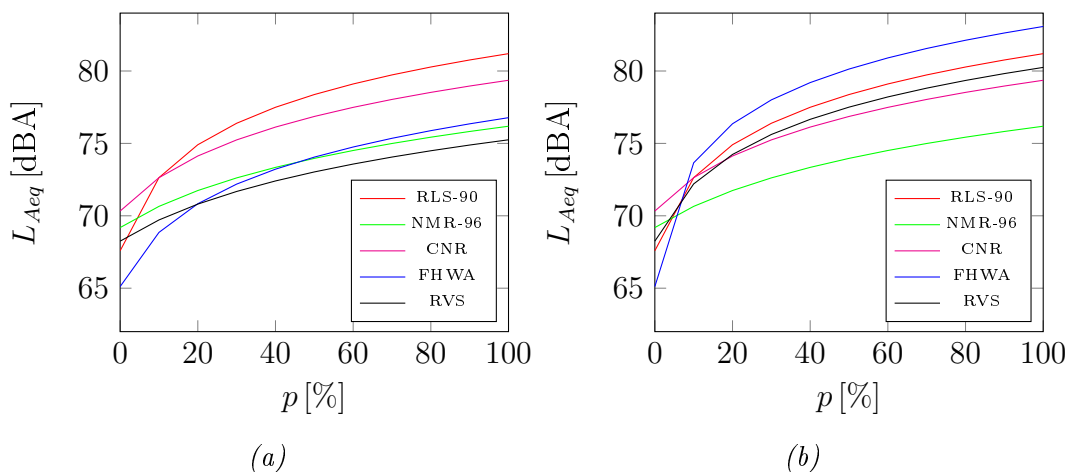
Kategorija vozila	Putni zastor		
	granit	asfalt	beton
laka vozila	0	26,2	30,5
srednje teška vozila	0	15	18
srednje teška vozila sa smanjenom emisijom buke	0	24,8	27,8
teška vozila	0	15	18
teška vozila sa smanjenom emisijom buke	0	24.8	27.8

kompozicija saobraćaja i analizirani su rezultati dobijeni pri različitim udelima lakih motornih vozila, srednje teških i teških teretnih vozila u saobraćajnom toku.

Neka se motorna vozila kreću konstantnom brzinom od 50 km/h duž saobraćajnice koja se može smatrati pravom, beskonačno dugačkom i bez nagiba. Saobraćajnica je presvučena asfaltnim zastorom, a sama kolovozna površina je glatka, bez rupa i ležećih policajaca. Teren u neposrednom okruženju saobraćajnice i mesta prijema je ravan i tvrd, bez vertikalnih prepreka prostiranju zvuka. Ukupni protok motornih vozila iznosi 1000 vozila/h. U zavisnosti od udela teških vozila u saobraćajnom toku, $p[\%]$, vrednost ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke na 7,5m rastojanja od ose saobraćajnice, $Leq[\text{dBA}]$, procenjena je primenom sledećih modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja: RLS-90, CNR, NMR-96, FHWA i RVS 3.02. Kako FHWA i RVS modeli uvode detaljniju kategorizaciju motornih vozila, prema kojoj su teška motorna vozila podeljena u dve kategorije (srednje teška i teška teretna vozila), na slici 2.4a prikazani su proračunati nivoi buke za slučaj da u saobraćaju ne učestvuju teška teretna vozila, dok je grafički prikaz procenjenih nivoa buke drumskog saobraćaja u kom, pored lakih motornih vozila, učestvuju isključivo teška teretna vozila, dat na

slici 2.4b. U tabeli 2.6 prikazane su vrednosti ekvivalentnih nivoa buke dobijene primenom navedenih modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja za slučaj da saobraćajni tok sačinjavaju vozila jedne (od četiri pomenute) kategorije.

Značajne razlike u proceni nivoa buke drumskog saobraćaja jesu posledica različitih vrednosti referentnih nivoa buke koje korišćeni modeli definišu za svaku od kategorija motornih vozila, ali i različite kategorizacije vozila. Prema CNR modelu, nivo buke koju generiše lako motorno vozilo je za 5,2 dB viši od nivoa definisanog FHWA modelom (pri brzini kretanja od 50 km/h). Ako u saobraćajnom toku učestvuju isključivo teška teretna vozila razlika između procenjenih nivoa buke može iznositi i 6,9 dB. Kao što je već napomenuto, svaki od modela je formiran na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja nivoa buke drumskog saobraćaja, pa je shodno tome prilagođen karakteristikama saobraćajnice (putnog zastora) i saobraćajnog toka sredine za koju je i razvijan, ali i veštini i navikama vozača. Usled toga prosečni nivoi buke pojedinih kategorija vozila zavise i od karakteristika voznog parka, odnosno prosečnog godišta motornih vozila, snage motora, vrste goriva, održavanja vozila, itd. Zbog navedenih razloga postojeće modele treba veoma obazrivo primenjivati, a ukoliko u određenoj urbanoj sredini procenjeni nivoi buke značajno odstupaju od izmerenih vrednosti, potrebno je razviti novi matematički model za predviđanje nivoa buke drumskog saobraćaja koji će omogućiti tačnija predviđanja, a samim tim i preduzimanje odgovarajućih mera za umanjenje nivoa saobraćajne buke (ukoliko se za to uoči potreba).



Slika 2.4: Zavisnost nivoa buke od procenta teških vozila

Tabela 2.6: Proračunati nivoi buke [dBA]

Model	laka vozila	teška vozila	srednje teška vozila	teška teretna vozila
RLS-90	67,6	81,2	81,2	81,2
NMR-96	69,2	76,2	76,2	76,2
CNR	70,3	79,4	79,4	79,4
FHWA	65,1	76,8 - 83,1	76,8	83,1
RVS	68,2	75,2 - 80,2	75,2	80,2

3 Soft computing tehnike

Od sredine dvadesetog veka brojna istraživanja u oblasti računarstva su usmerena na razvoj sistema koji bi se mogli okarakterisati kao inteligentni. Iz želja da se razume i simulira rad ljudskog mozga, pa samim tim i procesi učenja, pamćenja i donošenja inteligentnih odluka, proistekla je potreba za razvojem takozvanih *soft computing* tehnika koje su za razliku od konvencionalnih računarskih metoda tolerantne na nepreciznosti, nesigurnosti i delimične istine. *Soft computing* tehnike su namenjene rešavanju problema koji nemaju egzaktno i jedinstveno rešenje. Efikasno se mogu primeniti i u pronalaženju približnih rešenja za probleme koji zahtevaju velike računarske resurse, a da pri tom ne postoje algoritmi koji mogu izračunati tačno rešenje u razumnom vremenskom roku, a primenu nalaze i u pronalaženju približnih rešenja za nepotpuno definisane probleme. Ovim terminom su obuhvaćene sledeće metodologije:

- fazi logika,
- veštačke neuralne mreže (*Artificial Neural Networks*, ANN),
- evolucionini algoritmi,
- inteligencija roja (*Swarm Intelligence*, SI).

Pojam fazi skupova je definisao Lotfi Zadeh u radu [30] objavljenom 1965. godine. Fazi logika je prvi put eksperimentalno primenjena 1974. godine u upravljanju parnom mašinom, dok su prvi slučajevi komercijalne primene zabeleženi 1980. godine. Od tada primenu nalazu u brojnim naučnim, kao i komercijalnim aplikacijama, industrijskim sistemima, informacionim tehnologijama, itd. Za razliku od klasične teorije skupova, prema kojoj se za neki element nedvosmisleno može reći da li pripada ili ne pripada određenom skupu, stepen pripadnosti fazi

skupu se može izraziti brojčanom vrednošću iz intervala $[0,1]$. Primenom fazi logike prevazilaze se ograničenja klasične logike i omogućava definisanje, kao i rad sa nepreciznim i nepotpunim informacijama [31].

Višedecenijska čovekova želja da kreira kompleksan i inteligentan veštački sistem koji bi bio podređen ljudskim potrebama, a istovremeno simulirao rad ljudskog mozga, predstavlja povod za razvoj veštačkih neuralnih mreža [32]. Zahvaljujući razvoju računarskih sistema, kojim je omogućeno skladištenje, kao i matematička obrada velike količine podataka, danas je moguće modelovati rad biološkog nervnog sistema pomoću ANN mreža. Poput nervnog sistema bioloških bića, veštačke neuralne mreže poseduju sposobnost učenja na osnovu primera, mogućnost aproksimacije kompleksnih funkcionalnih veze između podataka (čak i kada su date veze čoveku nepoznate ili teško opisive), kao i sposobnost donošenja inteligentnih odluka [33]. Zbog svega navedenog, danas veštačke neuralne mreže imaju značanu primenu u rešavanju problema optimizacije, prepoznavanju slike i glasa, upravljanju sistemima, i brojnim drugim oblastima.

Evolucionni algoritmi i algoritmi zasnovani na inteligenciji roja pripadaju grupi metaheurističkih optimizacionih metoda koje oponašaju prirodne procese i/ili sisteme prilikom pretraživanja prostora potencijalnih rešenja. Metaheurističke metode su primenjive na široki spektar problema, pri čemu se pokazuju efikasnim u rešavanju NP-teških³ problema, to jest problema za koje ne postoje egzaktni algoritmi polinomijalne složenosti. Primena metaheuristike omogućava pronalaženje zadovoljavajućih rešenja u relativno kratkom vremenskom roku, ali ne garantuje nalaženje globalnog optimuma.

Evolucionni algoritmi, kao stohastičke metode optimizacije koje simuliraju proces biološke evolucije (pa samim tim i procese mutacije, selekcije i ukrštanja jedinki), bili su među prvim metaheuristikama koje efikasno pronalaze globalni optimum u velikom prostoru pretrage. Genetski algoritam (*Genetic Algorithm*, GA) je najpoznatiji predstavnik evolucionih algoritama za čiji je nastanak zaslužan Džon Holand koji je u svom radu "Adaptacija u prirodnim i veštačkim sistemima" iz 1975. godine [34] postavio teorijske osnove za razvoj genetskih algoritama. Familijom evolucionih algoritama je obuhvaćena i diferencijalna evolucija (*Differential Evolution*, DE) [35] zbog određene sličnosti sa genetskim algoritmom, iako nije inspirisana bilo kakvim biološkim ponašanjem.

SI algoritmi pripadaju stohastičkim optimizacionim metodama koje simuliraju kolektivno ponašanje životinjskih grupa čije jedinke međusobno komuniciraju, dele informacije i na taj način stiču i razmenjuju potrebna znanja.

³nedeterministički u polinomijalnom vremenu teški

Najpoznatiji predstavnici SI algoritama su:

- optimizacija mravljim kolonijama (*Ant Colony Optimization*, ACO),
- algoritam kukavičje pretrage (*Cuckoo Search*, CS),
- optimizacija rojevima čestica (*Particle Swarm Optimization*, PSO),
- algoritam slepog miša (*Bat Algorithm*, BA).

ACO algoritam je inspirisan kretanjem mrava u potrazi za hranom [36], PSO optimizacija kao inspiraciju koristi ponašanje jata ptica ili riba [37], pri definisanju CS algoritam iskorišćeno je ponašanje kukavice prilikom potrage za pogodnim gnezdom u koje će položiti jaje [38], dok je BA algoritam inspirisan sonarom kojim se slepi miš služi kako bi, tokom letenja, locirao prepreke i plen [39].

Kako je u okviru doktorske disertacije analizirana mogućnost primene PSO optimizacije, GA algoritma i *feedforward* neuralne mreže (sa propagacijom greške unazad) u predviđanju buke drumskog saobraćaja, detaljniji opis datih *soft computing* tehnika je izložen u nastavku teksta.

3.1 Genetski algoritam

Genetski algoritam predstavlja metaheurističku tehniku optimizacije koja oponašajući proces prirodne evolucije pronalazi tačno ili aproksimativno rešenje zadatog problema. Inspirisan Darwinovom teorijom o postanku vrsta [40], sedamdesetih godina dvadesetog veka Džon Holand u radu [34] formuliše osnovne principe genetskih algoritama. Holandov model se često naziva prostim ili kaničkim genetskim algoritmom. Tokom narednih decenija usledila su brojna istraživanja, koja su najpre bila teorijski orijentisana, dok se krajem osamdesetih godina dvadesetog veka beleži i prva praktična primena genetskih algoritama. U literaturi je dostupan veliki broj radova [41–54] u kojima su predstavljene doprinosi brojnih naučnika i inženjera povećanju efikasnosti, kao i prilagođavanju genetskog algoritma rešavanju različitih problema iz inženjerske prakse.

Genetski algoritmi se često primenjuju u rešavanju optimizacionih problema, pri čemu su sposobni za pronalaženje globalnog optimuma i u prostoru sa više lokalnih ekstrema. Pri tom, funkcija čiji je optimum potrebno utvrditi ne mora biti neprekidna i diferencijabilna. Međutim, kako se u slučaju primene genetskih algoritama ne može sa sigurnošću znati da li pronađeno rešenje predstavlja lokalni ili globalni optimum, kao ni da li je isti određen sa željenom tačnošću,

potrebno je više puta ponoviti proces optimizacije u cilju povećanja pouzdanosti rešenja. Takođe, zbog izvršavanja velikog broja računskih operacija, genetski algoritam je spor, a karakteriše ga i spora konvergencija ka pronađenom rešenju.

3.1.1 Opis algoritma

U potrazi za rešenjem optimizacionog problema kreira se populacija jedinki, tako da svaka jedinka predstavlja kandidata za rešenje zadatog problema. Kodiranjem jedinki formiraju se hromozomi. Svaki hromozom se sastoji iz više gena koji predstavljaju kodirane varijable definisanog problema. Mera kvaliteta (*fitness*) jedinke se određuje primenom funkcije prilagođenosti koja na adekvatan način treba da predstavi problem koji je potrebno rešiti primenom genetskog algoritma. Kroz više iteracija algoritma, simuliranjem procesa prirodne selekcije, mutacije i ukrštanja (reprodukcije), formiraju se nove generacije hromozoma. Mehanizmom selekcije loši hromozomi se odbacuju, dok kvalitetnije jedinke dobijaju veću šansu za opstanak i ukrštanje pri formiranju nove generacije. Ukrštanjem hromozoma kreiraju se nove jedinke rekombinacijom gena roditeljskih hromozoma. Proces mutacije podrazumeva slučajnu promena gena, čime se u populaciju unosi novi genetski materijal. Mutacija predstavlja osnovni mehanizma za sprečavanje preuranjene kovergencije genetskog algoritma ka lokalnom optimumu. Opisani postupak se ponavlja do ispunjenja kriterijuma za zastavljanje procesa optimizacije, a najkvalitetnija jedinka poslednje generacije predstavlja aproksimativno rešenje zadatog problema.

3.1.1.1 Kodiranje

Neka je $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ funkcija n promenljivih čiji je globalni ekstrem potrebno utvrditi primenom genetskog algoritma. Postupkom inicijalizacije generiše se populacija od n_{pop} jedinki $\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})$, $i \in \{1, \dots, n_{pop}\}$. Jedinke se obično generišu slučajnim odabirom vrednosti promenljivih $x_j^{(i)}$, $j \in \{1, \dots, n\}$. Potom se primenjuje binarno kodiranje kako bi se svaka promenljiva predstavila odgovarajućim nizom binarnih cifara $\mathbf{b}_j^{(i)} = [b_{j,m}^{(i)} \ b_{j,m-1}^{(i)} \ \dots \ b_{j,1}^{(i)}]$ (pri čemu je sa m označena dužina binarnog niza). Iako se binarno kodiranje jednostavno implementira, Hemingovo rastojanje između binarnih reprezentacija dva uzastopna broja često je veće od jedan, a u najgorem slučaju je jednako dužini binarnog niza. Velike vrednosti Hemingovog rastojanja mogu prouzrokovati slabu konvergenciju, što može rezultovati nenalaženjem globalnog ekstrema. Da bi se prevazišao izloženi nedostatak binarnog GA (tj. genetskog algoritma sa binarnim kodiranjem) često se primenjuje Grejev kod čime se obezbeđuje da se kodne reči uzastopnih cifara razlikuju u samo jednom bitu. Umesto binar-

nog kodiranja, u zavisnosti od toga da li se genima hromozoma predstavljaju diskretne ili neprekidne varijable, moguće je koristiti celobrojnu ili realnu reprezentaciju promenljivih. Lorens Dejvis u svojoj knjizi [45] zaključuje da realna reprezentacija poseduje niz prednosti u odnosu na binarno kodiranje, uključujući i lakše definisanje operatora ukrštanja i mutacije hromozoma u skladu sa prirodom definisanog problema. Uporedna analiza performansi binarnog GA i takozvanog RCGA (*Real Coded Genetic Algorithm*) algoritma, to jest genetskog algoritma sa realnom reprezentacijom promenljivih, izložena je u radu [55].

3.1.1.2 Procena kvaliteta jedinke

Primenom funkcije prilagođenosti procenjuje se kvalitet potencijalnog rešenja optimizacionog problema, odnosno proračunava se prilagođenost jedinke. Što je veća prilagođenost jedinke, veća je i njena verovatnoća preživljavanja i ukrštanja tokom procesa formiranja nove generacije. Dobri rezultati optimizacije postižu se kada je funkcija prilagođenosti glatka i neprekidna, tako da jedinkama sa sličnim genetskim kodom odgovaraju i slične vrednosti prilagođenosti, kao i kada funkcija prilagođenosti nema mnogo lokalnih ekstrema ili veoma izolovan globalni ekstrem. Međutim, zadovoljavajući rezultati optimizacije postižu se i pri korišćenju proizvoljnih funkcija prilagođenosti koje, pri tom, nisu neprekidne i diferencijabilne. U najjednostavnijoj interpretaciji, funkcija prilagođenosti je ekvivalentna funkciji čiji je globalni optimum potrebno utvrditi:

$$f_{kvalitet}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}). \quad (3.1)$$

Tako definisanu funkciju prilagođenosti je moguće primeniti samo u slučaju rešavanja problema maksimizacije. Međutim, ako je cilj primene genetskog algoritma minimiziranje funkcije f , funkciju prilagođenosti je moguće definisati primenom jednačine:

$$f_{kvalitet}(\mathbf{x}) = M - f(\mathbf{x}), \quad (3.2)$$

pri čemu je vrednost M potrebno odrediti tako da funkcija $f_{kvalitet}(\mathbf{x})$ bude nenegativna, jer je za realizaciju procesa selekcije neophodno da sve jedinke imaju nenegativnu prilagođenost.

Često se primenjuju i različite metode skaliranja kako bi se izbegao gubitak genetskog materijala i preuranjena konvergencija ka lokalnom ekstremu. U slučaju primene metode linearnog skaliranja funkcija prilagođenosti ima oblik:

$$f_{kvalitet}(\mathbf{x}) = a \cdot f(\mathbf{x}) + b. \quad (3.3)$$

Koeficijenti a i b ne moraju biti konstantni, već se mogu menjati tokom generacija tako da funkcija prilagođenosti uvek bude nenegativna.

Kada se primenjuje metod skaliranja u jedinični interval, prilagođenost najkvalitetnije jedinke iznosi 1, dok je prilagođenost najlošije jedinke 0. U slučaju rešavanja problema maksimizacije, prilagođenost jedinke se proračunava primenom jednačine:

$$f_{kvalitet}(\mathbf{x}) = \frac{f(\mathbf{x}) - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}, \quad (3.4)$$

dok se za probleme minimizacije koristi izraz:

$$f_{kvalitet}(\mathbf{x}) = \frac{f_{max} - f(\mathbf{x})}{f_{max} - f_{min}}. \quad (3.5)$$

U navedenim izrazima f_{max} i f_{min} predstavljaju maksimalnu i minimalnu vrednost funkcije f za tekiću generaciju jedinki, redom.

3.1.1.3 Selekcija roditeljskih jedinki

Svrha selekcije jeste očuvanje kvalitetnog genetskog materijala i njegovo prenošenje na narednu generaciju jedinki. Postupkom selekcije biraju se jedinke koje će učestvovati u procesu reprodukcije prilikom formiranja nove generacije. Kako bi se sprečila preuranjena konvergencija genetskog algoritma, umesto odbacivanja, slabije prilagođenim jedinkama dodeljuje se mala verovatnoća preživljavanja, čime se doprinosi raznovrsnosti genetskog materijala.

Kanonički genetski algoritam podrazumeva primenu rulet selekcije (*roulette wheel selection*) koja simulira okretanje točka ruleta pri odabiru roditeljskog hromozoma. Svakom hromozomu se dodeljuje površina na točku koja je proporcionalna njegovoj prilagođenosti, pa samim tim verovatnoća selekcije i -tog hromozoma iznosi:

$$p_i = \frac{f_{kvalitet}(\mathbf{x}^{(i)})}{\sum_{j=1}^{n_{pop}} f_{kvalitet}(\mathbf{x}^{(j)})}. \quad (3.6)$$

Preuranjena konvergencija predstavlja glavni nedostatak rulet selekcije. Naime, značajne razlike u kvalitetu hromozoma mogu prouzrokovati odbacivanje jedinki sa relativno malom vrednošću funkcije prilagođenosti, kao i učestalu selekciju jedne ili nekoliko najkvalitetnijih jedinki, što za posledicu ima gubitak genetskog materijala i konvergenciju ka lokalnom ekstremu.

Problem preuranjene konvergencije može se prevazići primenom selekcije zasnovane na rangu (*rank based selection*). Ovom metodom selekcije jedinke se najpre sortiraju na osnovu vrednosti funkcije prilagođenosti, a potom se

određuje verovatnoća odabira jedinke na osnovu njenog ranga, to jest pozicije u sortiranom nizu. U slučaju linearnog rangiranja, verovatnoća selekcije jedinke sa rangom k izračunava se prema formuli:

$$p_k = \alpha + \beta k, \quad \sum_{j=1}^{n_{pop}} (\alpha + \beta j) = 1. \quad (3.7)$$

U slučaju turnirske selekcije na slučajan način bira se N_{tur} jedinki iz tekuće generacije, a, nakon njihovog međusobnog upoređivanja, odabira se jedinka sa najvećom vrednošću funkcije prilagođenosti. Broj učesnika turnira N_{tur} utiče na brzinu konvergencije algoritma, ali i na sposobnost pronalaženja globalnog ekstrema. Često se događa da pri određenoj vrednosti parametra N_{tur} konvergencija bude veoma spora, a da povećanje broja učesnika turnira za jedan rezultuje preuranjenom konvergencijom ka lokalnom ekstremu. Radi prevazilaženja navedenog problema, fino gradirana turnirska selekcija [52] uvodi racionalan parametar \tilde{N}_{tur} koji predstavlja željenu srednju vrednost broja učesnika u turnirima koji se realizuju tokom procesa selekcije jedinki. Ako je celobrojni deo vrednosti \tilde{N}_{tur} jednak k , broj učesnika turnira može iznositi k ili $k + 1$, pri čemu prosečan broj učesnika tokom svih turnira koji se sprovode u cilju kreiranja naredne generacije jedinki treba da bude što bliži vrednosti \tilde{N}_{tur} .

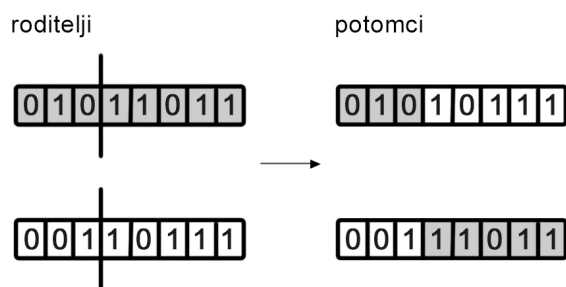
3.1.1.4 Ukrštanje hromozoma

Ukrštanje predstavlja proces razmene genetskog materijala dve ili više roditeljskih jedinki. Kao rezultat ukrštanja nastaje jedan ili dva nova hromozoma koji se nazivaju potomci. Izbor metode ukrštanja zavisi od načina kodiranja jedinki, kao i prirode problema.

U slučaju binarnog kodiranja primenjuje se jednopoziciono, višepoziciono ili uniformno ukrštanje hromozoma.

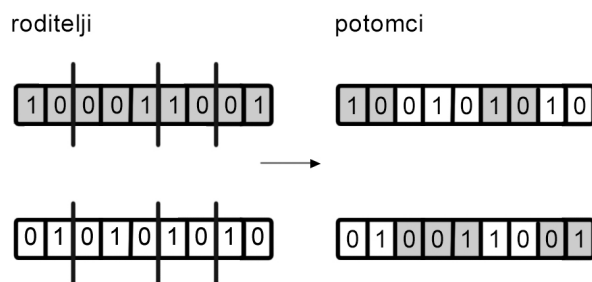
Jednopoziciono ukrštanje predstavlja najjednostavniji metod ukrštanja dve roditeljske jedinke. Ako je l dužina genetskog (binarnog) koda jedinke, na slučajan način bira se ceo broj k iz intervala $[2, l]$, kako bi se razmenom bita roditeljskih jedinki počevši od k -te pozicije njihovih genetskih kodova formirala dva nova potomka (slika 3.1). Ovaj metod ukrštanja se primenjuje u slučajevima velike međuzavisnosti gena u genetskom kodu jedinke.

Višepozicionim ukrštanjem se na slučajan način bira k međusobno različitih celih brojeva iz intervala $[2, l]$, kako bi se genetski kod roditeljske jedinke podelio na $k + 1$ gradivnih blokova (u pozicijama koje su definisane slučajno odabranim brojevima). Kao rezultat razmene nesusednih blokova između odabranih



Slika 3.1: Primer jednopozicionog ukrštanja

roditeljskih hromozoma formiraju se dva nova potomka. Na slici 3.2 je prikazan primer višepozicionog ukrštanja za slučaj da je $k = 3$. Višepozicionim ukrštanjem se obezbeđuje raznovrsniji genetski materijal, pa samim tim i detaljnije istraživanje prostora pretrage, čime se smanjuje verovatnoća za preuranjenu konvergenciju i shodno tome povećava robusnost algoritma.



Slika 3.2: Primer višepozicionog ukrštanja

Kod uniformnog ukrštanja za svaki par roditelja generiše se maska ukrštanja. Maska je slučajno generisani binarni niz čija je dužina jednaka dužini genetskog koda jedinke. Dva nova potomka se formiraju tako što roditelji zadržavaju svoj genetski materijal na pozicijama na kojima je vrednost bita maske 1, dok na preostalim pozicijama razmenjuju bite svojih genetskih kodova (slika 3.3). Ako je verovatnoća nasleđivanja različita za pojedine gene hromozoma, za svaki bit maske zasebno se definiše verovatnoća generisanja jedinice. Uniformno ukrštanje je pogodno primeniti kada su geni međusobno nezavisni ili je njihova međuzavisnost mala. Poput višepozicionog ukrštanja, primena uniformnog ukrštanja povećava robusnost genetskog algoritma.

Roditelji:	10110101
	01101001
Maska:	00110101
Deca:	<u>01111101</u>
	101 <u>00001</u>

Slika 3.3: Primer uniformnog ukrštanja

RCGA algoritam – ukrštanje: Neka su roditeljski hromozomi označeni sa $\mathbf{p}^{(1)} = (p_1^{(1)}, p_2^{(1)}, \dots, p_n^{(1)})$ i $\mathbf{p}^{(2)} = (p_1^{(2)}, p_2^{(2)}, \dots, p_n^{(2)})$, dok je $\mathbf{c}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_n^{(k)})$ njihov k -ti potomak koji se generiše ukrštanjem genetskih kodova roditeljskih jedinki.

Prostim ukrštanjem [56], kao i jednopozicionim ukrštanjem prilikom korišćenja binarnog kodiranja, nakon slučajno odabrane pozicije $i \in \{2, \dots, n\}$, formiraju se dva nova hromozoma primenom sledećih jednačine:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^{(1)} &= (p_1^{(1)}, \dots, p_{i-1}^{(1)}, p_i^{(2)}, \dots, p_n^{(2)}) \\ \mathbf{c}^{(2)} &= (p_1^{(2)}, \dots, p_{i-1}^{(2)}, p_i^{(1)}, \dots, p_n^{(1)}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Primenom postupka diskretnog ukrštanja [57] generiše se jedan potomak $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)$ slučajnim nasleđivanjem gena roditeljskih hromozoma. Dakle, vrednost realnog broja c_i se na slučajan način bira iz skupa $\{p_i^{(1)}, p_i^{(2)}\}$.

Prilikom primene takozvanog *flat* ukrštanja roditeljskih hromozoma [58], vrednosti gena potomka c_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, je potrebno na slučajan način odabrati iz intervala $[p_i^{(1)}, p_i^{(2)}]$.

U slučaju primene linearnog ukrštanja [56], najpre se formiraju tri hromozoma $\mathbf{c}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_n^{(k)})$, $k \in \{1, 2, 3\}$, primenom sledećih izraza:

$$\begin{aligned} c_i^{(1)} &= \frac{1}{2}p_i^{(1)} + \frac{1}{2}p_i^{(2)} \\ c_i^{(2)} &= \frac{3}{2}p_i^{(1)} - \frac{1}{2}p_i^{(2)} \\ c_i^{(3)} &= -\frac{1}{2}p_i^{(1)} + \frac{3}{2}p_i^{(2)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

kako bi se, potom, od novoformiranih hromozoma za potomke odabrala dva

bolje prilagođena.

Procesom aritmetičkog ukrštanja [50] generišu se dva nova hromozoma $\mathbf{c}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_n^{(k)})$, $k \in \{1, 2\}$, primenom jednačine:

$$\begin{aligned}c_i^{(1)} &= \lambda p_i^{(1)} + (1 - \lambda) p_i^{(2)} \\c_i^{(2)} &= (1 - \lambda) p_i^{(1)} + \lambda p_i^{(2)}\end{aligned}\tag{3.10}$$

Pri tom je u slučaju uniformnog aritmetičkog ukrštanja vrednost parametra λ konstantna, dok se pri primeni neuniformnog aritmetičkog ukrštanja vrednost datog parametra menja zajedno sa smenom generacija. Promenljivi parametar λ može predstavljati funkciju rednog broja iteracije ili slučajnu promenljivu sa uniformnom raspodelom na intervalu $[0, 1]$.

Primenom BLX- α (*blend crossover*) ukrštanja [59] formira se jedan potomak odobranih roditeljskih jedinki tako što se vrednosti gena potomka c_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, na slučajan način biraju iz intervala $[p_{min} - I\alpha, p_{max} + I\alpha]$, gde je:

$$\begin{aligned}p_{max} &= \max(p_i^{(1)}, p_i^{(2)}) \\p_{min} &= \min(p_i^{(1)}, p_i^{(2)}) \\I &= p_{max} - p_{min}\end{aligned}\tag{3.11}$$

Ukoliko se za vrednost faktora skaliranja α odabere nula, BLX- α ukrštanje postaje *flat* ukrštanje.

Proces kreiranja potomka primenom intermedijarnog ukrštanja [57] može se predstaviti izrazom:

$$c_i = p_i^{(1)} + \alpha(p_i^{(2)} - p_i^{(1)})\tag{3.12}$$

pri čemu faktor skaliranja α predstavlja slučajnu promenljivu sa uniformnom raspodelom na intervalu $[-0,25, 1,25]$. Za svaki par roditeljskih hromozoma bira se nova vrednost parametra α .

3.1.1.5 Mutacija gena

Procesom mutacije izvršava se slučajna promena gena, čime se generišu novi ili vraća izgubljeni genetski materijal u populaciju kako bi se sprečila preuranjena konvergencija algoritma ka lokalnom ekstremu. Verovatnoća mutacije p_m zadaje se na početku izvršavanja genetskog algoritma. Ukoliko verovatnoća mutacije teži jedinici, algoritam obavlja slučajnu pretragu prostora, a ako teži nuli, može se očekivati zaustavljanje algoritma nakon pronalazka prvog lokalnog ek-

strema.

U slučaju binarnog kodiranja najčešće se primenjuje prosta mutacija, kao i mutacija pomoću binomne raspodele. Prosta mutacija bita se izvršava sa malom verovatnoćom p_m , tako što se slučajno odabrani biti hromozoma invertuju. U slučaju mutacije bazirane na binomnoj raspodeli na slučajan način se bira vrednost broja q iz intervala $[0, 1]$, a zatim se određuje celobrojna vrednost n_m tako da važi:

$$F(n_m) \leq q < F(n_m + 1), \quad (3.13)$$

pri čemu je sa F označena funkcija binomne raspodele, dok n_m predstavlja ukupan broj bita koje je potrebno invertovati. Pri tom se mutacija izvršava nad slučajno izabranim bitovima hromozoma.

Ako se geni hromozoma predstavljaju realnim brojevima, sa unapred zadatom malom verovatnoćom p_m izvršava se promena vrednosti pojedinih gena. Uniformna i neuniformna mutacija predstavljaju najčešće korišćene metode mutacije pri implementaciji RCGA algoritama.

Neka je sa $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n)$ označen hromozom čiji je gen c_i ($c_i \in [l_i, u_i]$) potrebno mutirati. Primenom uniformne mutacije vrednost gena c_i se zamenjuje slučajno odabranim realnim brojem iz intervala $[l_i, u_i]$.

Neuniformna mutacija gena c_i izvršava se primenom sledeće jednačine:

$$c'_i = \begin{cases} c_i + a(k, u_i - c_i), & \text{ako je } \tau = 0 \\ c_i - a(k, c_i - l_i), & \text{ako je } \tau = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

pri čemu je τ binarna cifra čija je vrednost na slučajan način izabrana, dok je funkcija a definisana izrazom:

$$a(k, y) = y \left(1 - \alpha^{(1-k/T)^b} \right). \quad (3.15)$$

Parametar α predstavlja slučajnu promenljivu sa uniformnom raspodelom na intervalu $[0, 1]$, k je redni broj tekuće iteracije (generacije), dok je T maksimalan broj iteracija. Primenom funkcije $a(k, y)$ dobijaju se vrednosti koje su u opsegu $[0, y]$, pri čemu se verovatnoća za dobijanje vrednosti bliske nuli povećava sa povećanjem vrednosti k , tako da se primenom neuniformne mutacije u prvim iteracijama algoritma podstiče globalno pretraživanje prostora, a u završnim iteracijama lokalna pretraga [50].

3.1.1.6 Zamena generacija

Primenom generacijskog genetskog algoritma cela populacija se zamenjuje novim jedinkama (potomcima prethodne generacije). Iako je velika verovatnoća da će kvalitetan genetski materijal biti sačuvan i prenet u narednu generaciju, pojedini potomci su lošiji od roditelja, a dešava se i da se zbog procesa selekcije, ukrštanja i mutacije izgubi najbolja jedinka, pa samim tim i najkvalitetnije rešenje.

U slučaju primene stacionarnog genetskog algoritma, nakon što se procesom selekcije odaberu roditeljski hromozomi, njihovim ukrštanjem se formiraju nove jedinke kojima se zamenjuju starije ili slabije prilagođene jedinke populacije.

Kako bi se najbolje jedinke u populaciji zaštitile od eliminacije ili izmene tokom procesa mutacije ili ukrštanja, primenjuje se elitistička strategija kojom se jedna ili više najkvalitetnijih jedinki direktno prenose u narednu generaciju bez prethodne primene procesa ukrštanja i mutacije.

3.2 PSO optimizacija

Algoritam optimizacije rojem čestica je stohastička optimizaciona tehnika inspirisana ponašanjem životinja koje se, prilikom potrage za hranom, kreću u velikim grupama. PSO tehniku su osmislili R. Eberhart i J. Kenedi 1995. godine [37], a od tada je predmet brojnih iztraživanja sprovedenih u cilju poboljšanja efikasnosti rada algoritma, odnosno sposobnosti pronalaženja optimalnog rešenja, kao i brzine konvergencije ka optimumu. Za razliku od gradijentnih metoda, primena PSO tehnike ne podrazumeva određivanje izvoda funkcije, pa je stoga karakteriše jednostavna implementacija i brza konvergencija. Primenu nalazi u rešavanju nelinearnih problema optimizacije [60], obuci veštačkih neuralnih mreža [61], višekriterijumskoj optimizaciji [62], itd. Često se primenjuje u kombinaciji sa fazi logikom [63], ili drugim optimizacionim tehnikama [64] u cilju kreiranja hibridnog optimizacionog algoritma veće efikasnosti.

3.2.1 Opis PSO algoritma

Primenom PSO tehnike, u potrazi za rešenjem optimizacionog problema, takozvane čestice se kreću kroz višedimenzionalni prostor pretrage menjajući svoj položaj na osnovu vlastitog iskustva i iskustva čitave populacije (roja). Pri tom, položaj čestice predstavlja kandidata za rešenje optimizacionog problema, a kvalitet (*fitness*) pojedinih kandidata se procenjuje pomoću funkcije koja se optimizira. Broj dimenzija prostora pretrage je jednak broju promenlji-

vih čije je vrednosti potrebno utvrditi postupkom optimizacije, a definisanjem opsega vrednosti za pojedine promenljive, ograničava se i prostor koji čestice pretražuju.

Postupkom inicijalizacije roja, svaka čestica se smešta na slučajno odabranu poziciju i dodeljuje joj se slučajno odabrana brzina. U slučaju n -dimenzionalnog prostora, položaj i brzina i -te čestice su date vektorima $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ i $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, redom. Nakon svake promene položaja procenjuje se kvalitet nove pozicije kako bi se utvrdio najbolji položaj koji je i -ta čestica posetila, $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, kao i do tada najbolje postignuto rešenje čitavog roja, $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_n)$. Zatim se, primenom sledećih jednakosti, ažuriraju brzina i položaj i -te čestice:

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \omega \mathbf{v}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}^k - \mathbf{x}_i^k) \quad (3.16)$$

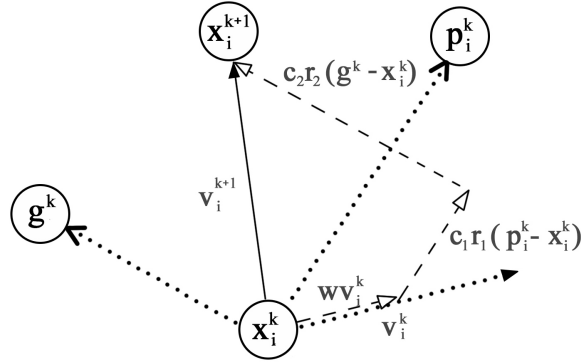
$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (3.17)$$

Pri tom je sa ω označen koeficijent inercije, k je redni broj iteracije, dok c_1 i c_2 predstavljaju koeficijente kognitivnog i socijalnog učenja, redom. Slučajne promenljive r_1 i r_2 imaju uniformnu raspodelu na intervalu $[0,1]$ i generišu se pri svakom ažuriranju brzina. Drugim članom jednačine 3.16 utiče se na vraćanje čestice na oblast prostora u kojoj je postigla najbolje rešenje, dok se trećim članom date jednačine omogućava primicanje čestice najboljoj poziciji koju je roj do tada pronašao. Odabirom vrednosti težinskih faktora c_1 i c_2 utiče se na veličinu koraka kojom se čestica približava svojoj najboljoj poziciji, odnosno najboljem kandidatu za rešenje celog roja, redom. Zbog slučajnih promenljivih r_1 i r_2 , drugi i treći član jednačine imaju stohastički uticaj na promenu brzine čestice.

Na slici 3.4 je prikazana promena položaja i -te čestice roja u dvodimenzionalnom prostoru pretrage.

Algoritam optimizacije rojem čestica (koji se primenjuje u cilju rešavanja problema minimizacije) realizuje se kroz sledeće korake:

1. Definisanje funkcije cilja f
2. Odabir broja čestica S
3. Definisanje granica prostora pretrage $[\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}]$
4. Definisanje graničnih vrednosti brzine $[\mathbf{v}_{\min}, \mathbf{v}_{\max}]$



Slika 3.4: Kretanje čestice u okviru dvodimenzionalnog prostora mogućih rešenja [65]

5. Inicijalizacija roja slučajnim odabirom pozicija čestica u definisanom prostora pretrage: $x_{ij} = U(x_{\min j}, x_{\max j})$, $\forall j \in \{1, \dots, n\}$, $\forall i \in \{1, \dots, S\}$
6. Definisanje najbolje pozicije za svaku od čestica roja: $\mathbf{p}_i = \mathbf{x}_i$, $\forall i \in 1, \dots, S$
7. Inicijalizacija brzina čestica slučajnim odabirom vrednosti iz definisanog opsega $[\mathbf{v}_{\min}, \mathbf{v}_{\max}]$: $v_{ij} = U(v_{\min j}, v_{\max j})$, $\forall j \in \{1, \dots, n\}$, $\forall i \in \{1, \dots, S\}$
8. Procena kvaliteta kandidata za rešenje: $f(\mathbf{x}_i)$, i pronalaženje globalno najboljeg položaja \mathbf{g} kojem odgovara najmanja vrednost funkcije cilja
9. Ponavljanje sledećih koraka do ispunjenja kriterijuma za zaustavljanje postupka optimizacije:

(a) Za svaku česticu

i. Na slučajan način izabрати vrednosti r_1 i r_2 iz opsega $[0,1]$

ii. Ažurirati brzinu čestice primenom jednačine 3.16

$$\text{iii. } v_{ij} = \begin{cases} v_{\min j}, & \text{ako je } v_{ij} < v_{\min j} \\ v_{\max j}, & \text{ako je } v_{ij} > v_{\max j} \\ v_{ij}, & \text{inače} \end{cases}$$

iv. Ažurirati položaj čestice primenom jednačine 3.17

$$\text{v. } x_{ij} = \begin{cases} x_{\min j}, & \text{ako je } x_{ij} < x_{\min j} \\ x_{\max j}, & \text{ako je } x_{ij} > x_{\max j} \\ x_{ij}, & \text{inače} \end{cases}$$

- vi. Ako je $f(\mathbf{x}_i) < f(\mathbf{p}_i)$, trenutni položaj i -te čestice predstavlja najbolje rešenje koje je data čestica pronašla: $\mathbf{p}_i \leftarrow \mathbf{x}_i$
- vii. Ako je $f(\mathbf{x}_i) < f(\mathbf{g})$, trenutni položaj i -te čestice predstavlja globalno najbolje rešenje: $\mathbf{g} \leftarrow \mathbf{x}_i$

10. Najboljom pozicijom roja \mathbf{g} aproksimira se traženi minimum funkcije cilja

Uslov za zaustavljanja postupka optimizacije može biti pronalazak dovoljno dobrog rešenja ili dostizanje unapred definisanog maksimalnog broja iteracija.

3.2.2 Konfiguracijski parametri PSO algoritma

Na tačnost pronađenog rešenja i brzinu konvergencije algoritma optimizacije rojem čestica značajno utiču konfiguracijski parametri (ograničenje brzine, c_1 , c_2 i ω), kao i veličina populacije, odnosno broj čestica. Dobrim izborom parametara može se izbeći preuranjena konvergencija ka lokalnom optimumu i samim tim omogućiti pronalaženje globalnog optimuma, kao i brza konvergencija prema optimalnom rešenju.

Većom populacijom omogućava se bolja pokrivenost prostora pretrage, kao i veća raznovrsnost pravaca u kojima će se čestice kretati, što može rezultovati pronalaženjem boljih rešenja, ali i dužim vremenom izvršavanja algoritma. Obično se koristi 20 do 40 čestica, dok se za složenije probleme ponekad primenjuje populacija koja obuhvata od 100 do 200 jedinki.

Kako bi se osigurala konvergentnost algoritma neophodno je ograničiti brzinu kretanja čestica. U literaturi [66,67] su opisane sledeće metode za definisanje graničnih vrednosti brzine na osnovu granica prostora pretrage $[\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max}]$:

1. Ako je prostor centriran oko nule, odnosno ako je $\mathbf{x}_{\min} = -\mathbf{x}_{\max}$, brzinu je potrebno ograničiti na opseg $[-\mathbf{v}_{\max}, \mathbf{v}_{\max}]$, gde je $\mathbf{v}_{\max} = \delta \cdot \mathbf{x}_{\max}$;
2. Ukoliko prostor nije centriran oko nule, granične vrednosti brzine kretanja čestica se određuju primenom sledećih jednačina:

$$\mathbf{v}_{\max} = \delta \cdot (\mathbf{x}_{\max} - \mathbf{x}_{\min})/2, \quad \mathbf{v}_{\min} = -\mathbf{v}_{\max}. \quad (3.18)$$

Pri tom parametar δ može imati vrednosti iz opsega od 0,1 do 1. Pri vrednostima manjim od 0,1 čestice mogu ostati zarobljene u lokalnom ekstremu.

Koeficijenti učenja c_1 i c_2 određuju koliki uticaj vlastito iskustvo čestice i kolektivno iskustvo roja imaju na kretanje čestice, pa samim tim i brzinu kojom će se čestica kretati ka optimumu. Koeficijenti kognitivnog i socijalnog učenja obično imaju vrednost 2. U pojedinim publikacijama koriste se i druge vrednosti

iz opsega $[0, 4]$. Vrednosti koeficijenata c_1 i c_2 moguće je menjati tokom postupka optimizacije primenom sledećih jednačina [68]:

$$c_1 = 2,5 - k \cdot 2/K \quad (3.19a)$$

$$c_2 = 0,5 + k \cdot 2/K \quad (3.19b)$$

gde je k označen redni broj trekuće iteracije, dok je K ukupan broj iteracija. Opisanim postupkom u početnim iteracijama algoritma podstiče se globalno pretraživanje prostora, a u završnim iteracijama lokalna pretraga u cilju postizanja tačnijih rešenja.

Vrednost koeficijenta inercije obično se bira iz opsega $(0, 1)$. Veće vrednosti ovog koeficijenta pospešuju istraživanje prostora, a time i pronalaženje globalnog optimuma, dok se manjim vrednostima ubrzava konvergencija, ali i povećava verovatnoća za nalaženje lokalnog ekstrema. U dostupnoj literaturi definisane su brojne strategije za izbor, kao i podešavanje vrednosti koeficijenta inercije tokom procesa optimizacije. U osnovnoj verziji PSO algoritma, definisanoj 1995. godine, koeficijent inercije nije korišćen. Ši i Eberhart prvi put 1998. godine predlažu uvođenje datog koeficijenta [69], pri čemu u svojim istraživanjima koriste vrednost $\omega = 0,7$, uz konstataciju da se velikim vrednostima koeficijenta inercije podstiče globalno pretraživanje, a malim vrednostima lokalna pretraga prostora. Godine 2001, Rasel Eberhart [70] predlaže da se vrednost koeficijenta inercija menja u svakoj iteraciji algoritma primenom sledeće jednačine:

$$\omega_k = 0,5 + r/2. \quad (3.20)$$

Pri tom je r označena slučajna promenljiva sa uniformnom raspodelom u intervalu $[0,1]$.

Kako bi se tokom početnih iteracija pospešilo pretraživanje prostora, a pri kraju pretrage ubrzala konvergencija, J. Ksin [71] predlaže linearno smanjivanje vrednosti koeficijenta inercije u svakoj iteraciji PSO algoritma:

$$\omega_k = (\omega_{start} - \omega_{end}) \cdot \frac{K - k}{K} + \omega_{end}. \quad (3.21)$$

Pri tom se za početnu ω_{start} i finalnu ω_{end} vrednost koeficijenta inercije predlaže korišćenje vrednosti 0,9 i 0,4, redom.

Kako bi se sprečilo “zaglavljivanje” čestica u lokalnom optimumu, 2007. godine Feng [72] predlaže da se vrednost koeficijenta inercije u k -toj iteraciji

algoritma izračunava prema formulama:

$$\begin{aligned}z_0 &= rand(), \quad z_0 \notin \{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0\} \\z_k &= 4 \cdot z_{k-1} \cdot (1 - z_{k-1}) \\ \omega_k &= (\omega_{start} - \omega_{end}) \cdot \frac{K - k}{K} + \omega_{end} \cdot z_k.\end{aligned}\tag{3.22}$$

U radu [73] analizirane su i upoređivane pomenute strategije za izbor i/ili podešavanje vrednosti koeficijenta inercije, kao i strategije opisane u radovima [74–81]. Utvrđeno je da se najbolji rezultati optimizacije, to jest najtačnija rešenja i najbrža konvergencija, postižu kada se tokom postupka optimizacije vrednost koeficijenta inercije menja u skladu sa izrazom 3.21 ili jednačinama 3.22.

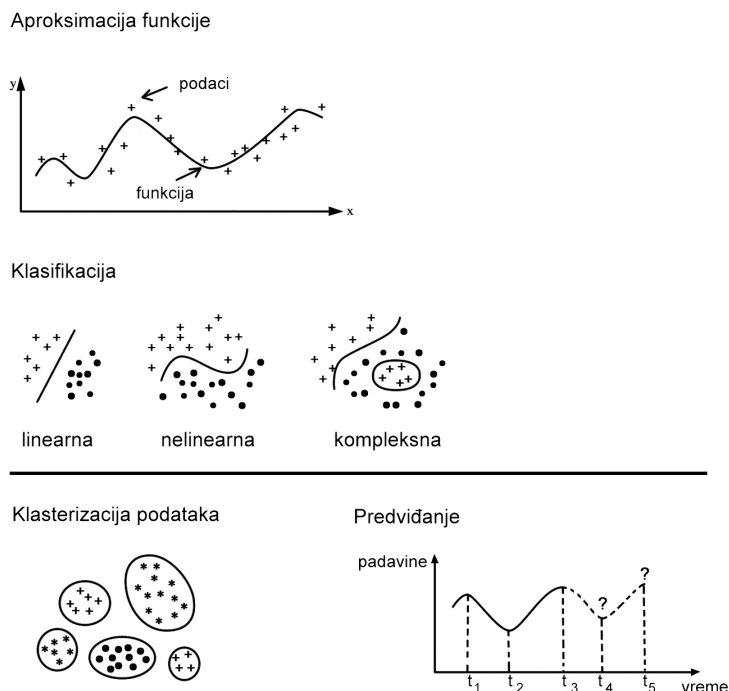
Pronalaženje globalnog ekstrema može se pospešiti i ako se ograniči razmena informacija između čestica roja, tako da na promenu položaja i brzine kretanja čestice, umesto iskustva čitavog roja, utiče najbolje pronađeno rešenje njenih suseda. U cilju definisanja susedskih veza između čestica roja obično se koristi neka od sledećih topologija:

- topologija prstena – čestice: $(i - 1) \bmod S$, i , $(i + 1) \bmod S$ predstavljaju susede i -te čestice roja;
- slučajna topologija – svaka čestica obaveštava K slučajno odabranih čestica o svojoj najboljoj poziciji. Vrednost parametra K obično iznosi 3. Ako nakon promene položaja čestica nije pronađen kvalitetniji kandidat za rešenje, potrebno je modifikovati graf susedstva.

3.3 Veštačke neuralne mreže

Veštačka neuralna mreža predstavlja paralelni distribuirani procesor sa sposobnošću učenja, pamćenja i generalizacije [32, 82–85]. Za razliku od konvencionalnih računara, neuralne mreže se pokazuju vrlo efikasnim u aproksimaciji kompleksnih nelinearnih funkcija više promenljivih, kao i pri prepoznavanju i klasifikaciji oblika, klasterizaciji podataka, optimizaciji (slika 3.5).

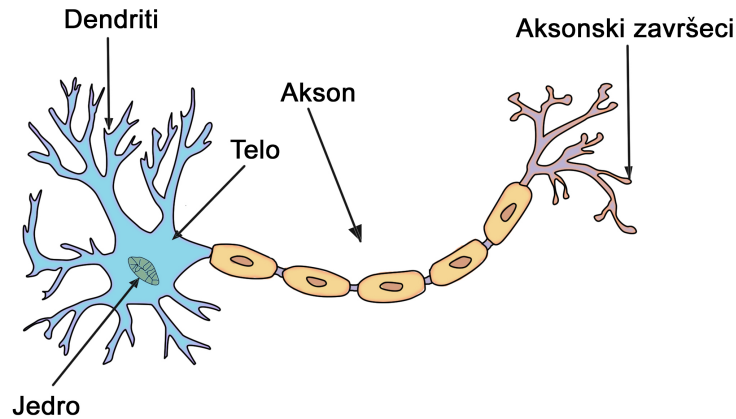
Motivacija za razvoj veštačkih neuralnih mreža je potekla iz želje da se kreira veštački sistem koji će modelovati ponašanje bioloških neurona u ljudskom mozgu, pa samim tim i procese učenja pojmova, prepoznavanja obrazaca i donošenja odluka. Mozak odraslog čoveka sadrži oko 100 milijardi neurona, čija je uloga skladištenje i prenošenje informacija u vidu nervnih impulsa. Neuron



Slika 3.5: Primena veštačkih neuralnih mreža [86]

se sastoji iz tela ćelije (some), dendrita i aksona. Dendriti su kratki završeci some koji primaju nervne impulse od drugih neurona i prosleđuju ih telu ćelije. Ukoliko pristigli nadražaji premašuju aktivacioni prag nervne ćelije, neuron generiše nervni impuls, koji se zatim dugim nervnim vlaknom (aksonom) prenosi od tela ćelije ka sledećem neuronu. Sinapsa predstavlja sponu između nervnih ćelija kojom se prenose informacije sa aksona jednog neurona na dendrite drugog. S obzirom na to da obavljaju funkcije selektivnog blokiranja impulsa, pojačavanja signala, kao i integracije impulsa različitih neurona, sinapse imaju ključno ulogu u obradi i usmeravanju informacija. Građa biološkog neurona je prikazana na slici 3.6.

Prvi korak u razvoju veštačkih neuralnih mreža načinili su neurofiziolog Voren Mekalok i matematičar Volter Pits koji su u svom radu iz 1943. godine [88] predstavili prvi matematički model biološkog neurona, takozvani MP neuron (slika 3.7). Prema predloženom modelu MP neuron računa težinsku sumu M ulaznih signala i , u zavisnosti od toga da li proračunata suma premašuje vred-



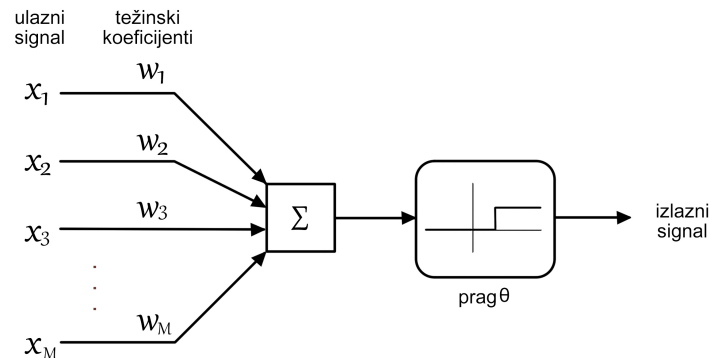
Slika 3.6: Građa biološkog neurona [87]

nost praga θ , kao izlazni signal generiše jedinicu ili nulu:

$$y = \begin{cases} 1, & \text{ako je } \sum_{i=1}^M w_i x_i - \theta > 0 \\ 0, & \text{ako je } \sum_{i=1}^M w_i x_i - \theta < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

Iako jednostavan, MP neuron, pri odgovarajućem odabiru vrednosti praga, može realizovati operacije logičkog množenja (eng. *AND*), logičkog sabiranja (eng. *OR*) i komplementiranja (eng. *NOT*). Iz navedenog proizilazi da se uz odgovarajuće sprege dovoljno velikog broja MP neurona može postići funkcionalnost konvencionalnih računara.

Pedesetih godina dvadesetog veka Frenk Rozenblat osmišljava jednoslojnu neuralnu mrežu, takozvani perceptron [90], koji sposobnost klasifikacije stiče kroz proces obučavanja tokom kog se podešavaju vrednosti težinskih koficijena koji su dodeljeni vezama neurona. Već 1958. godine Frenk Rozenblat i Čarls Vajtmen sa svojim saradnicima razvijaju prvi neuroračunar. Međutim, interesovanje za istraživanja na polju neuralnih mreža naglo opada nakon objavljivanja knjige Marvinia Minskog i Sejmur Paperta [91] u okviru koje je pokazano da jednoslojna neuralna mreža ne može da modeluje operaciju ekskluzivnog sabiranja (*XOR*) niti klasifikuje oblike koji nisu linearno separabilni. Nedovoljna procesorska snaga tadašnjih računara predstavljala je dodatnu prepreku implementaciji velikih neuralnih mreža. Početkom osamdesetih godina dvadesetog veka američka vojna agencija DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) započinje finansiranje istraživanja u ovoj oblasti [92].



Slika 3.7: MP neuron [89]

Sa razvojem *backpropagation* algoritma obučavanja [93] i pojavom savremenijih računarskih sistema omogućeni su razvoj i primena višeslojnih neuralnih mreža, tako da je i interesovanje za veštačke neuralne mreže obnovljeno. Devedesetih godina dvadesetog veka svi veći univerziteti u Sjedinjenim Američkim državama uvode izučavanje veštačkih neuralnih mreža u svoj nastavni program. Zahvaljujući razvoju novih algoritama i sve većoj procesorskoj snazi računara, danas veštačke neuralne mreže imaju značajnu primenu u rešavanju optimizacionih problema, obradi signala, prepoznavanju oblika, ali i mnogim drugim oblastima [94–97].

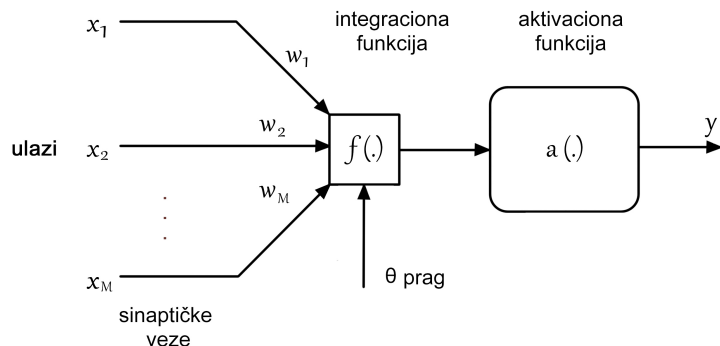
3.3.1 Opšti matematički model čvora

Osnovni gradivni element veštačke neuralne mreže je veštački neuron ili čvor mreže, čiji je opšti model prikazan na slici 3.8. Čvor ANN mreže predstavlja element za procesiranje kome su pridružene integraciona i aktivaciona funkcija.

Integraciona funkcija formira zbirni reprezent pobudnih signala x_i , $i \in \{1, \dots, M\}$. Pobudni signali jednog neurona mogu biti izlazni signali drugih neurona ili eksterni pobudni signali same neuralne mreže. Pored linearne funkcije, koja se koristi pri implementaciji MP neurona:

$$f = \sum_{i=1}^M w_i x_i - \theta, \quad (3.24)$$

primenjuju se i nešto složeniji oblici integracionih funkcija:



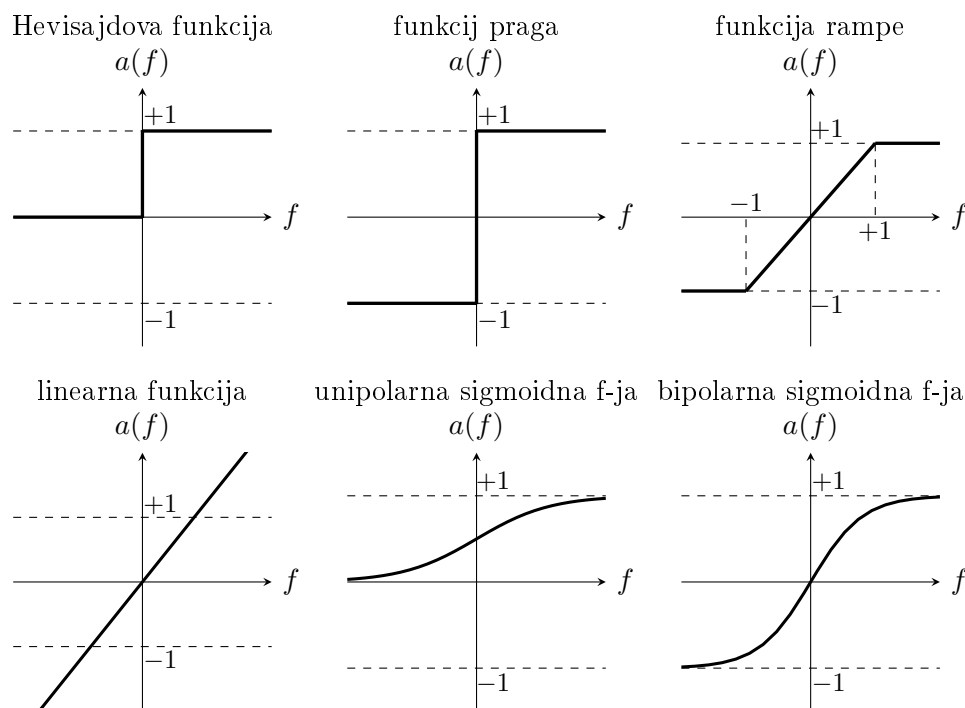
Slika 3.8: Opšti model veštačkog neurona

- kvadratna funkcija: $f = \sum_{i=1}^M w_i x_i^2 - \theta$
- sferična funkcija: $f = \rho^{-2} \sum_{i=1}^M (x_i - w_i)^2 - \theta$

U navedenim izrazima sa θ je označen aktivacioni prag (*bias*) čvora, dok težinski koeficijenti w_i , $i \in \{1, \dots, M\}$, predstavljaju snagu sinapsi kojima se ka posmatranom čvoru prenose pobudni signali. Ukoliko je vrednost težinskog koeficijenta veća od 0, sinapsa je eksitorna, dok je u slučaju negativne vrednosti koeficijenta sinapsa inhibirajuća. Ako između dva čvora ANN mreže ne postoji veza, vrednost odgovarajućeg težinskog koeficijenta je jednaka nuli.

Izlazni signal čvora formira se propuštanjem zbirnog reprezentata pobudnih signala f kroz aktivacionu (prenosnu) funkciju. Uobičajeno korišćeni oblici aktivacionih funkcija su sledeći:

- Hevisajdova (jedinična odskočna) funkcija: $a(f) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } f \geq 0 \\ 0, & \text{ako je } f < 0 \end{cases}$
- funkcija praga (*hard limiter*): $a(f) = \text{sgn}(f) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } f \geq 0 \\ -1, & \text{ako je } f < 0 \end{cases}$
- funkcija rampe: $a(f) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } f > 1 \\ f, & \text{ako je } 0 \leq f \leq 1 \\ 0, & \text{ako je } f < 0 \end{cases}$



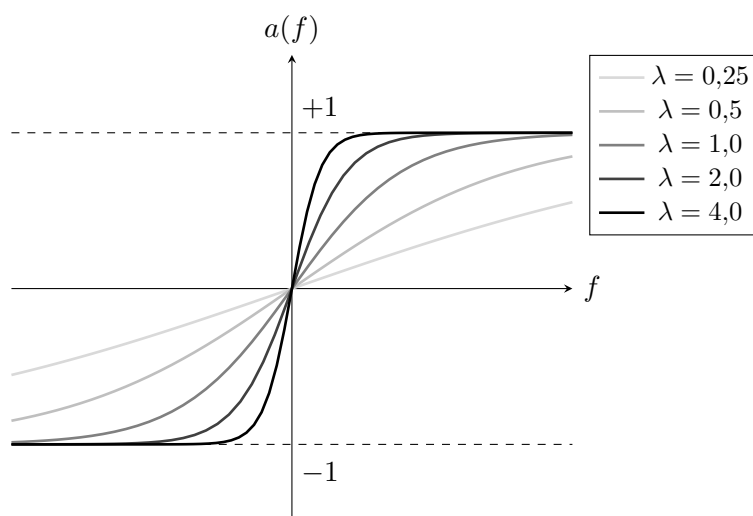
Slika 3.9: Aktivacione funkcije

- linearna funkcija: $a(f) = f$
- unipolarna sigmoidna funkcija: $a(f) = \frac{1}{1+\exp(-\lambda f)}$
- bipolarna sigmoidna funkcija: $a(f) = \frac{2}{1+\exp(-\lambda f)} - 1$

Parametar λ određuje nagib sigmoidne funkcije, pa tako, pri malim vrednostima ovog parametra sigmoidna funkcija teži linearnoj, dok je pri velikim vrednostima parametra λ ova funkcija slična odskočnoj funkciji. Hevisajdova funkcija se primenjuje kao aktivaciona funkcija MP neurona, dok je sigmoidna funkcija najčešće korišćeni tip aktivacione funkcije pri realizaciji veštačkih neuralnih mreža. Na slici 3.9 dat je grafički prikaz navedenih aktivacionih funkcija, dok je uticaj parametra λ na nagib sigmoidne funkcije prikazan na slici 3.10.

3.3.2 Topologija veštačke neuralne mreže

Veštačke neuralne mreže se sastoje od većeg broja čvorova koji su međusobno povezani sinapsama i organizovani po slojevima. Prvi sloj čvorova predstavlja ulazni sloj mreže i njegova funkcija je preuzimanje eksternih pobudnih signala i njihovo dalje prosleđivanje čvorovima narednog sloja. Poslednji sloj čvorova generiše izlazne signale i naziva se izlazni sloj mreže. Broj čvorova ulaznog sloja je jednak broju ulaznih promenljivih, dok je broj čvorova izlaznog



Slika 3.10: Grafički prikaz sigmoidne funkcije za različite vrednosti parametra λ

sloja jednak broju izlaznih promenljivih. Za razliku od jednoslojnih mreža, višeslojne neuralne mreže, pored ulaznog i izlaznog sloja, sadrže i jedan ili više skrivenih slojeva čvorova. Višeslojna neuralna mreža sa samo jednim skrivenim slojem omogućava aproksimiranje neprekidnih i integrabilnih funkcija više promenljivih [98].

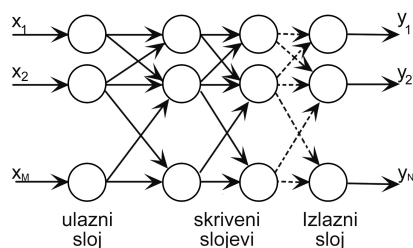
U zavisnosti od toga da li poseduje povratnu spregu, neuralna mreža može biti:

- *feedforward* (mreža bez povratne sprege) ili
- *feedback* (mreža sa povratnom spregom).

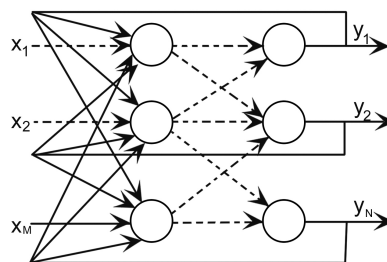
Za razliku od *feedforward* neuralnih mreža, kod kojih je prenos signala usmeren od ulaznih ka izlaznim čvorovima mreže, u slučaju *feedback* neuralnih mreža izlazni signali pojedinih čvorova se vraćaju kao ulazni signali u čvorove istog ili prethodnih slojeva mreže. Na slici 3.11 prikazane su topologije višeslojnih *feedforward* i *feedback* neuralnih mreža.

3.3.3 Obučavanje neuralnih mreža

Kako bi veštačka neuralna mreža stekla željeno znanje ili sposobnost izvršavanja zadatih zadataka sprovodi se proces obučavanja mreže korišćenjem konačnog skupa karakterističnih primera. Stečeno znanje se skladišti u težinama sinapsi kojima su povezani čvorovi mreže, a po završetku procesa obučavanja veštačka neuralna mreža poseduje sposobnost generalizacije, odnosno generisanja zadovoljavajućih izlaza i za ulazne signale koji se ne koriste u procesu obučavanja. Razlikuju se dva tipa obučavanja veštačkih neuralnih mreža:



(a) Feedforward ANN mreža



(b) Feedback ANN mreža

Slika 3.11: Topologije višeslojne veštačke neuralne mreže [99]

- strukturalno i
- parametarsko obučavanje.

Strukturalno obučavanje podrazumeva promenu strukture mreže, broja skrivenih slojeva, kao i broja čvorova u svakom od skrivenih slojeva. Sposobnost sticanja znanja, kao i generalizacije ANN mreže, zavisi od broja sinapsi kojima su povezani čvorovi mreže, pa samim tim i od broja čvorova u skrivenim slojeva. Neuralna mreža sa nedovoljnim brojem sinapsi ne može se adekvatno obučiti, dok je velika verovatnoća da se mreža sa previše sinapsi tokom procesa obučavanja “pretrenira”, pa shodno tome ne stekne željenu sposobnost generalizacije. Pri razvoju višeslojne neuralne mreže sa jednim skrivenim slojem uobičajena praksa podrazumeva kreiranje mreže čiji je broj skrivenih čvorova značajno manji od broja eksternih pobudnih signala, odnosno broja čvorova ulaznog sloja. Ukoliko se obučavanjem kreirane mreže postignu zadovoljavajuće performanse, potrebno je pokušati sa smanjenjem broja skrivenih čvorova. U suprotnom, broj čvorova skrivenog sloja je neophodno povećati. Slična procedura se sprovodi i pri većem broju skrivenih slojeva, s tim što broj čvorova svakog narednog sloja ANN mreže treba da bude manji od broja čvorova njemu prethodnog skrivenog sloja.

Parametarsko obučavanje predstavlja podešavanje vrednosti težinskih koeficijenata u cilju postizanja željenih performansi. Razlikuju se sledeći vidovi parametarskog obučavanja:

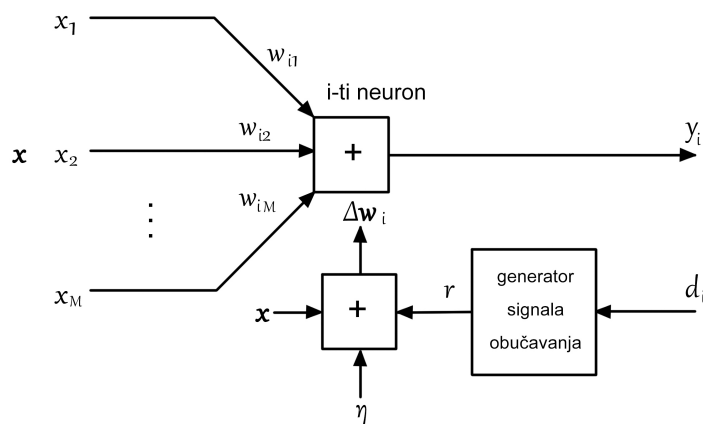
- obučavanje sa učiteljem (supervizorno obučavanje)
- obučavanje sa podsticajem (*reinforcement* obučavanje)

- samoobučavanje (nesupervizorno obučavanje).

Kod supervizornog obučavanja ulaznim signalima za obučavanje neuralne mreže pridruženi su odgovarajući željeni izlazni signali. U slučaju obučavanja sa podsticajem, neuralna mreža dobija informacije o tome kakav izlaz generiše i to najčešće u vidu jednog bita (dobar ili loš). Samoobučavanje karakteriše odsustvo bilo kakve povratne sprege od okruženja.

3.3.3.1 Opšte pravilo obučavanja

Na slici 3.12 prikazana je opšta šema obučavanja veštačke neuralne mreže. Sa $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_M]^T$ je označen vektor ulaznih signala i -tog čvora mreže, dok y_i predstavlja izlazni signal datog čvora. Željeni izlazni signal d_i je dostupan kod supervizornog obučavanja, dok se u slučaju samoobučavanja promena vrednosti težinskih koeficijenata vrši na osnovu ulaznih i izlaznih signala čvora. Vektor sinaptičkih težina i -tog čvora $\mathbf{w}_i = [w_{i1} \ w_{i2} \ \dots \ w_{iM}]^T$ sadrži vrednosti težinskih koeficijenata sinapsi kojima se pobudni signali prosleđuju ka posmatranom čvoru ANN mreže.



Slika 3.12: Šema obučavanja ANN mreže [100]

Promena vrednosti težinskih koeficijenata u k -toj iteraciji obučavanja proporcionalna je proizvodu signala obučavanja r i ulaznog vektora \mathbf{x} :

$$\Delta \mathbf{w}_i(k) = \eta \cdot r \cdot \mathbf{x} = \eta \cdot f_r(\mathbf{w}_i(k), \mathbf{x}(k), d(k)) \cdot \mathbf{x}(k) \quad (3.25)$$

U navedenoj jednačini η predstavlja konstantu obučavanja, dok je signal obučavanja r funkcija težina sinapsi \mathbf{w}_i , ulaza čvora \mathbf{x} , i , ukoliko je poznat, željenog

izlaza d_i . Zakoni obučavanja se uglavnom razlikuju po načinu generisanja obučavajućeg signala r .

Najstariji zakon obučavanja bazira se na hipotezi koju je 1949. godine postavio neuropsiholog Heb, a koja glasi [101]:

“Ukoliko aksiona veza od neurona A ka neuronu B uzrokuje neizostavno okidanje neurona B, i ukoliko se ova situacija ponavlja veliki broj puta ili traje permanentno, tada će efikasnost ove veze u smislu prouzrokovanja okidanja neurona B vremenom da jača.”

Dakle, promena jačine sinaptičke veze srazmerna je korelaciji između aktivnosti presinaptičkih i postsinaptičkih neurona. Obučavajući signal r jednak je izlaznom signalu čvora, tako da se priraštaj vrednosti težinskog koeficijenta sinapse između izvorišnog (presinaptičkog) čvora j i odredišnog (postsinaptičkog) čvora i računa prema formuli:

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot r \cdot x_j = \eta \cdot y_i \cdot x_j. \quad (3.26)$$

Kako se u procesu obučavanja ne koristi željeni izlazni signal, Hebov proces učenja je u osnovi samoobučavanje.

3.3.3.2 Algoritam propagacije greške unazad

Možda najznačajnije otkriće u razvoju neuralnih mreža predstavlja algoritam za obučavanje propagacijom greške unazad (*backpropagation* algoritam) koji je formulisan sredinom osamdesetih godina dvadesetog veka. *Backpropagation* algoritam obučavanja podrazumeva proces podešavanja vrednosti težinskih koeficijenata sinapsi višeslojne *feedforward* neuralne mreže na osnovu razlika vrednosti generisanih i željenih izlaza mreže. Najpre se prosleđivanjem eksterne pobude mreže \mathbf{x} od ulaznog ka izlaznom sloju generiše izlaz mreže \mathbf{y} . Potom se greška (razlika između željenog izlaza \mathbf{d} i generisanog izlaza \mathbf{y}) propagara od izlaznog ka ulaznom sloju mreže, kako bi se izvršilo podešavanje vrednosti težinskih koeficijenata. Inkrementalnom metodom obučavanja težinski koeficijenti se koriguju nakon propagacije svakog od vektora ulaznih signala iz obučavajućeg skupa parova $\{(\mathbf{x}_p, \mathbf{d}_p), p = 1, \dots, P\}$. Pri tom je sa P označen broj primera na kojima se neuralna mreža obučava. U slučaju primene blokovske metode obučavanja, težinski koeficijenti sinapsi se podešavaju nakon propagacije svih ulaznih vektora iz zadatog obučavajućeg skupa.

Pretpostavimo *feedforward* neuralnu mrežu sa jednim skrivenim slojem, koja u ulaznom sloju ima M čvorova, H čvorova u skrivanom i N čvorova u izlaznom

sloju. Neka su sa $a_j^{(l)}$ i $\theta_j^{(l)}$ označeni aktivaciona funkcija i aktivacioni prag j -tog čvora l -tog sloja mreže, redom, dok je $w_{ji}^{(l)}$ težina sinapse kojom se ka datom čvoru prenosi njegova i -ta pobuda $s_i^{(l)}$. Težinska suma pobudnih signala $net_j^{(l)}$ i izlaz iz čvora $o_j^{(l)}$ izračunavaju se primenom sledećih jednačina:

$$\begin{aligned} net_j^{(l)} &= \sum_{i=1}^{n_l} w_{ji}^{(l)} s_i^{(l)} - \theta_j^{(l)}, \\ o_j^{(l)} &= a_j^{(l)}(net_j^{(l)}) = a_j^{(l)} \left(\sum_{i=1}^{n_l} w_{ji}^{(l)} s_i^{(l)} - \theta_j^{(l)} \right). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Pri tom l može imati vrednosti 1 ili 2 u zavisnosti od toga da li označava skriveni ili izlazni sloj posmatrane mreže, dok je broj pobudnih signala čvorova l -tog sloja mreže, n_l , jednak broju čvorova njemu prethodnog sloja, pa shodno tome može iznositi M ili H . Eksterne pobude ANN mreže predstavljaju ulazne signale skrivenih čvorova ($s_i^{(1)} = x_i$), dok izlazi iz čvorova skrivenog sloja predstavljaju ulazne signale čvorova izlaznog sloja prikazane neuralne mreže ($s_i^{(2)} = o_i^{(1)}$). Ako je $l = 2$, odnosno ukoliko čvor j pripada izlaznom sloju, tada je $o_j^{(2)} = y_j$.

Kako je cilj *backpropagation* algoritma za obučavanje neuralnih mreža minimiziranje razlike između željenih i generisanih izlaza mreže, uvodi se kriterijumska funkcija obučavanja (funkcija greške) kojom se, nakon propagacije ulaznog vektora \mathbf{x} kroz ANN mrežu, određuje koliko je izlaz mreže blizak željenom izlazu:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (d_n - y_n)^2. \quad (3.28)$$

Potom se u skladu sa gradijentnom metodom optimizacije, koja koristi prvi izvod (gradijent) funkcije kao pravac duž kog se minimizira funkcija, koriguju vrednosti težinskih koeficijenata sinapsi između skrivenih i izlaznih čvorova mreže, a potom i između ulaznih i skrivenih čvorova, primenom sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} \Delta w_{ji}^{(l)} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{(l)}} = \eta \sum_{n=1}^N (d_n - y_n) \frac{\partial y_n}{\partial o_j^{(l)}} \frac{\partial o_j^{(l)}}{\partial net_j^{(l)}} \frac{\partial net_j^{(l)}}{\partial w_{ji}^{(l)}} \\ &= \eta \sum_{n=1}^N (d_n - y_n) \frac{\partial y_n}{\partial o_j^{(l)}} \frac{\partial a_j^{(l)}(net_j^{(l)})}{\partial net_j^{(l)}} s_i^{(l)} \\ &= \eta \delta_i^{(l)} s_i^{(l)} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Sa $\delta_i^{(l)}$ je označen signal obučavanja j -tog čvora l -tog sloja mreže. Ako čvor j

pripada izlaznom sloju mreže, tada važi jednakost:

$$\frac{\partial y_n}{\partial o_j^{(2)}} = \frac{\partial y_n}{\partial y_j} = \begin{cases} 1, & \text{za } n = j \\ 0, & \text{za } n \neq j \end{cases} \quad (3.30)$$

pa je signal obučavanja izlaznog čvora moguće odrediti primenom izraza:

$$\delta_j^{(2)} = (d_j - y_j) \frac{\partial a_j^{(2)}(net_j^{(2)})}{\partial net_j^{(2)}}. \quad (3.31)$$

Ukoliko čvor j predstavlja skriveni čvor posmatrane mreže, važiće sledeća jednakost:

$$\frac{\partial y_n}{\partial o_j^{(1)}} = \frac{\partial a_n^{(2)}(net_n^{(2)})}{\partial net_n^{(2)}} \frac{\partial net_n^{(2)}}{\partial o_j^{(1)}} = \frac{\partial a_n^{(2)}(net_n^{(2)})}{\partial net_n^{(2)}} w_{nj}^{(2)}, \quad (3.32)$$

tako da je signal obučavanja skrivenog čvora ANN mreže moguće definisati relacijom:

$$\begin{aligned} \delta_j^{(1)} &= \sum_{n=1}^N \left((d_n - y_n) \frac{\partial a_n^{(2)}(net_n^{(2)})}{\partial net_n^{(2)}} w_{nj}^{(2)} \right) \frac{\partial a_j^{(1)}(net_j^{(1)})}{\partial net_j^{(1)}} \\ &= \frac{\partial a_j^{(1)}(net_j^{(1)})}{\partial net_j^{(1)}} \sum_{n=1}^N \delta_n^{(2)} w_{nj}^{(2)} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Ukoliko se kao aktivaciona funkcija primenjuje bipolarna sigmoidna funkcija, signale obučavanja je potrebno odrediti primenom izraza:

$$\begin{aligned} \delta_j^{(2)} &= \frac{1}{2} (d_j - y_j) (1 - y_j^2), \\ \delta_j^{(1)} &= \frac{1}{2} (1 - o_j^2) \sum_{i=1}^N \delta_j^{(2)} w_{ij}^{(2)}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Vrednost konstante obučavanja η utiče na stabilnost, kao i brzinu konvergencije *backpropagation* algoritma. Pri malim vrednostima konstante η algoritam sporo konvergira ka minimumu funkcije greške. Povećanje vrednosti konstante obučavanja može ubrzati konvergenciju, ali i rezultovati “oscilovanjem” u okolini minimuma funkcije ili pak prouzrokovati divergentnost algoritma. Uobičajeno korišćene vrednosti konstante obučavanja η su u opsegu od 0,001 do 10.

Kako bi se ubrzala konvergencija i povećala efikasnost, kao i pouzdanost

obučavanja, težinskim koeficijentima se dodeljuje inercija (momenat):

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \Delta\mathbf{w}(k) + \gamma\mathbf{w}(k-1). \quad (3.35)$$

Pri tom je sa \mathbf{w} označena matrica čiji su elementi sinaptičke težine ANN mreže, dok je parametar $\gamma \in (0,1)$, a uobičajeno korišćena vrednost datog parametra iznosi 0,9.

Obučavanje veštačke neuralne mreže sprovodi se u više epoha, pri čemu jedna epoha obuhvata propagaciju svih ulaznih vektora (iz zadatog obučavajućeg skupa) kroz neuralnu mrežu. Tokom obučavanja ANN mreže vrednost funkcije greške opada sa povećanjem broja epoha, a sam proces obučavanja se zaustavlja kad ukupna greška:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N (d_{p,n} - y_{p,n})^2 \quad (3.36)$$

padne ispod maksimalno prihvatljive vrednosti E_{max} . Takođe, kriterijum za zaustavljanje obučavanja može biti i dostizanje unapred definisanog maksimalnog broja epoha.

Na slici 3.13 prikazane su faze inkrementalnog obučavanja ANN mreža.

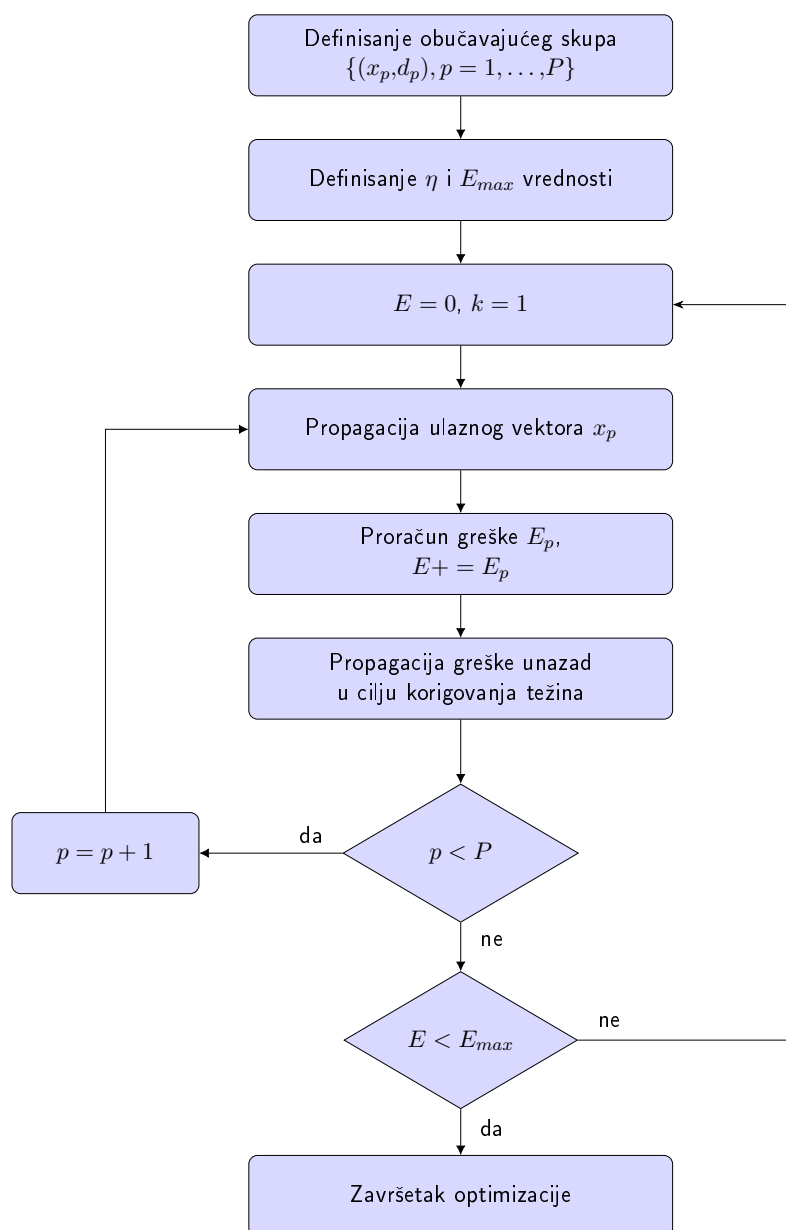
Umesto metode gradijentnog spusta, može se primeniti Njutnova metoda, koja podrazumeva određivanje kako prvih, tako i drugih parcijalnih izvoda funkcije greške, čime se postiže brža konvergencija ka minimumu funkcije. Prema Njutnovoju metodi optimizacije vrednosti sinaptičkih težina ANN mreže, u k -toj iteraciji obučavanja, se računaju prema formuli:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - (\mathbf{H}(k))^{-1}\mathbf{g}(k), \quad (3.37)$$

gde je sa \mathbf{H} označena Hesijan matrica,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_Q} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_2 \partial w_Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_Q \partial w_1} & \frac{\partial^2 E}{\partial w_Q \partial w_2} & \cdots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_Q^2} \end{bmatrix}, \quad (3.38)$$

dok je $\mathbf{g} = \left[\frac{\partial E}{\partial w_1} \quad \frac{\partial E}{\partial w_2} \quad \cdots \quad \frac{\partial E}{\partial w_Q} \right]^T$ gradijent funkcije greške definisane izrazom



Slika 3.13: Inkrementalno obučavanje neuralne mreže

3.36. Radi jednostavnije notacije težinski koeficijenti neuralne mreže su označeni indeksom q ($q \in \{1, \dots, Q\}$), pri čemu Q označava ukupan broj sinapsi veštačke neuralne mreže. Iako Njutnovu metodu karakteriše brza konvergencija, potreba za određivanjem drugih izvoda funkcije greške čini datu metodu računski zahtevnom. Prema Gaus-Njutnovoj metodi, u cilju pojednostavljenja proračuna, gradijent \mathbf{g} i Hesijan matricu \mathbf{H} moguće je izraziti preko Jakobijan matrice \mathbf{J} :

$$\begin{aligned}\mathbf{g} &= \mathbf{J}\mathbf{e}, \\ \mathbf{H} &\approx \mathbf{J}^T\mathbf{J},\end{aligned}\tag{3.39}$$

gde je \mathbf{e} vektor greške:

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & \cdots & e_{1,N} & \cdots & e_{P,1} & e_{P,2} & \cdots & e_{P,N} \end{bmatrix}^T,\tag{3.40}$$

dok je

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_Q} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{1,N}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{1,N}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{1,N}}{\partial w_Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{P,1}}{\partial w_Q} \\ \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{P,2}}{\partial w_Q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{P,N}}{\partial w_1} & \frac{\partial e_{P,N}}{\partial w_2} & \cdots & \frac{\partial e_{P,N}}{\partial w_Q} \end{bmatrix}.\tag{3.41}$$

Pri tom je sa $e_{p,i}$ označeno odstupanje i -tog izlaza mreže od i -tog željenog izlaza pri propagaciji p -tog ulaznog vektora iz skupa za obučavanje mreže:

$$e_{p,i} = d_{p,i} - y_{p,i}.\tag{3.42}$$

Prema Gaus-Njutnovoj metodi podešavanje težina sinapsi izvršava se primenom sledeće jednačine:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - (\mathbf{J}(k)^T\mathbf{J}(k))^{-1}\mathbf{J}(k)\mathbf{e}(k).\tag{3.43}$$

Kako se Njutnovom metodom optimizacije funkcija greške $E(\mathbf{w})$ aproksimira kvadratnom funkcijom, sposobnost konvergencije Njutnove metode ka minimumu funkcije greške zavisi od toga koliko je primena kvadratne aproksimacije adekvatna. U blizini minimuma kvadratna funkcija najčešće dobro aproksimira funkciju greške, tako da Njutnova metoda brzo konvergira traženom minimumu. Međutim, ukoliko se pretraga započinje daleko od tačke minimuma, ne postoji garancija da će metoda konvergirati ka minimumu funkcije. Isti se zaključci mogu doneti i o konvergenciji Gaus-Njutnove metode, s obzirom na to da pomenuta metoda uvodi linearnu aproksimaciju funkcije $e(\mathbf{w})$.

Levenberg-Markvartova metoda [102, 103] kombinuje gradijentnu metodu i Gaus-Njutnovu metodu minimiziranja sume kvadrata. Najpre se primenjuje gradijentna metoda jer je globalno konvergentna, pa shodno tome konvergira ka minimumu iz proizvoljne početne pozicije, dok se nakon približavanja minimumu funkcije greške primenjuje Gaus-Njutnova metoda jer je u okolini minimuma brža i pouzdanija od gradijentne metode. Levenberg-Markvartovu metodu karakteriše robusnost i brza konvergencija, što je čini pogodnom za obučavanje veštačkih neuralnih mreža.

U skladu sa Levenberg-Markvartovom metodom, u k -toj iteraciji obučavanja, vrednosti težinskih koeficijenata sinapsi neuralne mreže računaju se prema formuli:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - (\mathbf{J}(k)^T \mathbf{J}(k) + \alpha I)^{-1} \mathbf{J}(k) \mathbf{e}(k), \quad (3.44)$$

pri čemu je sa α označen kombinacioni koeficijent, dok je I jedinična matrica. Pri velikim vrednostima kombinacionog koeficijenta α primenjuje se gradijentna metoda, dok se pri vrednostima bliskim nuli primenjuje Gaus-Njutnov algoritam.

Proračunavanje elemenata Jakobijan matrice: Pretpostavimo *feed-forward* neuralnu mrežu sa dva skrivena sloja čiji broj čvorova po slojevima, počevši od ulaznog ka izlaznom sloju mreže, iznosi M , H_1 , H_2 i N . Neka su sa $net_j^{(l)}$, $a_j^{(l)}$, $o_j^{(l)}$ i $\mathbf{w}_j^{(l)} = [w_{j1}^{(l)} \ w_{j2}^{(l)} \ \dots \ w_{jn_l}^{(l)}]^T$ označeni zbirni reprezent pobudnih signala, aktivaciona funkcija, izlazni signal i vektor težina j -tog čvora l -tog sloja mreže, redom, dok je n_l broj ulaznih signala datog čvora. Sa $s_i^{(l)}$ je označena i -ta pobuda čvorova l -tog sloja, dok x_i predstavlja i -tu eksternu pobudu mreže. Neka y_m označava m -ti izlaz neuralne mreže.

Kako bi se primenila Levenberg-Markvartova metoda potrebno je odrediti

elemente Jakobijan matrice primenom sledeće jednačine:

$$\frac{\partial e_{p,m}}{\partial w_{ji}^{(l)}} = -\frac{\partial y_{p,m}}{\partial o_j^{(l)}} \frac{\partial o_j^{(l)}}{\partial net_j^{(l)}} \frac{\partial net_j^{(l)}}{\partial w_{ji}^{(l)}} = -\frac{\partial y_{p,m}}{\partial o_j^{(l)}} \frac{\partial a_j^{(l)}(net_j^{(l)})}{\partial net_j^{(l)}} s_i^{(l)} = -\delta_{mj}^{(l)} s_i^{(l)} \quad (3.45)$$

Nakon propagacije svakog od P ulaznih vektora običavajućeg skupa kroz kreiranu neuralnu mrežu, najpre se za svaki od čvorova izlaznog sloja mreže $j \in \{1, \dots, N\}$ određuje vrednost parametra $\delta_{mj}^{(3)}$ primenom izraza:

$$\delta_{mj}^{(3)} = \begin{cases} \frac{\partial a_j^{(3)}(net_j^{(3)})}{\partial net_j^{(3)}}, & \text{za } m = j \\ 0, & \text{za } m \neq j \end{cases} \quad (3.46)$$

Date vrednosti se potom propagiraju ka prethodnom sloju mreže kako bi se odredile vrednosti parametara $\delta_{mj}^{(2)}$:

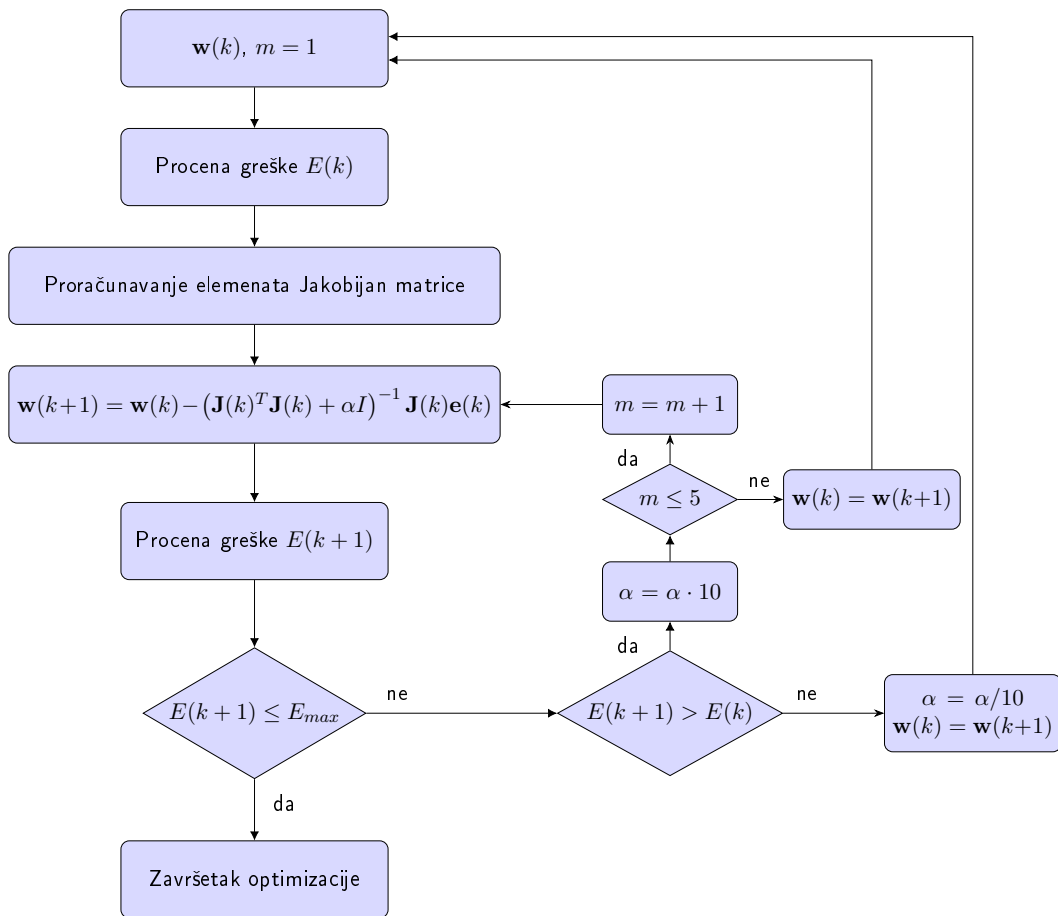
$$\delta_{mj}^{(2)} = \frac{\partial a_j^{(2)}(net_j^{(2)})}{\partial net_j^{(2)}} w_{mj}^{(3)} \delta_{mm}^{(3)}, \quad j \in \{1, \dots, H_2\}. \quad (3.47)$$

Zatim se izračunavaju i vrednosti $\delta_{mj}^{(1)}$ parametara za svaki od H_1 čvorova prvog skrivenog sloja primenom sledeće jednačine:

$$\delta_{mj}^{(1)} = \frac{\partial a_j^{(1)}(net_j^{(1)})}{\partial net_j^{(1)}} \sum_{i=1}^{H_2} w_{ij}^{(2)} \delta_{mi}^{(2)}. \quad (3.48)$$

Proces obučavanja primenom Levenberg-Markvartove metode sprovođi se kroz sledeće korake:

1. Dodeljivanje inicijalnih vrednosti težinskim koeficijentima i proračun ukupne greške (izraz 3.36)
2. Podešavanje težina sinapsi primenom izraza 3.44
3. Procena ukupne greške
4. Ukoliko je promena vrednosti težinskih koeficijenata rezultovala smanjenjem greške, vrednost kombinacionog koeficijenta je potrebno smanjiti 10 puta, dok se u slučaju povećanja greške kombinacioni koeficijent povećava 10 puta
5. Ponavljati opisani postupak obučavanja, počevši od drugog koraka, sve dok vrednost greške ne padne ispod maksimalno prihvatljive vrednosti.



Slika 3.14: Obučavanje primenom Levenberg-Markvartove metode

Blok dijagram procesa obučavanja primenom Levenberg-Markvartove metode prikazan je na slici 3.14.

4 Razvoj matematičkog modela

Drumski saobraćaj predstavlja dominantan izvor komunalne buke u urbanim sredinama. Kako dugotrajna izloženost povišenim nivoima zvuka može prouzrokovati negativne efekte po psihofizičko zdravlje ljudi, od velike je važnosti kontinuirano praćenje nivoa buke u urbanim sredinama (u kojima stanovništvo radi i obitava), a u cilju prepoznavanja potrebe za primenom određenih mera/sredstava za zaštitu od buke. Nivoje buke drumskog saobraćaja moguće je eksperimentalno odrediti, ali i izračunati primenom odgovarajućeg modela za predviđanje buke. S obzirom na to da su eksperimentalna merenja vremenski zahtevna, proračunske metode se znatno češće koriste u svrhu mapiranja buke, kao i procene broja stanovnika ugroženih bukom. Takođe, odgovarajući model za predviđanje saobraćajne buke predstavlja nezamenljivi alat pri projektovanju stambenih naselja, planiranju novih saobraćajnica, kao i proširivanju ili izmeštanju postojećih.

Kako bi se preduzele odgovarajuće mere za zaštitu od buke drumskog saobraćaja, potrebno je znati funkcionalnu vezu između emisije buke i parametara saobraćajnog toka (protoka motornih vozila, strukture saobraćajnog toka, brzine vozila, itd.). Iz navedenog razloga, počevši od pedesetih godina dvadesetog veka, razvijeni su brojni modeli za prognozu saobraćajne buke koji se zasnivaju na eksperimentalnim rezultatima merenja nivoa buke i uspostavljanju korelacione veze sa odabranim parametrima saobraćajnog toka. Međutim, postojeći modeli su prilagođeni karakteristikama i specifičnostima saobraćajnog toka urbane sredine za koju su formirani, kao i navikama i veštini vozača u ispitivanoj urbanoj sredini, pa shodno tome ne omogućavaju dovoljno tačna predviđanja nivoa saobraćajne buke u sredinama koje karakteriše drugačija struktura saobraćaja. Takođe, većina modela procenjuje nivo buke na osnovu protoka lakih i teških vozila, pa samim tim zahteva podelu saobraćajnog toka na samo dve kategorije,

zanemarujući značajnu razliku u emisiji buke između autobusa, motocikala, itd. Određeni broj modela ne uzima u obzir uticaj okruženja na ekvivalentni nivo zvuka, pa tako ni efekte refleksije od okolnih objekata, kao ni karakteristike saobraćajnice. Iz navedenih razloga, javlja se potreba za razvojem matematičkog modela koji će omogućiti tačnije predviđanje buke drumskog saobraćaja. Novi model treba da omogući detaljnije opisivanje strukture saobraćajnog toka uvođenjem složenije kategorizacije motornih vozila, uz procenu uticaja svake od definisanih kategorija na emisiju buke, kao i procenu uticaja okruženja na nivo buke u ugroženim sredinama. Matematički model za predviđanje ekvivalentnog nivoa buke drumskog saobraćaja moguće je prikazati jednačinom:

$$L_{Aeq} = L_{Aeq,0} + \Delta L \text{ [dBA]}, \quad (4.1)$$

gde je

$L_{Aeq,0}$ – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke na referentnom rastojanju $d_0 = 7,5$ m od ose saobraćajnice u otvorenom prostoru bez vertikalnih prepreka prostiranju zvuka, čija se vrednost izračunava na osnovu informacija o protoku motornih vozila i kompoziciji saobraćaja,

ΔL – korekcija nivoa buke kojom se uzima u obzir širenje talasnog fronta, uticaj okruženja (odnosno refleksije zvuka od okolnih objekata), kao i određenih karakteristika saobraćajnice na nivo buke na mestu prijema.

Pored zahteva za dovoljno tačnim predviđanjem nivoa saobraćajne buke, novi model treba da ispuni i sledeće zahteve:

- da bude dovoljno jednostavan i razumljiv kako bi imao praktičnu primenu u procesu urbanog planiranja;
- da zahteva podatke koji se mogu lako prikupiti;
- da pruži jasan uvid u uticaj pojedinih karakteristika saobraćajnog toka (kao što su protok vozila i struktura saobraćaja) na ekvivalentni nivo buke kako bi se omogućila procena efekata primene pojedinih mera za upravljanje saobraćajnim tokom na smanjenje saobraćajne buke.

4.1 Faze razvoja modela

Novi matematički model treba da omogući predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke drumskog saobraćaja tokom proizvoljnog vremenskog

intervala T [s] oko saobraćajnice čija je površina suva, bez leda i/ili naslaga snega. Takođe, model je namenjen predviđanju buke pri suvom vremenu, bez padavina, magle i pri brzini vetra manjoj od 5 m/s. Prilikom razvoja modela nije uzeta u obzir temperatura kolovozne površine, koja utiče na nivo buke generisane interakcijom pneumatika i kolovoza [104]. Razvijeni matematički model namenjen je predviđanju buke oko saobraćajnice, u prostoru između nizova stambenih objekata koji je okružuju, to jest u zonama naseljenog mesta koje su najugroženije bukom drumskog saobraćaja. Značaj formiranja ovakvog modela ogleda se u mogućnosti njegove primene u procesu planiranja novih saobraćajnica ili proširivanja postojećih, kao i u fazi izrade idejnih projekata stambenih naselja. Takođe, njegova primena omogućava prepoznavanje potrebe za sprovođenjem odgovarajućih mera za zaštitu od buke, kao i planiranje pojedinih mera za umanjene nivoa buke, poput kontrole saobraćajnog toka (to jest protoka saobraćajnih vozila i sastava saobraćaja).

Razvoj novog matematičkog modela za prognozu saobraćajne buke obuhvata sledeće faze:

- **Analiza sastava saobraćaja i određivanje grupa transportnih sredstava koje značajno utiču na emisiju buke drumskog saobraćaja.** Cilj ovog segmenta istraživanja jeste definisanje značajnih kategorija motornih vozila koje karakteriše različiti uticaj na ekvivalentni nivo buke;
- **Procena uticaja pojedinih kategorija motornih vozila na emisiju buke.** Nakon eksperimentalnih merenja nivoa buke drumskog saobraćaja, na osnovu dobijenih rezultata potrebno je utvrditi prosečne nivoe buke za svaku od definisanih kategorija vozila, kako bi se ekvivalentni nivo buke na referentnom rastojanju od ose saobraćajnice mogao proračunati na osnovu informacija o protoku i sastavu saobraćaja tokom odgovarajućeg vremenskog intervala;
- **Procena uticaja refleksije zvuka i karakteristika saobraćajnice na nivo buke drumskog saobraćaja.** Rezultat ove faze istraživanja je numerički model za procenu uticaja refleksije zvuka od okolnih objekata na ekvivalentni nivo buke oko same saobraćajnice. Kako na ekvivalentni nivo buke utiče i širina kolovoza, odnosno broj saobraćajnih traka, kao i ugao pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi saobraćajnica, u cilju povećanja tačnosti predviđanja potrebno je uzeti u obzir i navedene parametre pri izradi modela za procenu saobraćajne buke.

4.2 Kategorizacija motornih vozila

Pre plasiranja na tržište, ovlašćene laboratorije vrše akustička ispitivanja emisije buke motornih vozila. Metodologija merenja i maksimalne dozvoljene vrednosti nivoa buke regulisani su zakonskim i podzakonskim aktima kako Republike Srbije, tako i Evropske unije. Prema pravilniku o podeli motornih i priključnih vozila i tehničkim uslovima za vozila u saobraćaju na putevima [105], za pojedine kategorije motornih vozila propisani su maksimalno dozvoljeni nivoi buke u stacionarnim uslovima (tabela u prilogu B). Direktivom 70/157/EEC [106], od dana donošenja, 06.02.1970, do poslednje izmene 01.07.2013. godine, definisane su granične vrednosti nivoa buke motornih vozila u pokretu u zavisnosti od njihove godine proizvodnje (tabela 4.1). Zakonskom regulativom propisani su neophodni uslovi da vozilo dobije odgovarajući sertifikat o homologaciji pre plasiranja na tržište, ali ne i obaveza vlasnika vozila da emisiju buke održava u propisanim granicama tokom eksploatacije vozila. Merenje emisije buke tokom tehničkog pregleda obavlja se samo u slučaju da ovlašćeno lice na osnovu subjektivog osećaja proceni da emisija buke premašuje maksimalno dozvoljeni nivo [107].

Na osnovu graničnih vrednosti nivoa buke motornih vozila u pokretu navedenih u tabeli 4.1, može se uočiti da direktiva 70/157/EEC propisuje najnižu graničnu vrednost za putničke automobile, a najvišu za teška teretna vozila čija nosivost premašuje 3,5 t, a snaga motora 150 kW. U odnosu na putničke automobile, za autobuse su definisane nešto veće vrednosti maksimalno dozvoljenih nivoa buke. Za potrebe previđanja saobraćajne buke izvršena je kategorizacija motornih vozila prema kojoj su vozila sa sličnim vrednostima maksimalno dozvoljene buke svrstana u iste kategorije. U tabeli 4.2 prikazane su definisane kategorije motornih vozila. S obzirom da je Direktivom 70/157/EEC propisan širok opseg maksimalno dozvoljenih vrednosti nivoa buke teretnih vozila (od 76 dBA do 91 dBA), prema uvedenoj kategorizaciji, teretna vozila su podeljena u dve kategorije: srednje teška i teška teretna vozila. Treba imati u vidu da u okviru pojedinih kategorija mogu postojati značajne razlike u konstrukciji vozila, pa samim tim i u položaju pojedinih izvora buke (motora, izduvnog sistema i dr.), kao i u emisionim nivoima buke. Međutim, uvođenje većeg broja kategorija otežava prikupljanje podataka o protoku i strukturi saobraćaja, što primenu matematičkog modela čini nedovoljno praktičnom.

Nakon kategorizacije motornih vozila, potrebno je izvršiti merenja ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke drumskog saobraćaja uz prikupljanje poda-

Tabela 4.1: Granične vrednosti nivoa buke motornih vozila u pokretu izražene u dBA [107]

Kategorija vozila	Godina proizvodnje vozila			
	1970-82	1983-89	1990-96	1997-
Vozila za prevoz putnika koja imaju manje od devet sedišta	82	80	77	74
Vozila za prevoz putnika sa više od devet sedišta, masom preko 3,5 t i snagom motora manjom od 150 kW	89	86	81	78
Vozila za prevoz putnika sa više od devet sedišta, masom preko 3,5 t i snagom motora većom od 150 kW	91	88	84	80
Vozila za prevoz putnika koja imaju više od devet sedišta, kao i vozila za prevoz robe, sa masom manjom od 2 t	84	81	78	76
Vozila za prevoz putnika koja imaju više od devet sedišta, kao i vozila za prevoz robe sa masom od 2 t do 3 t	84	81	78	76
Vozila za prevoz tereta sa masom većom od 3,5 t i snagom motora manjom od 75 kW	89	86	81	77
Vozila za prevoz terete čija je masa veća od 3,5 t, a snaga motora između 75 kW i 150 kW	89	86	81	78
Vozila za prevoz terete čija je masa veća od 3,5 t, a snaga motora veća od 150 kW	91	88	84	80

taka o broju vozila i strukturi saobraćajnog toka (u skladu sa definisanim kategorijama), kako bi se na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka procenio faktor uticaja pojedininih kategorija vozila na nivo buke drumskog saobraćaja.

4.3 Merenja nivoa buke drumskog saobraćaja

Laboratorija za buku i vibracije u okviru Fakulteta zaštite na radu Univerziteta u Nišu sprovodi Program monitoringa stanja nivoa buke na teritoriji grada Niša, a u cilju izrade strateških karata buke, procene broja stanovnika ugroženih bukom, kao i planiranja zvučne zaštite [108, 109]. Kontinuirano praćenje nivoa zvučnog pritiska omogućava i uočavanje trenda smanjenja ili povećavanja komunalne buke, a ukazuje i na potrebu za sprovođenjem sistemskih mera

Tabela 4.2: Kategorizacija motornih vozila za potrebe modelovanja buke

Kategorija motornih vozila	Oznaka	Opis kategorije
Motocikli	m	– motorna vozila sa dva točka
Laka motorna vozila	lv	– putnička vozila – putnička vozila sa prikolicom – kombi vozila – kombi vozila sa prikolicom – lako teretno vozilo
Srednje teška teretna vozila	mt	– teretno vozilo - kamion – teretno vozilo - kamion sa prikolicom
Teška teretna vozila	ht	– teško teretno vozilo – tegljač sa polu-prikolicom
Autobusi	b	– gradski autobus – međugradski autobus

za snižavanje nivoa buke. Merenje buke u životnoj sredini vrši se u skladu sa standardima SRPS ISO 1996-1:2010 [110] i SRPS ISO 1996-2:2010 [111].

Eksperimentalni podaci korišćeni u procesu razvoja i validacije matematičkog modela za procenu buke drumskog saobraćaja, dobijeni su merenjima ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke na 18 mernih tačaka, pored gradskih drumskih saobraćajnica, u periodu od 1. januara 2015. do 1. jula 2016. godine. Sva merenja su izvršena tokom petnaestominutnih vremenskih intervala, na odstojanju od sedam do petnaest metara od ose saobraćajnice i pri visini mikrofona od 1,5 m. Merna mesta su odabrana tako da su ispunjeni sledeći uslovi:

- kolovozna površina je glatka, napravljena od asfalta guste granulacije;
- saobraćajnica se može smatrati pravom i bez nagiba;
- između saobraćajnice i mernog mesta ne postoje prepreke prostiranju zvuka;
- merno mesto je dovoljno udaljeno od aerodroma, železničkog saobraćaja, gradilišta, industrijskih postrojenja, tako da se drumski saobraćaj može smatrati jedinim izvorom buke;
- merno mesto je dovoljno udaljeno od raskrsnica, kružnih tokova i semafora, tako da se može pretpostaviti da se vozila kreću konstantnom brzinom.

Merenja nivoa buke izvršena su po suvom vremenu bez padavina i snežnog pokrivača, kao i pri brzini vetra manjoj od 5 m/s. Za određivanje ekvivalentnog nivoa buke korišćeni su Brüel&Kjær prenosni analizatori tipa 2250 i 2260. Karakteristike korišćene merne opreme navedene su u tabeli 4.3. Tokom merenja nivoa buke drumskog saobraćaja sprovedeno je brojanje lakih motornih vozila, srednje teških i teških teretnih vozila, autobusa i motocikala. Za svako od 438 izvršenih merenja, u prilogu D, dati su ekperimentalno dobijeni nivoi buke, kao i prikupljeni podaci o protocima motornih vozila.

Tabela 4.3: Karakteristike merne opreme

	Analizator 2250	Analizator 2260
Proizvođač opreme	Brüel&Kjær	Brüel&Kjær
Godina proizvodnje	2010	2003
Mikrofon	4190	4155
Prečnik mikrofona	1/2 inča	1/2 inča
Frekvencijski opseg mikrofona	6,3–20.000 Hz	4–16.000 Hz
Dinamički opseg mikrofona	14,6–146 dB	14,5–146 dB
Osetljivost mikrofona	50 mV/Pa	50 mV/Pa

4.4 Procena referentnih nivoa buke vozila definisanih kategorija

Kako bi se omogućilo predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke na osnovu podataka o protoku i strukturi saobraćaja, za svaku od definisanih kategorija motornih vozila potrebno je odrediti prosečan nivo buke na referentnom odstojanju d_0 ($d_0 = 7,5$ m) od ose saobraćajnice.

Ekvivalentni nivo buke tokom vremenskog intervala T [s] na referentnom odstojanju od saobraćajnice moguće je izraziti relacijom:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\frac{t_0}{T} \right) + 10 \log \left(\sum_i N_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{AE,i}} \right) \text{ [dBA]}, \quad (4.2)$$

pri čemu su sa i , $i \in \{lv, mt, ht, b, m\}$, označene kategorije motornih vozila, dok je

t_0 – referentni vremenski interval ($t_0 = 1$ s),

$L_{AE,i}$ – prosečan nivo izloženosti buci prilikom prolaska motornog vozila odgovarajuće kategorije (označene sa i),

N_i – ukupan broj vozila odgovarajuće kategorije tokom vremenskog intervala T .

Ako se sa ΔL_i označi razlika prosečnih nivoa buke motornog vozila kategorije i i lakog motornog vozila ($\Delta L_i = L_{AE,i} - L_{AE,lv}$), ekvivalentni A-ponderisani nivo buke drumskog saobraćaja moguće je definisati sledećom relacijom:

$$\begin{aligned}
 L_{Aeq} &= 10 \log \left(\frac{t_0}{T} \right) + 10 \log \left(10^{0,1L_{AE,lv}} \cdot \sum_i N_i \cdot 10^{0,1 \cdot \Delta L_i} \right) \\
 &= L_{AE,lv} + 10 \log \left(\frac{t_0}{T} \right) + 10 \log \left(N_{lv} + \sum_{i,i \neq lv} N_i \cdot a_i \right) \\
 &= L_0 + 10 \log \left(N_{lv} + \sum_{i,i \neq lv} N_i \cdot a_i \right) \\
 &= L_0 + 10 \log (N_{lv} + N_{mt} \cdot a_{mt} + N_{ht} \cdot a_{ht} + N_b \cdot a_b + N_m \cdot a_m)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Pri tom je $L_0 = L_{AE,lv} + 10 \log (t_0/T)$ i označava ekvivalentni A-ponderisani nivo buke na rastojanju d_0 od ose saobraćajnice pri prolasku jednog lakog motornog vozila tokom posmatranog vremenskog intervala T , dok je $a_i = 10^{0,1 \cdot \Delta L_i}$, i može se tumačiti kao ekvivalentan broj lakih motornih vozila kojim se može predstaviti jedno prosečno vozilo kategorije i [112].

U cilju adekvatne procene uticaja pojedinih kategorija motornih vozila na ekvivalentni nivo buke drumskog saobraćaja, parametri modela (L_0 nivo i koeficijenti a_i , $i \in \{mt, ht, b, m\}$) određeni su na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih u okruženju sa zanemarljivom refleksijom zvuka od vertikalnih prepreka, nadomak saobraćajnice koja se može smatrati beskonačno dugačkom, pravom i bez nagiba. Proces optimizacije modela izvršen je primenom PSO algoritma, kao i genetskog algoritma. Korišćene *soft computing* tehnike implementirane su u MATLAB softverskom paketu, a izvorni kod primenjenih algoritama dat je u priložima F, G, H i I.

4.4.1 Primena PSO algoritma

Kako je primenom PSO algoritma potrebno odrediti vrednosti pet parametara (L_0 nivoa i koeficijenata a_{mt} , a_{ht} , a_b i a_m), čestice se kreću kroz petodimenzionalni prostor pretrage u potrazi za optimalnim rešenjem zadatog problema [113]. Za svaki parametar definisan je opseg vrednosti (tabela 4.4),

a time i granice prostora u okviru kojih je očekivano da se nalazi i rešenje optimizacionog problema.

S obzirom na to da je cilj primene PSO algoritma minimiziranje srednje kvadratne greške predviđanja nivoa buke drumskog saobraćaja, funkcija cilja je data izrazom:

$$f = \sum_{i=1}^n \left(L_{Aeq,p}^{(i)} - L_{Aeq,m}^{(i)} \right)^2 / n, \quad (4.4)$$

gde je

n - ukupan broj merenja korišćenih u procesu optimizacije ($n = 75$),

$L_{Aeq,p}^{(i)}$ - vrednost ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke izračunata prema formuli 4.3, a na osnovu podataka o protoku i strukturi saobraćaja prikupljenih tokom i -tog merenja,

$L_{Aeq,m}^{(i)}$ - i -ti rezultat merenja ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke tokom petnaestominutnog vremenskog intervala.

Pseudokod optimizacije rojem čestica prikazan je algoritmom 1. U tabeli 4.5 navedene su vrednosti konfiguracijskih parametara koje su korišćene u procesu optimizacije. Kako bi se sprečila preuranjena konvergencija ka lokalnom optimumu, tokom primenjenog postupka optimizacije vrednost kognitivnog koeficijenta učenja c_1 postepeno je umanjivana (primenom izraza 3.19a), dok je vrednost socijalnog koeficijenta učenja c_2 uvećavana prema formuli 3.19b. Na taj način je podstaknuto pretraživanje prostora u početnim iteracijama PSO algoritma, kao i bolja eksploatacija stečenog znanja tokom završnih iteracija, a samim tim i pronalaženje tačnijeg rešenja. Pošto veće vrednosti koeficijenta inercije w pospešuju istraživanje prostora pretrage, dok manje vrednosti ubrzavaju konvergenciju, u svakoj iteraciji algoritma vrednost koeficijenta inercije je umanjivana primenom jednačine 3.21.

Kako se postupkom inicijalizacije čestice smeštaju na nasumično odabrane pozicije u okviru definisanog prostora pretrage, većom populacijom postiže se bolja pokrivenost prostora, što može rezultovati bržim pronalaženjem kvalitetnijih rešenja. Međutim, sa povećanjem broja čestica produžava se i vreme

Tabela 4.4: Granice prostora mogućih rešenja

L_0 [dBA]	a_{mt}	a_{ht}	a_b	a_m
30 - 60	1 - 30	1 - 30	1 - 30	1 - 30

Algoritam 1 Osnovna struktura primenjenog PSO algoritma

Input: broj čestica S , granice prostora pretrage $(\mathbf{x}_{\min}, \mathbf{x}_{\max})$, ukupan broj iteracija K , PSO parametri: c_1, c_2, δ

Output: globalno najbolje rešenje, tj. vektor \mathbf{g} čiji elementi predstavljaju optimalne vrednosti L_0 nivoa i koeficijenta $a_i, i \in \{2, \dots, 5\}$

```

n ← 5                                \\ broj dimenzija prostora pretrage n = 5

\\* Definisanje graničnih vrednosti brzine *\\
for i ∈ {1, ..., n} do
    vmax[i] ← (xmax[i] - xmin[i]) · δ/2
    vmin[i] ← -vmax[i]
end for

for i ∈ {1, ..., S} do
    \\* Definisanje početnog položaja x[i] i brzine v[i] i-te čestice *\\
    for j ∈ {1, ..., n} do
        x[i][j] ← xmin[j] + (xmax[j] - xmin[j]) · rand()    \\ rand() - funkcija koja
        generiše slučajan broj iz intervala (0,1)
        v[i][j] ← vmin[j] + (vmax[j] - vmin[j]) · rand()
    end for
    bestFitness[i] ← ∞
end for
globalBestFitness ← ∞

\\* U svakoj od K iteracija PSO algoritma menjati položaje čestica u
okviru definisanog prostora pretrage u cilju pronalaženja optimalnog
rešenja *\\
for k ∈ {1, ..., K} do
    for i ∈ {1, ..., S} do
        fitness[i] ← f(x[i])    \\ procena kvaliteta i-tog kandidata za rešenje
        optimizacionog problema primenom kriterijumske funkcije f
        if fitness[i] < bestFitness[i] then
            bestFitness[i] = fitness[i]
            p[i] ← x[i]    \\ memorisanje najbolje pozicije koju je posetila
            i-ta čestica
        end if
        if fitness[i] < globalBestFitness then
            globalBestFitness = fitness[i]
            g ← x[i]    \\ ažuriranje globalno najboljeg kandidata za rešenje
        end if
    end for
end for
    
```

```

 $w \leftarrow w_{start} + (w_{end} - w_{start}) \cdot k/K$                                  $\backslash \backslash w_{start} = 0,9$  i  $w_{end} = 0,4$ 
\* Ažuriranje brzine i položaja čestice                                     *\
for  $i \in \{1, \dots, S\}$  do
  for  $j \in \{1, \dots, n\}$  do
     $\mathbf{v}[i][j] \leftarrow w \cdot \mathbf{v}[i][j] + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (\mathbf{p}[i][j] - \mathbf{x}[i][j]) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (\mathbf{g}[j] - \mathbf{x}[i][j])$ 
     $\mathbf{v}[i][j] \leftarrow \min(\mathbf{v}_{\max}[j], \max(\mathbf{v}_{\min}[j], \mathbf{v}[i][j]))$ 
     $\mathbf{x}[i][j] \leftarrow \mathbf{x}[i][j] + \mathbf{v}[i][j]$ 
     $\mathbf{x}[i][j] \leftarrow \min(\mathbf{x}_{\max}[j], \max(\mathbf{x}_{\min}[j], \mathbf{x}[i][j]))$ 
  end for
end for
end for
end for
    
```

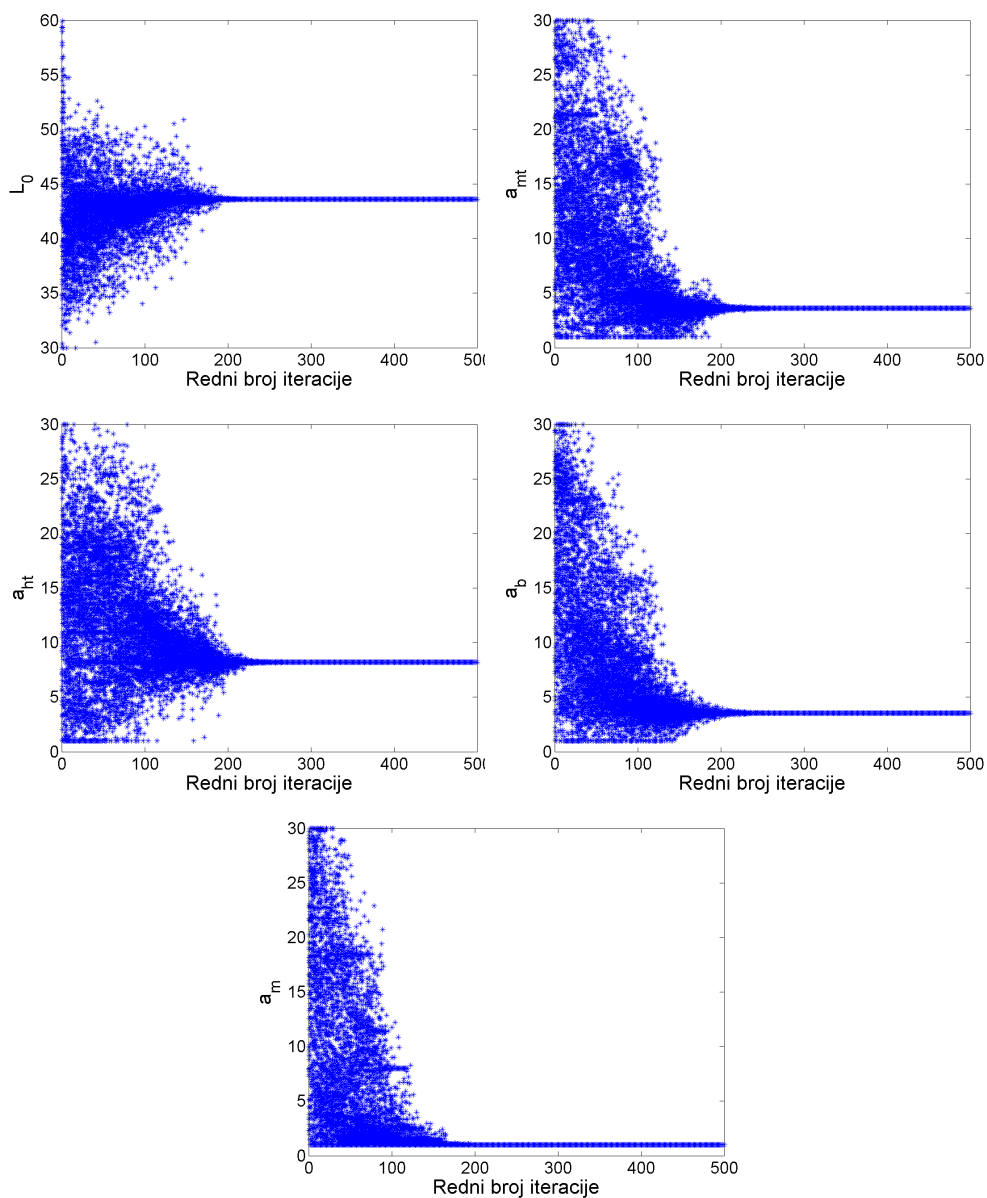
izvršavanja algoritma. Prema pojedinim preporukama roj treba da obuhvata oko 40 čestica [114], dok se za rešavanje složenih problema primenjuje i populacija od 200 jedinki. Iz navedenih razloga, u postupku optimizacije, korišćeni su rojevi koji sadrže 20, 40, 100, kao i 200 čestica. Za svaku od navedenih veličina populacije, postupak optimizacije je ponavljan deset puta. Takođe je primenjivan i PSO algoritam sa topologijom prstena. Svaka primena PSO algoritma u rešavanju zadatog problema minimizacije srednje kvadratne greške predviđanja rezultovala je konvergencijom ka istom optimumu funkcije cilja f , to jest dala je vrednosti parametara navedene u tabeli 4.6.

Na slici 4.1 prikazana je promena položaja čestica u okviru definisanog prostora mogućih rešenja tokom 500 iteracija PSO algoritma. Pri tom, roj obuhvata 40 čestica, a kako bi se sprečila preuranjena konvergencija ka lokalnom minimumu, na kretanje čestice, umesto iskustva čitavog roja, utiče najbolje pronađeno rešenje njenih suseda (susedske veze između čestica roja definisane su topologijom prstena). Svaki od prikazanih grafika odgovara jednoj od dimenzija prostora pretrage, odnosno jednom od pet parametara čije je optimalne vrednosti potrebno odrediti primenom PSO algoritma. Može se uočiti da su postupkom inicijalizacije čestice roja na slučajan način raspoređene u okviru

Tabela 4.5: Konfiguracijski parametri PSO algoritma

Veličina populacije	20 - 200
Maksimalni broj iteracija	500
Koeficijent kognitivnog učenja c_1	2,5 \rightarrow 0,5
Koeficijent socijalnog učenja c_2	0,5 \rightarrow 2,5
Koeficijent inercije w	0,9 \rightarrow 0,4
Parametar δ	0,5

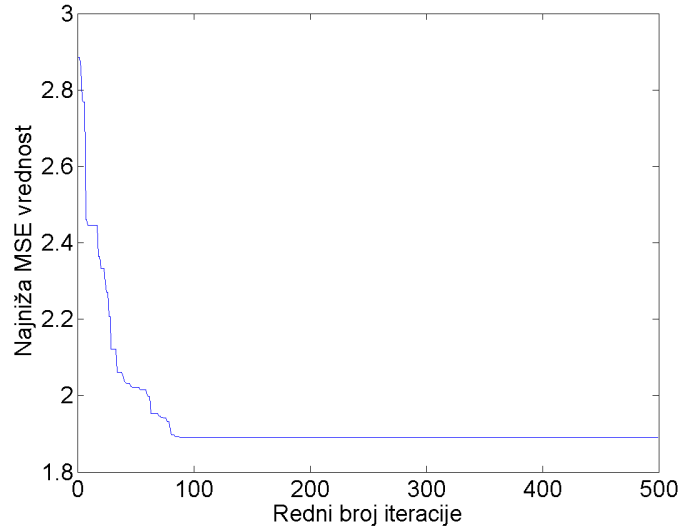
zadatih granica prostora pretrage, kao i da tokom prvih pedesetak iteracija PSO algoritma čestice globalno pretražuju definisani prostor (ravnomoerno pokrivajući gotovo cele opsege od interesa). Sa povećanjem broja iteracija uočava se i konvergiranje roja prema pronađenom rešenju optimizacionog problema. Nakon dvestote iteracije gotovo sve čestice ostaju “zarobljene” u pronađenom optimumu.



Slika 4.1: Kretanje čestica

Na slici 4.2 prikazana je promena srednje kvadratnog odstupanja proračunatih nivoa buke, dobijenih primenom izraza 4.3, od eksperimentalnih rezultata merenja nivoa buke drumskog saobraćaja, tokom 500 iteracija PSO algoritma.

Pri tom su vrednosti L_0 nivoa i koeficijenta a_{mt} , a_{ht} , a_b i a_m određene najkvalitetnijom pozicijom koju je roj do tada pronašao u prostoru mogućih rešenja. Na prikazanom grafiku može se uočiti da je najkvalitetnije rešenje optimizacionog problema pronađeno pre stote iteracije algoritma.



Slika 4.2: MSE najkvalitetnijeg kandidata za rešenje (tokom iteracija PSO algoritma)

Na osnovu dobijenih vrednosti L_0 nivoa i a_i , $i \in \{mt, ht, b, m\}$, koeficijenta (tabela 4.6) mogu se proceniti i prosečne vrednosti ekvivalentnog Aponderisanog nivoa buke na referentnom rastojanju od saobraćajnice prilikom prolaska jednog vozila odgovarajuće kategorije tokom petnaestominutnog vremenskog intervala:

$$L_i = L_0 + 10 \log(a_i) \text{ [dBA]}. \quad (4.5)$$

Dobijene vrednosti prosečnih nivoa buke date su u tabeli 4.7.

Tabela 4.6: Vrednosti parametara

L_0 [dBA]	a_{mt}	a_{ht}	a_b	a_m
43,61	3,62	8,21	3,55	1

Tabela 4.7: Referentni nivoi buke

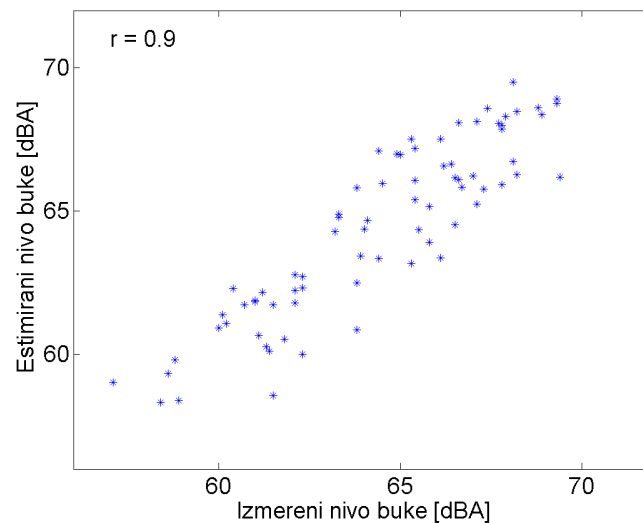
L_{mt} [dBA]	L_{ht} [dBA]	L_b [dBA]	L_m [dBA]
49,2	52,7	49,1	43,6

Nakon što su primenom PSO algoritma dobijeni parametri modela, na osnovu 75 merenja korišćenih u postupku optimizacije, izvršena je statistička analiza

odstupanja izmerenih od proračunatih nivoa buke. Izračunati su srednja vrednost apsolutnog odstupanja izmerenog od izračunatog nivoa ($\overline{\Delta L}$), standardna devijacija odstupanja (σ) i koeficijent korelacije izmerenog i prognoziranog nivoa saobraćajne buke (r). Rezultati statističke analize dati su u tabeli 4.8, a korelacija izmerenih i proračunatih nivoa buke grafički je prikazana na slici 4.3. Na slici 4.4, dat je grafički prikaz vrednosti proračunatih, kao i eksperimentalno određivanih nivoa buke. Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti visok nivo korelacije između izmerenih i prognoziranih nivoa buke, kao i relativno mala vrednost greške predviđanja (uzimajući u obzir činjenicu da ljudsko čulo sluha ne može da uoči promenu nivoa zvuka od 1 dB).

Tabela 4.8: Rezultati statističke analize odstupanja izmerenih od izračunatih vrednosti

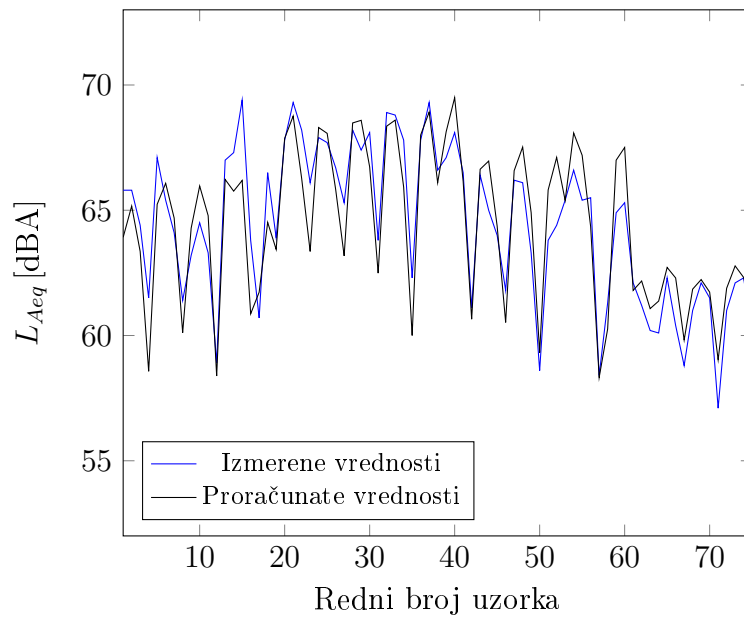
$\overline{\Delta L}$	σ	r
1,13	0,79	0,9



Slika 4.3: Grafički prikaz korelacije izmerenih i proračunatih nivoa buke

4.4.2 Primena genetskog algoritma

Kao i u slučaju primene PSO optimizacije, genetskim algoritmom je potrebno odrediti vrednosti parametara L_0 , a_{mt} , a_{ht} , a_b i a_m tako da se minimizira srednja kvadratna greška predviđanja nivoa saobraćajne buke. Stoga se svaki hromozom sastoji od pet gena čije su granične vrednosti navedene u tabeli 4.4. Kako je u postupku optimizacije korišćen RCGA algoritam (to jest



Slika 4.4: Poređenje proračunatih i izmerenih nivoa buke

realna reprezentacija promenljivih), prilikom generisanja početne populacije jedinki, vrednosti gena su na slučajan način odabrane iz zadatih opsega realnih brojeva. Na taj način se obezbeđuje raznovrstan genetski materijal, što je značajno za sprečavanje preuranjene konvergencije. Kao i u slučaju primene PSO algoritma, većom populacijom jedinki ostvaruje se bolja pokrivenost prostora mogućih rešenja, ali se i produžava potrebno vreme za izvršavanje algoritma. Prema pojedinim preporukama [115], ukoliko je procesom optimizacije potrebno odrediti vrednosti 5 ili manje promenljivih, populacija treba da obuhvati oko 50 jedinki, dok se prilikom rešavanja složenijih problema primenjuju veće populacije koje mogu obuhvatati i do 200 jedinki.

S obzirom na to da je korišćen generacijski genetski algoritam sa elitističkom strategijom, u svakoj iteraciji GA algoritma cela populacija se zamenjuje novim jedinkama, odnosno potomcima prethodne generacije. Primenom elitističke strategije najkvalitetnija jedinka tekuće generacije direktno se prenosi u narednu generaciju (bez izmene genetskog materijala), kako bi se sprečio eventualni gubitak najkvalitetnijeg rešenja zbog procesa ukrštanja i/ili mutacije gena. Kvalitet jedinke/hromozoma procenjuje se primenom funkcije f definisane izrazom 4.4, a kandidat za rešenje kojem odgovara najniža vrednost funkcije f (to jest najmanja vrednost srednje kvadratne greške predviđanja) predstavlja najkvalitetniju jedinku posmatrane generacije.

Kako se u slučaju primene rulet selekcije može uočiti sklonosti algoritma

preuranjenoj konvergenciji, korišćena je turnirska selekcija roditeljskih hromozoma, kao i selekcija bazirana na rangu. Da bi se i manje kvalitetnim jedinkama omogućilo prenošenje genetskog materijala u narednu generaciju, a samim tim i prevazišao problem preuranjene konvergencije ka lokalnom minimumu, u slučaju turnirske selekcije broj učesnika u turniru $N_{tur} = 3$. Prilikom primene selekcije zasnovane na rangu, nakon sortiranja hromozoma (od najlošijeg ka najkvalitetnijem kandidatu za rešenje), na osnovu ranga, to jest pozicije u sortiranom nizu, definiše se verovatnoća odabira roditeljskog hromozoma. Ako je sa S označena veličina populacije, verovatnoća selekcije hromozoma sa rangom i iznosi:

$$p_i = \frac{i}{\sum_{j=1}^S j}. \quad (4.6)$$

Nakon selekcije dva različita roditeljska hromozoma formira se jedan potomak BLX- α ukrštanjem roditeljskih gena ($\alpha = 0,5$). U radu [116] pokazano je da se u slučaju primene RCGA algoritma najkvalitetnija rešenja postižu pri korišćenju BLX- α ukrštanja, pod uslovom da je parametrom $\alpha = 0,5$ (jer se na taj način podstiče globalno pretraživanje prostora mogućih rešenja). Nakon formiranja potomka primenjuje se neuniformna mutacija gena (sa malom verovatnoćom mutacije $p_m = 0,05$) kako bi se u populaciju uneo novi genetski materijal i time (potencijalno) sprečila konvergencija ka lokalnom minimumu. Herera u radu [116] preporučuje korišćenje neuniformne mutacije gena kako bi se u početnim iteracijama algoritma podstaklo globalno pretraživanje prostora, kao i lokalna pretraga tokom završnih iteracija, a samim tim i pronalaženje tačnijeg rešenja.

Proces rešavanja problema optimizacije primenom genetskog algoritma sastoji se od sledećih koraka:

1. Definisanje maksimalnog broja generacija (odnosno iteracija GA algoritma)
2. Definisanje funkcije f čiji je ekstrem potrebno pronaći
3. Definisanje veličine populacije S (tj. broja jedinki/hromozoma)
4. Generisanje početne populacije slučajnim odabirom vrednosti gena
5. Redni broj tekuće generacije $k = 1$
6. Ponavljanje sledećih koraka do ispunjenja kriterijuma za zaustavljanje postupka optimizacije:
 - (a) Procena kvaliteta jedinki primenom funkcije f

- (b) Sortirenje jedinki (od nalošije ka najkvalitetnijoj)
- (c) Prenošnje najkvalitetnije jedinke u narednu generaciju
- (d) Generisanje $S - 1$ potomaka primenom sledećih koraka:
 - i. Selekcija (dve različite roditeljske jedinke) na osnovu ranga
 - ii. Formiranje jednog potomka BLX- α ukrštanje odabranih roditelja
 - iii. Neuniformna mutacija gena
- (e) Redni broj tekuće generacije $k = k + 1$

7. Najprilagođenijom jedinkom aproksimira se traženi ekstrem funkcije f

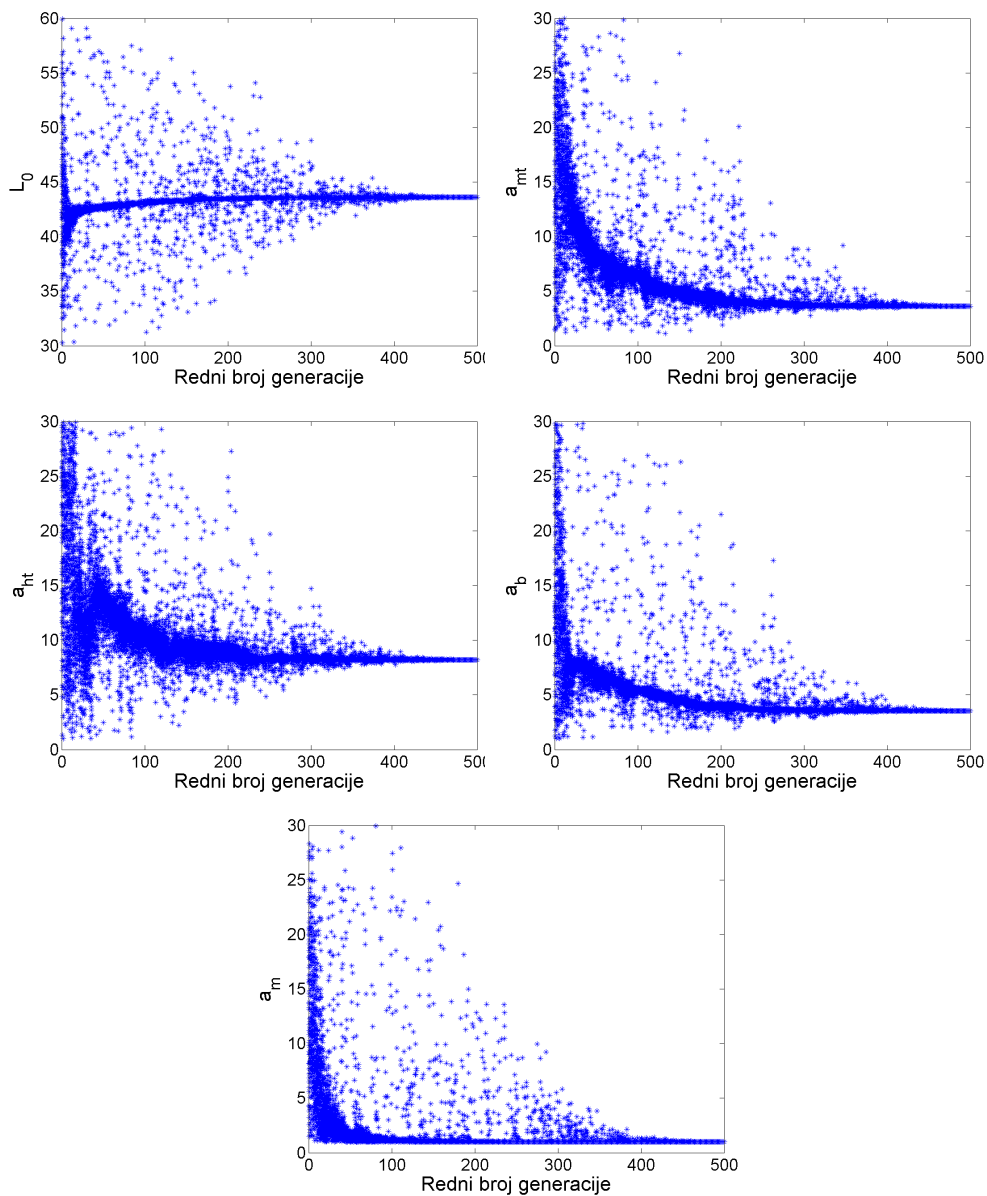
Dostizanje unapred definisanog maksimalnog broja iteracija predstavlja uslov za zaustavljanja postupka optimizacije. Vrednosti pojedinih parametara genetskog algoritma koje su korišćene u procesu optimizacije navedene su u tabeli 4.9.

Tabela 4.9: Parametri primenjenog GA algoritma

Vrsta GA	generacijski GA
Veličina populacije	50/200
Maksimalni broj generacija	500
Reprezentacija gena	realnim brojevima
Selekcija roditeljskih jedinki	selekcija bazirana na rangu
Ukrštanje	BLX- α ($\alpha = 0,5$)
Mutacija	neuniformna ($b = 2$)
Verovatnoća mutacije p_m	0,05

S obzirom na to da se prilikom primene GA algoritma ne može sa sigurnošću znati da li je pronađen lokalni ili globalni ekstrem, proces optimizacije je potrebno ponoviti više puta, tako da se pri svakoj primeni genetskog algoritma na slučajan način generiše nova početna populacija jedinki. Na taj način je moguće proceniti i stabilnost genetskog algoritma, koja se meri prosečnim odstupanjem pronađenog rešenja od najboljeg postignutog rešenja prilikom takvog višestrukog testiranja. Za svaku od definisanih veličina populacije (50 ili 200 jedinki) i svaki od korišćenih metoda selekcije (turnirska selekcija ili selekcija zasnovana na rangu) proces optimizacije je ponavljan po deset puta. Svaka primena genetskog algoritma dala je isto rešenje zadatog problema minimizacije srednje kvadratne greške predviđanja nivoa saobraćajne buke. Pri tom su kao

optimalne vrednosti parametara L_0 , a_{mt} , a_{ht} , a_b i a_m dobijene iste vrednosti kao i pri primeni PSO algoritma (tabela 4.6).

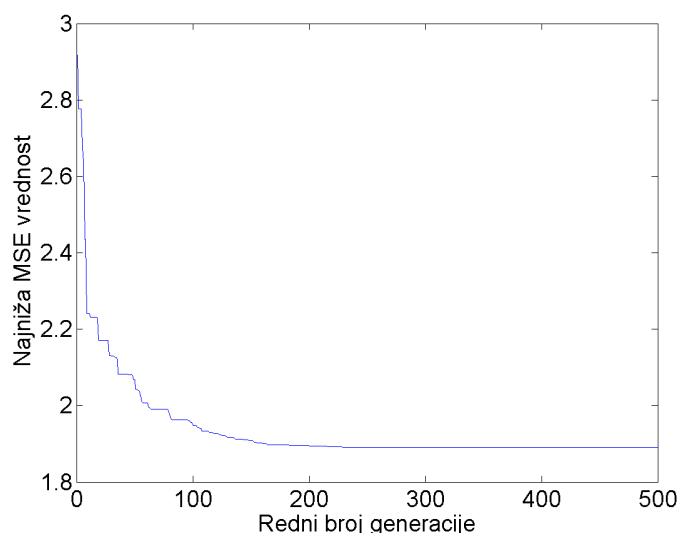


Slika 4.5: Promena vrednosti gena

Promena vrednosti gena, a samim tim i traženih parametara, tokom iteracija genetskog algoritma prikazana je na slici 4.5. Pri tom su vrednosti gena svih hromozoma (jedinki), tokom svake od 500 iteracija algoritma, naznačene plavim zvezdicama. Iako je primenjivana selekcija zasnovana na rangu kako bi se i slabije prilagođenim jedinkama omogućilo učestovanje u reprodukciji (ukrštanju) prilikom formiranja naredne generacije jedinki, i samim tim, u cilju spreča-

vanja preuranjene konvergencije, obezbedio raznovrstan genetski materijal, na osnovu prikazanih grafika može se uočiti da, u odnosu na PSO optimizaciju, genetski algoritam karakteriše manja sklonost ka globalnom pretraživanju prostora mogućih rešenja (s obzirom na to da geni mahom zauzimaju uzak opseg vrednosti).

Na slici 4.6 prikazana je promena vrednosti srednje kvadratne greške predviđanja tokom primenjenog procesa optimizacije. Najkvalitetnije rešenje optimizacionog problema pronađeno je nakon približno dvesta iteracija primenjenog GA algoritma. Dakle, primena PSO optimizacije rezultovala je bržim pronalženjem optimuma funkcije f , kao i bržom konvergencijom ka pronađenom rešenju. Takvi rezultati su očekivani jer je izborom konfiguracijskih parametara PSO algoritma značajnije podstaknuto istraživanju prostora mogućih rešenja, ali i bolja eksploatacija stečenog znanja.



Slika 4.6: MSE najkvalitetnijeg kandidata za rešenje (tokom iteracija GA algoritma)

4.5 Predviđanje buke u urbanom okruženju

Saobraćajni tok se modeluje linijskim izvorom zvuka koji se prostire duž središta saobraćajne trake na visini 0,5 m iznad kolovozne površine. Ukoliko nije poznata raspodela motornih vozila po saobraćajnim trakama, saobraćajnicu je moguće predstaviti jednim linijskim izvorom pozicioniranim na visini 0,5 m iznad njene ose. Druga opcija podrazumeva uvođenje pretpostavke da je raspodela vozila po trakama uniformna. Vrednost ekvivalentnog A-ponderisanog nivo zvuka svakog od definisanih linijskih izvora u zadatoj prijemnoj tački procenjuje

se primenom jednačine 4.1, koju je moguće izraziti na sledeći način:

$$L_{Aeq} = L_{Aeq,0} + \Delta L_d + \Delta L_r + \Delta L_\alpha \text{ [dBA]}, \quad (4.7)$$

gde je

$L_{Aeq,0}$ – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke na referentnom odstojanju d_0 od beskonačnog linijskog izvora saobraćajne buke u otvorenom prostoru bez vertikalnih prepreka,

ΔL_d – korekcija zbog širenja talasnog fronta,

ΔL_r – korekcija zbog refleksije zvuka,

ΔL_α – korekcija za izvor ograničene dužine.

Vrednost $L_{Aeq,0}$ nivoa tokom proizvoljnog vremenskog intervala T [s] izračunava se na osnovu podataka o broju motornih vozila N_i , $i \in \{lv, mt, ht, b, m\}$, tokom datog intervala vremena:

$$L_{Aeq,0} = 43,6 + 10 \log (N_{lv} + 3,6 \cdot N_{mt} + 8,2 \cdot N_{ht} + 3,5 \cdot N_b + N_m) + 10 \log \left(\frac{T_0}{T} \right) \text{ [dBA]}. \quad (4.8)$$

Pri tom je referentni vremenski interval $T_0 = 900$ s.

Kako je razvijeni matematički model namenjen predviđanju saobraćajne buke u naseljenim zonama u kojima opšte ograničenje brzine kretanja vozila iznosi 50 km/h, uticaj brzine motornih vozila na ekvivalentni A-ponderisani nivo buke drumskog saobraćaja nije razmatran. S obzirom na to da primena modela omogućava procenu nivoa buke oko saobraćajnice, a između nizova zgrada koji je okružuju, smatra se da je prijemna tačka dovoljno blizu saobraćajnice da se može zanemariti uticaj meteoroloških uslova, kao i disipacija zvučne energije u vazduhu. Takođe, pretpostavljeno je da je u tipičnom urbanom okruženju teren oko saobraćajnice ravan i tvrd, eventualno sa uskom zonom zelene površine (čiji se uticaj na nivo buke može zanemariti), tako da model ne uključuje dodatnu korekciju zbog karakteristika terena.

Ako se svaka saobraćajna traka predstavlja zasebnim linijskim izvorom, ukupni nivo buke na mestu prijema, L_{Aeq} , dobija se energetske sumiranjem

nivoa buke pojedinačnih izvora:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{Aeq}(i)} \right) \text{ [dBA]}, \quad (4.9)$$

gde je

n – broj saobraćajnih traka,

$L_{Aeq}(i)$ – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke koju generiše saobraćajni tok duž i -te saobraćajne trake (izračunat prema formuli 4.7).

4.5.1 Širenje talasnog fronta

Prilikom udaljavanja talasa od izvora zvuka dolazi do slabljenja nivoa zvuka usled povećanja površine talasnog fronta na kojoj se raspodeljuje emitovana zvučna energija. Kako beskonačni linijski izvor ima cilindrične talasne frontove, intenzitet zvuka je obrnuto srazmeran rastojanju od zvučnog izvora, što za posledicu ima smanjenje nivoa zvuka za 3 dB prilikom udvostručavanja rastojanja od izvora. Kako bi se odredio nivo buke na proizvoljnom rastojanju d [m] od linijskog izvora zvuka, potrebno je odrediti korekciju zbog širenja talasnog fronta primenom sledeće jednačine:

$$\Delta L_d = 10 \log \frac{d_0}{d} \text{ [dB]}, \quad (4.10)$$

pri čemu d_0 označava referentno rastojanje od linije izvora i iznosi 7,5 m.

4.5.2 Refleksija zvuka

Kako je u urbanom okruženju saobraćajnica okružena stambenim objektima i drugim fizičkim preprekama, usled refleksije zvučnih talasa zvučno polje postaje složeno. S obzirom na to da u svaku tačku prostora, pored direktnog zvuka koji najkraćim putem dolazi od zvučnog izvora, dospevaju i refleksije od okolnih objekata, nivo zvuka na mestu prijema predstavlja rezultat superponiranja direktnog talasa i prisutnih refleksija. Refleksiju zvuka moguće je modelovati uvođenjem virtuelnog izvora koji se dobija preslikavanjem realnog linijskog izvora saobraćajne buke u odnosu na ravan refleksije, kao što je prikazano na slici 4.7. Virtuelni izvor predstavlja linijski izvor konačne dužine koji je obuhvaćen uglom čije je teme u tački prijema, a kraci presecaju vertikalne ivice refleksione površine. Nakon uklanjanja refleksione površine, reflektovani talas se modeluje zvučnim talasom kog emituje virtuelni izvor. Kako se jedan deo zvučne energije gubi usled apsorpcije na samoj refleksionoj površini, akustička

snaga virtuelnog izvora zavisi od apsorpcionih karakteristika površine od koje se talas reflektuje i određuje se kao:

$$P'_v = P'(1 - a) = P'\rho, \quad (4.11)$$

gde je

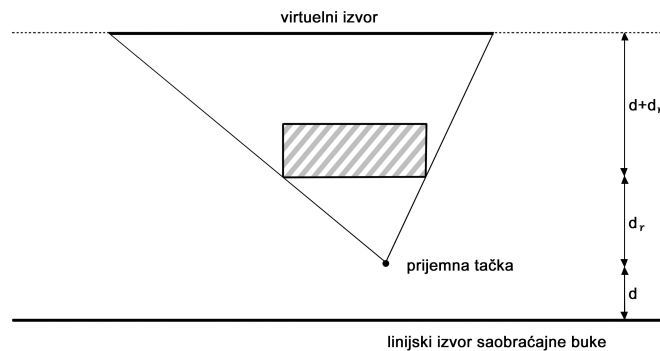
P'_v – podužna zvučna snaga virtuelnog izvora, [W/m],

P' – podužna zvučna snaga realnog izvora, [W/m],

a – koeficijent apsorpcije,

ρ – koeficijent refleksije.

U slučaju potpune refleksije, koeficijent apsorpcije je jednak nuli, pa je snaga virtuelnog izvora jednaka snazi realnog izvora. Međutim, kako uvek postoje određeni disipativni procesi na samoj površini diskontinuiteta (usled trenja molekula i lokalnog prelaska toplote iz vazduha u materijal prepreke od koje se talas reflektuje), realni minimum koeficijenta apsorpcije iznosi 0,02 i to je vrednost koju imaju masivni zidovi [117]. ISO 9613 standardom [14] je preporučeno da se prilikom modelovanja refleksije zvuka od stambenog objekta koristi vrednost koeficijenta refleksije $\rho = 0,8$.



Slika 4.7: Definisanje virtuelnog izvora

Neka P'_v označava podužnu zvučnu snagu virtuelnog linijskog izvora, dok je d_v odstojanje prijemne tačke od virtuelnog izvora. Kako bi se odredio nivo zvuka u proizvoljnoj prijemnoj tački, linijski izvor je moguće predstaviti nizom tačkastih izvora. Liniju izvora je potrebno podeliti na niz elemenata, tako da zvučna snaga elementa dužine dl iznosi $P'_v dl$ (slika 4.8). S obzirom da se emitovana zvučna energija tačkastog izvora ravnomerno raspoređuje po površini

polusfere (jer je izvor zvuka pozicioniran iznad ravnog, tvrdog tla), intenzitet zvuka dI elementa dužine dl koji je na rastojanju r od prijemne tačke iznosi:

$$dI = \frac{P'_v dl}{2\pi r^2}. \quad (4.12)$$

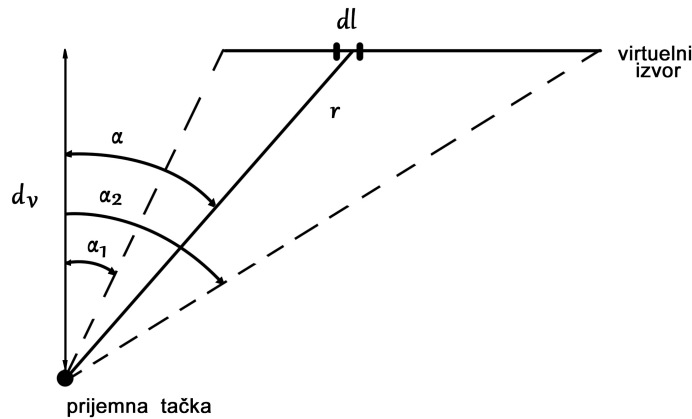
Neka je sa α označen ugao čije je teme u tački prijema, jedan od kraka normalan na liniju izvora, dok drugi krak povezuje posmatrani element i prijemnu tačku. Dužinu dl moguće je izraziti preko priraštaja $d\alpha$ ugla α :

$$dl = \frac{r d\alpha}{\cos \alpha}. \quad (4.13)$$

Kako je $r = d_v / \cos \alpha$, intenzitet zvuka I prikazanog (virtuelnog) linijskog izvora u zadatoj prijemnoj tački iznosi:

$$I = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{P'_v d\alpha}{2\pi d_v} = \frac{P'_v \cdot \alpha_v}{2\pi d_v}, \quad (4.14)$$

pri čemu α_v označava ugao pod kojim se sa mesta prijema vidi virtuelni izvor zvuka ($\alpha_v = \alpha_2 - \alpha_1$).



Slika 4.8: Procena intenziteta zvuka virtuelnog izvora

Može se zaključiti da nivo zvuka linijskog izvora konačne dužine zavisi od njegove podužne zvučne snage, najkraćeg rastojanja između prijemne tačke i linije izvora, kao i ugla α pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi linijski izvor. Ako P' označava podužnu zvučnu snagu realnog linijskog izvora kojim se modeluje saobraćajnica kao izvor buke, α ugao pod kojim iz prijemne tačke

vidi saobraćajnica ($\alpha \leq \pi$), a d odstojanje prijemne tačke od izvora saobraćajne buke, intenzitet direktnog talasa na mestu prijema iznosi:

$$I = \frac{P'\alpha}{2\pi d}, \quad (4.15)$$

pa se na osnovu izraza 4.11, 4.14 i 4.15 može izvesti formula kojom se može proceniti uticaj refleksije na nivo zvuka u proizvoljnoj prijemnoj tački:

$$\Delta L_r = 10 \log \left(1 + \rho \frac{\alpha_v d}{\alpha d_v} \right) \text{ [dB]}. \quad (4.16)$$

Ako je saobraćajnica okružena sa n refleksionih površina, korekcija nivoa buke zbog refleksije zvuka računa se prema formuli:

$$\Delta L_r = 10 \log \left(1 + \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{\alpha_i d}{\alpha d_i} \right) \text{ [dB]}, \quad (4.17)$$

gde je

α_i – ugao pod kojim se iz prijemne tačke vidi virtuelni izvor kojim se modeluje refleksija od i -tog objekta,

ρ_i – koeficijent refleksije i -te refleksione površine,

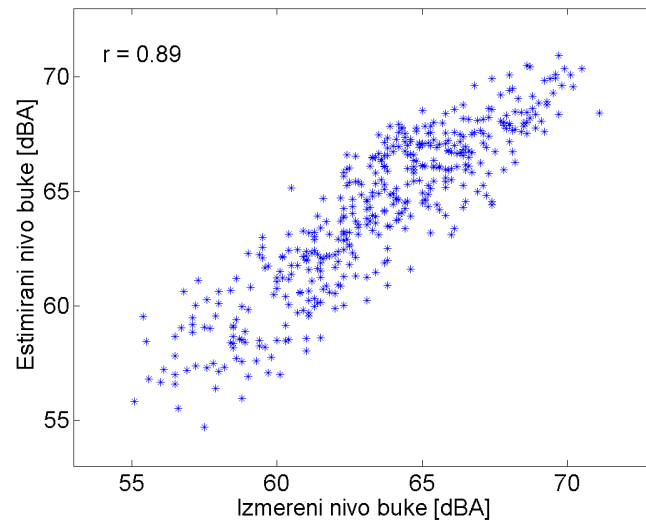
d_i – odstojanje prijemne tačke od i -tog virtuelnog izvora.

S obzirom na to da je intenzitet direktnog talasa na mestu prijema proporcionalan uglu α [rad] pod kojim se sa pozicije prijemne tačke vidi linijski izvor kojim se modeluje saobraćajni tok kao izvor komunalne buke, ukoliko se saobraćajnica ne može smatrati beskonačno dugačkim linijskim izvorom, to jest ako je $\alpha < \pi$, osnovni nivo buke, dat izrazom 4.8, potrebno je korigovati za vrednost:

$$\Delta L_\alpha = 10 \log \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) \text{ [dB]}. \quad (4.18)$$

4.6 Verifikacija i validacija matematičkog modela

Karakteristike formiranog modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja određene su statističkom analizom odstupanja izmerenih od izračunatih vrednosti nivoa buke. Pri tom je za svako od 438 merenja, na osnovu prikupljenih podataka o strukturi drumskog saobraćaja, kao i podataka o udaljenosti od saobraćajnice, ugla pod kojim se sa pozicije mesta prijema vidi osa saobraćajnice i



Slika 4.9: Grafički prikaz korelacije nivoa buke određenih merenjima i izračunavanjima prema predloženom matematičkom modelu

potrebnih informacija o okolnim refleksionim površinama, primenom izraza 4.7 izračunat ekvivalentni A-ponderisani nivo buke drumskog saobraćaja u tački prijema. U tabeli 4.10 navedeni su srednja vrednost apsolutnog odstupanja izmerenog od proračunatog nivoa ($\overline{\Delta L}$), standardna devijacija odstupanja (σ), kao i koeficijent korelacije izmerenog i proračunatog nivoa buke (r). S obzirom da je ljudsko uho u stanju da uoči promenu nivoa buke ukoliko je ona veća od 3 dB, u prikazanoj tabeli dat je i broj predviđanja sa greškom većom od 3 dB (m), kao i vrednost najveće greške predviđanja (ΔL_{max}). Grafički prikaz korelacije izmerenih i izračunatih nivoa buke dat je na slici 4.9. Prosečna greška predviđanja ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke iznosi 1,4 dB, dok je najveće odstupanje izračunatog od izmerenog nivoa 4,2 dB. Oko sedam odsto predviđanja rezultovalo je greškom većom od 3 dB. U okviru oblasti 5.2 izvršeno je poređenje opisanog matematičkog modela sa najčešće korišćenim modelima za predviđanje buke drumskog saobraćaja, uz opširniju diskusiju dobijenih rezultata.

Tabela 4.10: Rezultati statističke analize odstupanja izmerenih nivoa buke od vrednosti dobijenih primenom predloženog matematičkog modela

$\overline{\Delta L}$	σ	m	ΔL_{max}	r
1,4	1,01	31	4,2	0,89

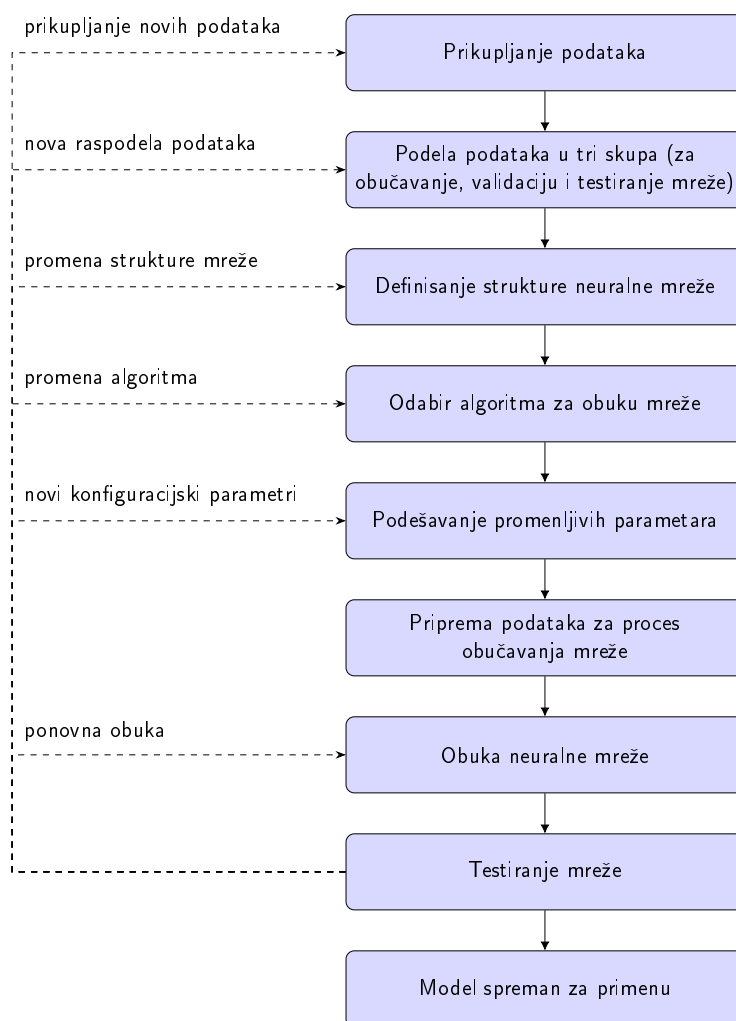
5 Neuralna mreža za predviđanje saobraćajne buke

Veštačke neuralne mreže mogu se smatrati univerzalnim funkcionalnim aproksimatorom, s obzirom da poseduju sposobnost aproksimiranja kompleksnih (nelinearnih) funkcija više promenljivih. Pri tom, one uče iz primera, bez unapred dostupnog znanja o odnosima između promenljivih. Međutim, sam razvoj neuralne mreže nije jednostavan zadatak s obzirom da zahteva pažljivo donošenje niza odluka od kojih će zavistiti sposobnosti sticanja željenog znanja, ali i generalizacije kreirane mreže. Karakteristične faze u ravoju veštačkih neuralnih mreža prikazane su na slici 5.1.

Nakon prikupljanja podataka, potrebno je definisati takozvani trening skup podataka, koji će se u procesu obučavanja mreže koristi za podešavanje težina sinaptičkih veza i vrednosti biasa, kao i test skup podataka koji se primenjuje u evaluaciji sposobnosti predviđanja kreirane mreže. Da bi se izbegao problem “preobučavanja” poželjno je formirati i validacioni skup podataka na osnovu kog se određuje trenutak zaustavljanja procesa obučavanja. Granger [118] predlaže da se barem 20% podataka koristi za testiranje sposobnosti generalizacije kreirane mreže.

Prilikom projektovanja ANN mreže, u zavisnosti od problema koji se rešava, potrebno je definisati adekvatnu topologiju mreže, odnosno odabrati broj ulaznih i izlaznih čvorova (neurona), kao i broja skrivenih slojeva i skrivenih neurona. Neuralna mreža sa linearnim aktivacionim funkcijama, a bez skrivenih čvorova, je ekvivalentna linearnim statističkim modelima. Samo jedan skriveni sloj omogućava veštačkoj neuralnoj mreži da aproksimira proizvoljnu nelinearnu funkciju više promenljivih. U pojedinim radovima [119, 120] je pokazano da korišćenje dva skrivena sloja može doprineti većoj efikasnosti procesa obučavanja

i rezultovati tačnijim predviđanjima.



Slika 5.1: Faze razvoja ANN mreže

Broj skrivenih čvorova utiče na sposobnost učenja, memorisanja i generalizacije ANN mreže. Mreža sa malim (nedovoljnim) brojem čvorova nije u stanju da uči iz primera, dok pak prevelik broj skrivenih čvorova može prouzrokovati “preobučavanje” mreže. Prema pojedinim publikacijama [121, 122], da bi se izbegao problem “preobučavanja”, u slučaju neuralne mreže sa jednim skrivenim slojem, broj skrivenih čvorova ne sme biti veći od $2n$, pri čemu n označava broj ulaznih neurona. Adam Blum u svojoj knjizi [123] navodi da broj skrivenih čvorova treba biti manji od broja ulaznih, a veći od broja izlaznih neurona. U radovima [124–126] je pokazano da se problem “preobučavanja” ANN mreže može prevazići ukoliko se primeni metoda ranog zaustavljanja (eng. *early stopping*), odnosno ako se proces obučavanja mreže prekine nakon dostizanja minimuma

greške na validacionom skupu podataka. U tom slučaju se nakon kreiranja i obuke većeg broja ANN mreža različitih topologija, izvršava uporedno testiranje performansi kreiranih mreža (na primerima koji nisu korišćeni u procesu obučavanja) kako bi se odredio optimalni broj skrivenih neurona.

Iako se različitim čvorovima ANN mreže mogu pridružiti različite aktivacione funkcije, obično se, pri kreiranju veštačke neuralne mreže, čvorovima koji pripadaju istom sloju mreže dodeljuje ista aktivaciona funkcija. Najčešće se kao aktivaciona funkcija skrivenih čvorova koristi unipolarna/bipolarna sigmoidna funkcija, dok se, u zavisnosti od toga da li je ANN mreža namenjena klasifikaciji podataka ili aproksimaciji funkcije, kao aktivaciona funkcija izlaznih čvorova primenjuje sigmoidna, odnosno linearna prenosna funkcija, redom.

Obučavanje neuralne mreže može biti efikasnije ukoliko se izvrši skaliranje/normalizacija ulaznih podataka, kako bi se dobile vrednosti koje su (najčešće) u opsegu $[0,1]$ ili $[-1,1]$. Naime, ukoliko neuroni ANN mreže primenjuju sigmoidnu prenosnu funkciju, velike vrednosti ulaznih podataka usporavaju proces obučavanja, s obzirom da prvi izvod sigmoidne funkcije teži nuli za ekstremno velike vrednosti ulaza. Male vrednosti prvog izvoda rezultuju sporom promenom vrednosti težinskih koeficijenata sinaptičkih veza, čime se i usporava proces učenja. Ako izlazni čvorovi mreže koriste nelinearnu prenosnu funkciju, željene izlazne vrednosti je potrebno skalirati. Čak i kada čvorovi izlaznog sloja primenjuju linearnu prenosnu funkciju skaliranje/normalizacija izlaznih podataka može ubrzati proces obučavanja mreže.

Tokom procesa obučavanja vrednosti biasa i težinskih koeficijenata iterativno se podešavaju u cilju minimiziranja (srednje kvadratne) greške nad trening skupom podataka. U okviru poglavlja 3.3.3.2 objašnjene su najčešće korišćene metode obučavanja, kao i uticaj pojedinih parametara obučavanja na performanse veštačke neuralne mreže.

5.1 Predviđanje nivoa saobraćajne buke primenom ANN mreže

Poput matematičkog modela izloženog u oblasti 4.5, veštačka neuralna mreža treba da omogući predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke oko drumske saobraćajnice u prostoru između nizova stambenih objekata i/ili drugih refleksionih površina koji je okružuju. Takav model bio bi namenjen predviđanju saobraćajne buke u naseljenim zonama u kojima ograničenje brzine kretanja motornih vozila iznosi 50 km/h, u uslovima bez padavina i jakog vetra

(čija brzina premašuje 5 m/s).

Da bi se razvila veštačka neuralna mreža za predviđanje buke drumskog saobraćaja, najpre je potrebno uočiti značajne parametre za prognozu saobraćajne buke koji bi ujedno predstavljali i eksterne ulaze date neuralne mreže. S obzirom na to da nivo buke drumskog saobraćaja zavisi od protoka i strukture saobraćajnog toka, kao i od karakteristika saobraćajnice i okruženja, veštačka neuralna mreža treba da aproksimira funkcionalnu vezu između ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke i sledećih podataka:

- broja lakih motornih vozila N_v , srednje teških teretnih vozila N_{mt} , teških teretnih vozila N_{ht} , autobusa N_b i motocikala N_m , tokom petnaestominutnog vremenskog intervala,
- odstojanja tačke prijema od ose saobraćajnice, d [m],
- odstojanja tačke prijema od niza stambenih objekata i/ili drugih refleksijskih površina pozicioniranih iza tačke prijema, d_1 [m],
- odstojanja tačke prijema od niza stambenih objekata i/ili drugih refleksijskih površina pozicioniranih preko puta mesta prijema (tj. sa druge strane ulice), d_2 [m],
- ugla pod kojim se vidi saobraćajnice sa pozicije prijemne tačke, α_0 [°],
- sume uglova pod kojima se sa mesta prijema vide sve refleksione površine pozicionirane iza tačke prijema, α_1 [°],
- sume uglova pod kojima se sa mesta prijema vide sve refleksione površine pozicionirane preko puta tačke prijema, α_2 [°].

Kreirana *feedforward* neuralna mreža za predviđanje nivoa saobraćajne buke pored ulaznog i izlaznog sloja, sadrži i jedan sloj skrivenih čvorova. Čvorovi skrivenog sloja koriste bipolarnu sigmoidnu funkciju, dok je izlaznom čvoru pridružena linearna prenosna funkcija. Skriveni sloj sadrži osam neurona koji su povezani sa svakim od jedanaest čvorova ulaznog sloja, kao i sa izlaznim čvorom kreirane mreže. S obzirom da skriveni čvorovi koriste bipolarnu sigmoidnu funkciju, kako bi se ubrzao proces obučavanja, izvršene su sledeće transformacije

ulaznih podataka:

$$\begin{aligned}
 N'_c &= N_c / \max(N_c), \quad c \in \{lv, mt, ht, b, m\} \\
 d' &= d_0 / d \\
 d'_1 &= d_0 / (d + 2 \cdot d_1) = d_0 / d_{im,1} \\
 d'_2 &= d_0 / (2 \cdot d_2 - d) = d_0 / d_{im,2} \\
 \alpha'_i &= \alpha_i / 180^\circ, \quad i \in \{0, 1, 2\}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Pri tom je

d_0 – referentno rastojanje ($d_0 = 7.5\text{ m}$), a ujedno i najkraće rastojanje između ose saobraćajnice i pozicije mernog instrumenta prilikom merenja ekvivalentnog nivoa buke drumskog saobraćaja,

$d_{im,1}$ – najkraće rastojanje između prijemne tačke i virtuelnog linijskog izvora koji se vidi pod uglom α_1 sa mesta prijema, a kojim je moguće modelovati refleksiju zvuka od niza stambenih objekata pozicioniranih iza tačke prijema,

$d_{im,2}$ – najkraće rastojanje između prijemne tačke i virtuelnog linijskog izvora koji se vidi pod uglom α_2 sa mesta prijema, a kojim je moguće modelovati refleksiju zvuka od niza stambenih objekata pozicioniranih preko puta tačke prijema.

5.1.1 Obuka veštačke neuralne mreže

Obučavanje ANN mreže izvršeno je primenom Levenberg-Markvartove metode. Da bi se sprečilo “preobučavanje” neuralne mreže primenjena je metoda ranog zaustavljanja obuke. Od 288 rešenih primera, korišćenih u procesu obučavanja mreže, 200 setova podataka (70% svih uzoraka) korišćeno je za podešavanje vrednosti biasa i težina sinapsi, 15% uzoraka za validaciju i zaustavljanje procesa učenja, dok je sposobnost generalizacije ANN mreže testirana na preostalim 44 uzoraka. Da bi se testirala robusnost neuralne mreže izvršeno je pet međusobno različitih podela podataka na skupove za obučavanje, validaciju i testiranje. Podaci su na slučajan način raspodeljeni po zadatim skupovima, a proces obuke je ponavljan po pet puta za svaku od definisanih raspodela podataka, svakog puta sa različitim početnim vrednostima težinskih koeficijenata.

Nakon obučavanja ANN mreže izvršena je statistička analiza odstupanja proračunatih od izmerenih nivoa buke. Izračunate su vrednosti apsolutnog odstupanja izmerenog od izračunatog nivoa ($\overline{\Delta L}$), standardne devijacije odstupa-

nja (σ), koeficijent korelacije izmerenih i proračunatih nivoa buke (r), a određena je i vrednost najveće greške predviđanja (ΔL_{max}), kao i broj predviđanja čija je greška veća od 3 dB (m). Rezultati statističke analize dobijeni za trening skup podataka dati su u tabeli 5.1, dok su, u cilju procene sposobnosti generalizacije mreže, zasebno u tabeli 5.2 prikazani rezultati testiranja ANN mreže na preostalim 88 uzoraka. Rezultati statističke analize dati su zasebno za svaku od pet raspodela podataka, a s obzirom na to da je proces obučavanja ponavljan po pet puta, prikazane su dobijene minimalne i maksimalne vrednosti parametara statističke i korelacione analize. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da kreirane neuralne mreže karakteriše sposobnost sticanja željenog znanja, odnosno aproksimiranja funkcionalnih veza između odabranih ulaznih parametara (koji opisuju saobraćajni tok i okruženje saobraćajnice) i ekvivalentnog nivoa buke. Kako ljudsko uho može uočiti promenu nivoa buke ukoliko je ona veća od 3 dB, dok je promena nivoa zvuka od 1 dB neprimetna, može se zaključiti da neuralna mreža daje dobre rezultate u predviđanju ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke i to ne samo za trening skup podataka, već i kada se primeni na podacima koji nisu korišćeni u procesu učenja, što je i odlika dobre generalizacije. Od 25 kreiranih ANN mreža (međusobno različitih po vrednostima težina sinapsi i biasa, a istih struktura) odabrana je veštačka neuralna mreža čija primena na test skupu podataka rezultuje najmanjom greškom predviđanja i najvećom vrednošću korelacionog koeficijenta. Za odabranu neuralnu mrežu rezultati statističke i korelacione analize dati su u tabeli 5.3.

Tabela 5.1: Statistička i korelaciona analiza - trening set

Raspodela	I	II	III	IV	V
$\overline{\Delta L}_{train}$	0,91 - 0,98	0,95 - 0,98	0,95 - 1,0	0,96 - 1,0	0,93 - 0,96
σ_{train}	0,63 - 0,66	0,68 - 0,7	0,65 - 0,69	0,68 - 0,7	0,68 - 0,69
m_{train}	1	1 - 3	2	1 - 2	2
$\Delta L_{max,train}$	3,1 - 3,4	3,17 - 3,36	3,17 - 3,64	3,1 - 3,21	3,04 - 3,15
r_{train}	0,93 - 0,95	0,93 - 0,94	0,94	0,94	0,94

Na slici 5.2 prikazana je promena srednje kvadratne greške (MSE, *mean squared error*) predviđanja tokom procesa treniranja odabrane neuralne mreže. U svakoj epohi, primenom Levenberg-Markvartove metode, podešavane su vrednosti težinskih koeficijenata i biasa ANN mreže na osnovu trening skupa podataka, a u cilju minimiziranja srednje kvadratne greške predviđanja. Primenom metode ranog zaustavljanja, proces obučavanja neuralne mreže je prekinut na-

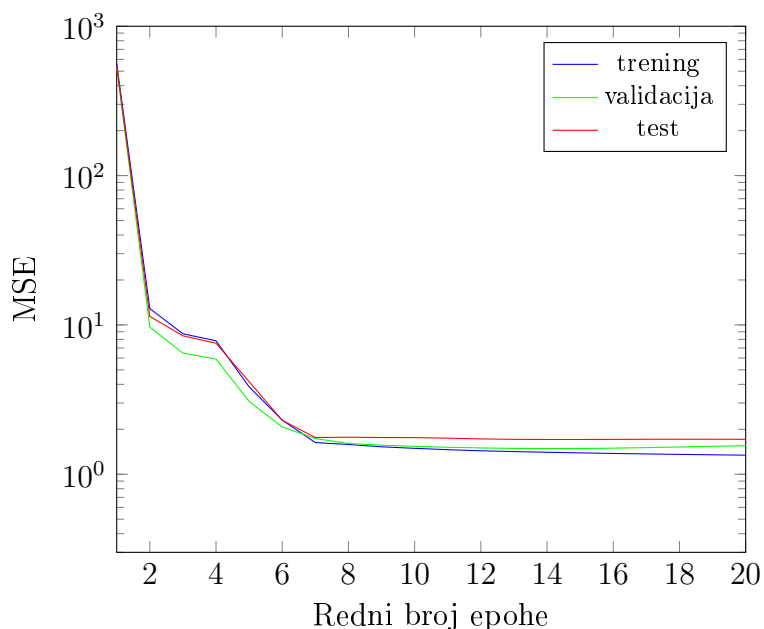
Tabela 5.2: Statistička i korelaciona analiza - test set

Raspodela	I	II	III	IV	V
$\overline{\Delta L}_{test}$	1,11 - 1,14	1,08 - 1,19	1,06 - 1,13	1,06 - 1,08	1,11 - 1,15
σ_{test}	0,73 - 0,76	0,74 - 0,79	0,73 - 0,77	0,68 - 0,7	0,78 - 0,8
m_{test}	1 - 2	1 - 2	0 - 1	1	2 - 3
$\Delta L_{max,test}$	3,14 - 3,52	3,08 - 3,16	2,96 - 3,28	3,16 - 3,29	3,12 - 3,25
r_{test}	0,92	0,91 - 0,92	0,91 - 0,92	0,92	0,92

Tabela 5.3: Statistička i korelaciona analiza - odabrana ANN mreža

	$\overline{\Delta L}$	σ	m	ΔL_{max}	r
Svi uzorci	1,0	0,68	2	3,19	0,93
Trening set	0,97	0,68	1	3,1	0,94
Test set	1,06	0,69	1	3,19	0,92

kon 20 epoha, to jest nakon šest uzastopnih iteracija obučavanja tokom kojih nije uočeno smanjenje MSE greške dobijene za validacioni skup podataka. Najmanja vrednost MSE greške, kako za validacioni, tako i za test set podataka, postignuta je u 14. iteraciji obučavanja, pri čemu je pad vrednosti srednje kvadratne greške predviđanja najizraženiji tokom prvih 7 epoha.



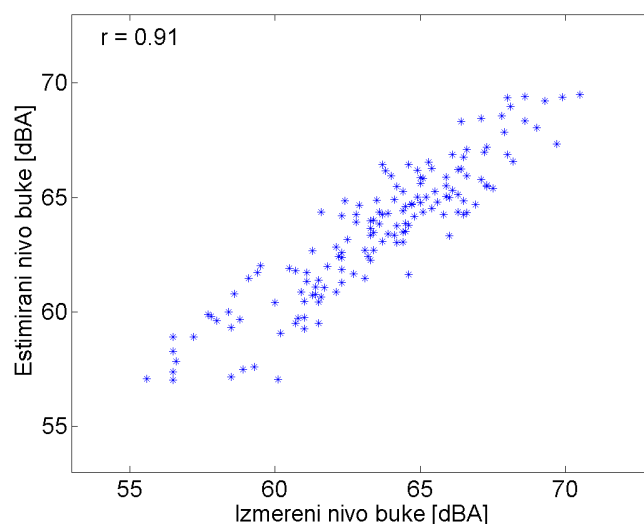
Slika 5.2: Promena srednje kvadratne greške predviđanja tokom iteracija obučavanja neuralne mreže

5.1.2 Testiranje neuralne mreže

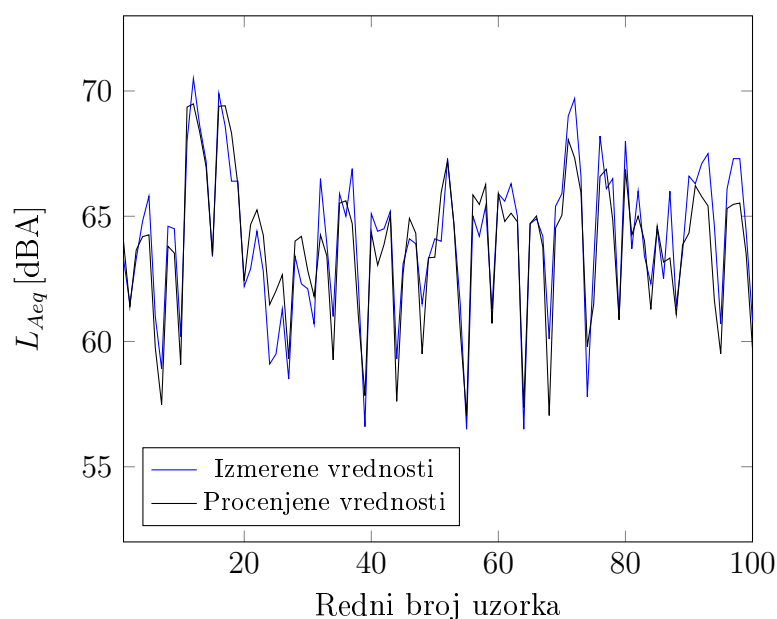
Radi bolje (pouzdanije) procene sposobnosti generalizacije kreirane ANN mreže, izvršeno je testiranje neuralne mreže na skupu od preostalih 150 uzoraka (koji nisu korišćeni u fazi razvoja mreže). Statističkom analizom utvrđeno je da srednje apsolutno odstupanje proračunatog od izmerenog nivoa buke iznosi 1,05 dB, dok je standardna devijacija odstupanja 0,74 dB (tabela 5.4). Rezultati korelacione analize pokazuju visok stepen korelacije između izmerenih i prognoziranih nivoa buke ($r = 0,91$). Korelacija izmerenih i izračunatih nivoa buke grafički je prikazana na slici 5.3, dok je na slici 5.4 dat grafički prikaz vrednosti izmerenih i proračunatih nivoa buke za 100 nasumično odabranih merenja (korišćenih u testiranju ANN mreže). Najveća greška predviđanja iznosi 3,05 dB, a samo jedno predviđanje je rezultovalo greškom većom od 3 dB. Kako su rezultati statističke analize veoma bliski vrednostima dobijenim za trening skup podataka, može se zaključiti da je kreirana mreža sposobna za generalizaciju i dovoljno tačna predviđanja ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke u bliskom okruženju drumske saobraćajnice.

Tabela 5.4: Rezultati testiranja sposobnosti generalizacije ANN mreže

$\overline{\Delta L}$	σ	m	ΔL_{max}	r
1,05	0,74	1	3,05	0,91



Slika 5.3: Grafički prikaz korelacije izmerenih nivoa buke i nivoa buke procenjenih primenom ANN mreže



Slika 5.4: Poređenje nivoa buke procenjenih primenom neuralne mreže i odgovarajućih izmerenih vrednosti

5.2 Poređenje modela za predviđanje saobraćajne buke

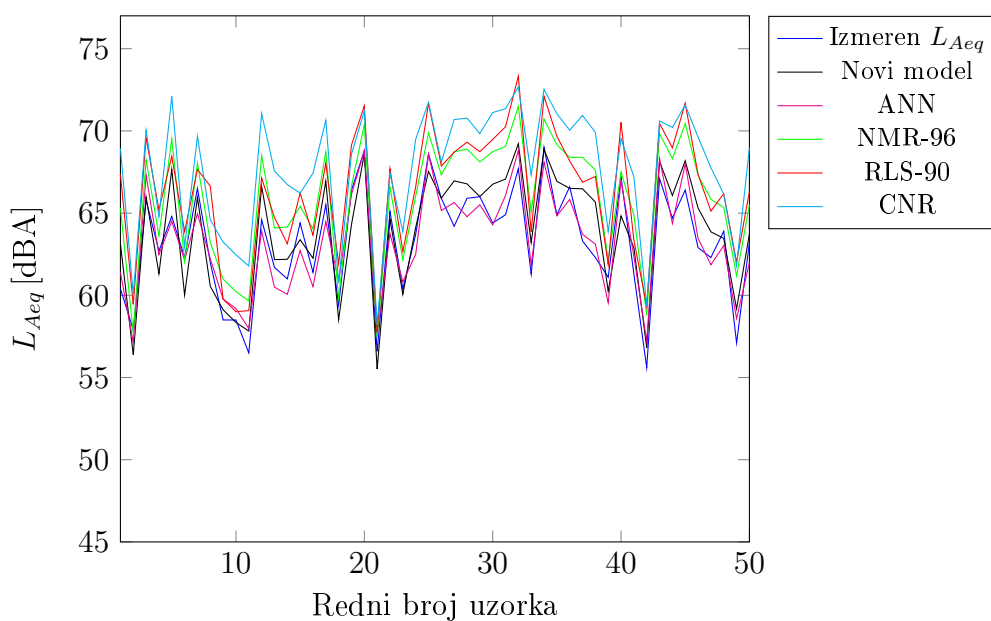
U cilju poređenja novorazvijenih modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja sa najčešće korišćenim modelima za predviđanje nivoa saobraćajne buke, na osnovu prikupljenih podataka o protoku motornih vozila, strukturi saobraćajnog toka i okruženju mernog mesta, izvršena je procena ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke primenom sledećih modela: CNR, RLS-90, NMR-96, kao i Burges, Grifit i Fagoti modela. Dobijeni rezultati su upoređeni sa podacima o izmerenim nivoima buke na mernim mestima na kojima je brojanjem motornih vozila utvrđen protok vozila i struktura saobraćajnog toka, a rezultati statističke analize odstupanja izmerenih od izračunatih nivoa dati su u tabeli 5.5 (pri tom je sa NMM označen matematički model opisan u poglavlju 4.5). S obzirom na to da je od 438 izmerenih nivoa 200 korišćeno za treniranje neuralne mreže, u prikazanoj tabeli zasebno su dati rezultati statističke analize dobijeni za trening skup podataka (označeni sa indeksom “train”), kao i rezultati dobijeni poređenjem preostalih 238 eksperimentalno određivanih nivoa buke sa proračunatim vrednostima (dati rezultati statističke analize označeni su indeksom “test”). Za 50 nasumično odabranih merenja od 238 korišćenih u testiranju ANN mreže, na slici 5.5 grafički je prikazano poređenje rezultata merenja i proračuna nivoa saobraćajne buke. Rezultati prikazani tabelarno i grafički jasno pokazuju da novorazvijeni modeli za predviđanje buke drumskog saobraćaja daju zna-

čajno bolje rezultate predviđanja ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke u bliskom okruženju drumskih saobraćajnica od učestalo korišćenih modela za prognozu saobraćajne buke. Pored značajno manje greške predviđanja, može se uočiti da primena matematičkog modela, opisanog u okviru poglavlja 4.5, kao i kreirane neuralne mreže, rezultuje i značajno manjim brojem predviđanja sa greškom većom od 3 dB. Takvi rezultati su i očekivani, s obzirom na to da su dati modeli formirani na osnovu eksperimentalnih podataka dobijenih merenjem ekvivalentnog nivoa buke oko drumskih saobraćajnica na teritoriji grada Niša. Samim tim, novoformirani modeli za prognozu buke drumskog saobraćaja prilagođeni su karakteristikama i specifičnostima motornih vozila i kolovoznog zastora, kao i navikama i veštini vozača urbane sredine za koju su formirani.

Tabela 5.5: Poređenje modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja

Model	CNR	RLS-90	NMR-96	Burges	Grifit	Fagoti	NMM	ANN
$\overline{\Delta L}$	4,63	2,99	2,72	2,04	5,05	2,59	1,4	1,02
$\overline{\Delta L}_{train}$	4,5	3,05	2,66	2,0	4,93	2,59	1,37	0,97
$\overline{\Delta L}_{test}$	4,74	2,94	2,78	2,07	5,16	2,6	1,42	1,06
σ	1,95	1,56	1,47	1,34	1,55	1,72	1,01	0,7
σ_{train}	2,0	1,65	1,5	1,32	1,58	1,72	1,06	0,68
σ_{test}	1,92	1,48	1,45	1,36	1,52	1,72	0,98	0,72
m	350	213	182	106	393	164	31	3
m_{train}	159	100	77	45	175	77	16	1
m_{test}	191	113	105	61	218	87	15	2
ΔL_{max}	8,8	7,65	6,04	7,87	8,84	8,21	4,2	3,19
$\Delta L_{max,train}$	8,8	7,65	6,04	5,26	8,84	7,44	4,2	3,1
$\Delta L_{max,test}$	8,52	6,95	5,98	7,87	8,39	8,21	3,97	3,19
r	0,84	0,89	0,89	0,89	0,89	0,77	0,89	0,93
r_{train}	0,84	0,88	0,9	0,9	0,89	0,77	0,9	0,94
r_{test}	0,84	0,89	0,89	0,88	0,89	0,78	0,89	0,92

Prikazani rezultati ukazuju da primena neuralne mreže omogućava najtačnija predviđanja saobraćajne buke, najveći stepen korelacije između proračunatih i izmerenih nivoa, kao i ubedljivo najmanji broj predviđanja sa greškom većom od 3 dB ($m = 3$). Takav rezultat može se objasniti činjenicom da je veštačka neuralna mreža u stanju da aproksimira kompleksne funkcionalne veze između ulaznih i izlaznih podataka (na osnovu primera korišćenih u fazi obučavanja mreže), dok je prilikom formiranja matematičkog modela potrebno defi-



Slika 5.5: Poređenje rezultata merenja i proračuna ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke

nisati funkcionalnu zavisnost između pojedinih parametara saobraćajnog toka i ekvivalentnog nivoa buke. Međutim, da bi se mreža adekvatno obučila neophodno je obezbediti znatno više ekperimentalnih podataka nego što je to potrebno za procenu uticaja svake od definisanih kategorija motornih vozila na emisiju saobraćajne buke, a u cilju formiranja matematičkog modela. Naime, da bi se razvio matematički model za predviđanje buke oko drumskih saobraćajnica u skladu sa procedurom opisanom u poglavlju 4.5, dovoljno je izvršiti merenja u okruženju sa zanemarljivim uticajem refleksije (od vertikalnih prepreka). Tako formirani model je primenjiv u urbanim sredinama sa sličnim karakteristikama saobraćajnih vozila i istim tipom (i stanjem) kolovozne podloge. Sa druge strane, kako je prilikom razvoja neuralne mreže prepoznato 11 parametara koji imaju značajan uticaj na ekvivalentni nivo buke oko drumskih saobraćajnica, za obuku neuralne mreže potrebno je obezbediti veću količinu raznovrsnih podataka kako bi se adekvatno procenio uticaj svakog od definisanih parametara na nivo saobraćajne buke. Shodno tome, merenja je potrebno izvršiti i u okruženjima sa značajnom refleksijom zvuka (to jest oko saobraćajnica koje su okružene stambenim objektima), kao i na različitim rastojanjima od ose saobraćajnice. Takođe, za razliku od veštačke neuralne mreže koja se može smatrati svojevrsnom “crnom kutijom”, matematički model pruža jasan uvid u uticaj pojedinih kategorija motornih vozila na ekvivalentni nivo buke drumskog saobraćaja, što može biti značajno u procesu kontrole saobraćajnog

toka, a u cilju smanjenja ugroženosti stanovništva bukom u urbanim okruženjima.

6 Izrada lokalnih mapa buke

Kako bi se omogućila procena zvučnog polja u urbanom okruženju u kome postoje prepreke prostiranju zvuka, kao i više zvučnih izvora, razvijena je metodologija za izradu lokalnih mapa buke na osnovu podataka o izvorima zvuka, topografiji terena, reflektujućim površinama i/ili vertikalnim preprekama. Time je omogućena procena ugroženosti stanovništva bukom, kao i ocena, poređenje i/ili optimizacija različitih rešenja za zaštitu od komunalne buke (kao što su zvučne barijere). U okviru ovog poglavlja opisan je postupak modelovanja saobraćajnice kao izvora buke, kao i modelovanja različitih efekata pri prostiranju zvuka, poput refleksije, difrakcije, disipacije zvučne energije, itd., a u skladu sa međunarodnim ISO 9613 standardom. Opisano je i softversko rešenje za procenu zvučnog polja na otvorenom prostoru, realizovano primenom C++ programskog jezika.

6.1 Modelovanje saobraćajnice kao izvora zvuka

Pod pretpostavkom da saobraćajni tok predstavlja linijski izvor zvuka koji se nalazi iznad reflektujuće ravni (ravnog, tvrdog tla), za svaki segment saobraćajnice (saobraćajne trake), duž kog se protok vozila i struktura saobraćajnog toka mogu smatrati približno konstantnim, moguće je proceniti podužnu zvučnu snagu. Primena izraza 4.8 omogućava da se, na osnovu informacija o protoku vozila i kompoziciji saobraćaja, proceni ekvivalentni A-ponderisani nivo buke $L_{Aeq,0}$ u okruženju bez vertikalnih prepreka, a na rastojanju $d_0 = 7,5$ m od linijskog izvora. Na osnovu $L_{Aeq,0}$ nivoa moguće je odrediti nivo podužne zvučne snage $L_{W'}$ primenom sledeće jednačine [24]:

$$L_{W'} = L_{Aeq,0} + 10 \log d_0 + 5. \quad (6.1)$$

Linijski izvor saobraćajne buke (koji se prostire duž središta saobraćajne trake i na visini 0,5 m od kolovozne površine) potrebno je predstaviti nizom ekvivalentnih tačkastih izvora, pri čemu međusobno rastojanje između susednih izvora zvuka mora biti manje od polovine najkraćeg rastojanja između prijemne tačke i linije izvora i ne sme premašivati 20 m [127]. Nivo akustičke snage tačkastog izvora zvuka, L_W [dBA], moguće je odrediti primenom izraza:

$$L_W = L_{W'} + 10 \log l, \quad (6.2)$$

gde je

$L_{W'}$ – nivo podužne zvučne snage izračunat prema formuli 6.1,

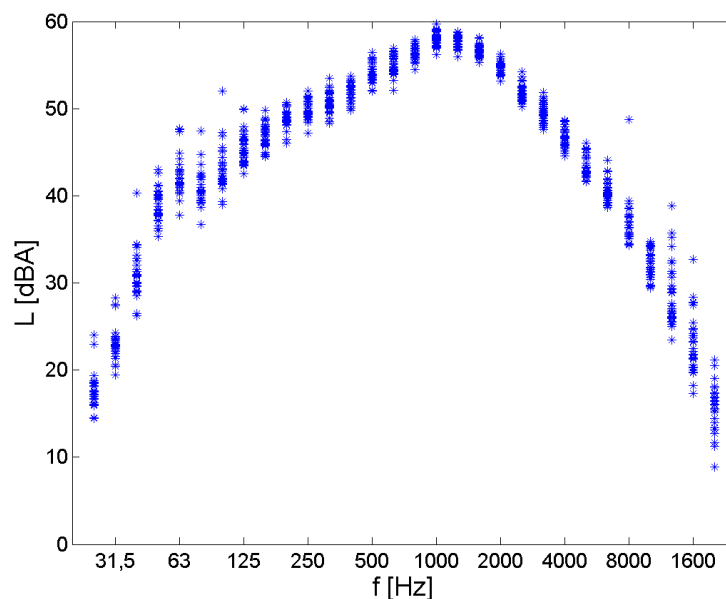
l – rastojanje između susednih tačkastih izvora, izraženo u metrima.

Kako bi se omogućila procena spektralnog sadržaja zvuka, na teritoriji grada Kraljeva izvršeno je trideset merenja tercnog spektra buke drumskog saobraćaja primenom Brüel&Kjær prenosnog analizatora tipa 2270. Eksperimentalna merenja vršena su tokom petnaestominutnih vremenskih intervala pokraj saobraćajnice koja se može smatrati pravom i bez nagiba. Odabrano merno mesto je dovoljno udaljeno od drugih izvora zvuka, pa se drumski saobraćaj može smatrati jedinim izvorom komunalne buke. Takođe, merno mesto je udaljeno od semafora, raskrsnica, pešačkih prelaza, tako da se može pretpostaviti da se motorna vozila kreću konstantnom brzinom u skladu sa opšim ograničenjem brzine kretanja vozila od 50 km/h. Merenja su izvršena po suvom vremenu i pri brzini vetra manjoj od 5 m/s. Rezultati merenja spektralnog sadržaja buke dati su u prilogu C, a izmerene vrednosti nivoa zvučnog pritiska po tercnim frekvencijskim opsezima prikazane su na grafiku 6.1.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata, definisana je raspodela zvučne energije, kako po oktavnim, tako i po tercnim frekvencijskim opsezima. Normalizovani oktavni spektar buke drumskog saobraćaja⁴ pri brzini motornih vozila od 50 km/h dat je u tabeli 6.1, dok je raspodela energije po tercama definisana u okviru priloga E (pri tom je radi poređenja dat i normalizovani terčni spektar saobraćajne buke definisan BS EN 1793-3 standardom [128]).

Nakon definisanja tačkastih izvora buke, primenom ISO 9613 standarda potrebno je odrediti ekvivalentni A-ponderisani nivo zvuka na mestu prijema.

⁴normiranje je izvršeno u odnosu na ukupan nivo buke



Slika 6.1: Prikaz izmerenih trećinsko oktavnih spektara saobraćajne buke

Tabela 6.1: Normalizovani spektar saobraćajne buke

f_i [Hz]	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
L_i [dB]	-34.3	-20.3	-15.8	-11.3	-7.4	-3.7	-6.3	-14.0	-23.6	-36.9

6.2 Primena ISO 9613 standarda

ISO 9613 standard, koji je 1996. godine objavila Međunarodna organizacija za standardizaciju (*International Organization for Standardization*, ISO), utvrđuje inženjersku metodu za proračun slabljenja zvuka prilikom prostiranja zvučnih talasa na otvorenom prostoru, a u cilju predviđanja nivoa buke u životnoj sredini. Primena ISO 9613 standarda omogućava predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke, kao i oktavnog spektra zvuka u frekvencijskom opsegu od 63 Hz do 8 kHz. Ovaj standard je moguće primeniti na gotovo bilo koji izvor komunalne buke uključujući i drumski i železnički saobraćaj, industrijske izvore buke, građevinske mašine, itd. Standard nije primenljiv u predviđanju nivoa buke vazdušnog saobraćaja, kao ni buke koju stvara eksplozija.

Kako bi se proračunao ekvivalentni nivo buke u proizvoljnoj prijemnoj tački, potrebni su sledeći podaci:

- zvučna snaga pojedinačnih izvora⁵ (oktavni spektar ukoliko je poznat),

⁵složene izvore zvuka potrebno je predstaviti skupom tačkastih izvora

- usmerenost izvora,
- karakteristike i geometrija terena,
- pozicije izvora, prijemne tačke i prepreka.

Nakon definisanja tačkastih izvora zvuka, potrebno je odrediti oktavne spektre buke pojedinačnih izvora (u opsegu od 63 Hz do 8 kHz) u zadatoj prijemnoj tački primenjujući formulu:

$$L_f = L_W + D_c - \Delta L \quad (6.3)$$

gde je

L_W – nivo zvučne snage (definisan po oktavama);

D_c – faktor smera izražen u dB čija vrednost zavisi od ugla koji zaklapaju osa izvora i duž koja povezuje izvor i tačku prijema. U slučaju neusmerenog (omnidirekcionog) tačkastog izvora $D_c = 0$;

ΔL – slabljenje pri propagaciji zvučnog talasa od izvora ka prijemnoj tački.

Ukupni A-ponderisani nivo buke na mestu prijema dobija se energetskim sumiranjem nivoa buke pojedinačnih izvora (uključujući i virtuelne izvore kojima se modeluje refleksija):

$$L_{Aeq} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^8 10^{(L_f(ij)+A_f(j))/10} \right] \right\} \text{ [dBA]} \quad (6.4)$$

gde je

n – ukupan broj tačkastih izvora zvuka (realnih i virtuelnih),

j – redni broj (oktavnog) frekvencijskog opsega,

$L_f(ij)$ – nivo buke i -tog izvora u j -tom frekvencijskom opsegu izračunat korišćenjem jednačine 6.3,

$A_f(j)$ – vrednost amplitudske karakteristike A-filtra na centralnoj frekvenciji j -tog oktavnog opsega, [dB].

Ukoliko nije poznata raspodela zvučne energije po oktavama (već samo zvučna snaga izvora buke), slabljenje nivoa zvuka prilikom propagacije zvučnog talasa od izvora ka zadatoj prijemnoj tački izračunava se za oktavni frekvencijski opseg centriran oko 500 Hz.

6.2.1 Slabljenje pri prostiranju zvuka

Prilikom prostiranja zvučnih talasa od izvora zvuka ka mestu prijema, na promenu nivoa buke utiču sledeći efekti:

- širenje talasnog fronta,
- proces disipacije,
- pojava difrakcije oko ivica prepreke,
- refleksija zvuka (od tla i okolnih refleksionih površina),
- apsorpcije zvuka pri prostiranju kroz gustu vegetaciju.

6.2.1.1 Širenje talasnog fronta i disipacija zvučne energije

Slabljenje nivoa zvuka usled širenja talasnog fronta računa se prema formuli:

$$\Delta L_D = \left[20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \text{ [dB]} \quad (6.5)$$

gde d označava rastojanje između izvora i prijemne tačke, izraženo u metrima, dok je d_0 referentno rastojanje ($d_0 = 1 \text{ m}$).

Prilikom udaljavanja zvučnog talasa od izvora zvuka dolazi do procesa disipacije, tj. smanjenja zvučne energije zbog njenog pretvaranja u druge oblike energije. Slabljenje nivoa buke usled disipacije u vazduhu je dato izrazom:

$$\Delta L_{atm} = \alpha d / 1000 \text{ [dB]}, \quad (6.6)$$

gde je sa α [dB/km] označen koeficijent slabljenja čija vrednost zavisi od frekvencije, vlažnosti vazduha i temperature sredine kroz koju se zvuk prostire (pogledati tabelu 6.2).

6.2.1.2 Uticaj tla na nivo buke

S obzirom na to da teren iznad kog se prostire zvuk predstavlja diskontinuitet sredine na kom se javlja refleksija zvuka, ukoliko između izvora i prijemne tačke ne postoji fizička prepreka prostiranju zvuka, ukupni nivo zvuka u tački prijema biće rezultat superponiranja direktnog zvuka i refleksija od tla (kao i od okolnih reflektujućih površina). Kako bi se pri predviđanju nivoa buke uzele u obzir i apsorpcione karakteristike terena, ISO 9613 standardom je definisana korekcija nivoa buke zbog uticaja terena u funkciji faktora G čija vrednost zavisi od poroznosti tla. U slučaju tvrdog, neporoznog tla (beton, asfalt, led, itd.),

Tabela 6.2: Vrednost koeficijent slabljenja nivoa zvuka usled disipacije, α [dB/km], prema ISO 9613 standardu [14]

t [°]	vlažnost [%]	Centralna frekvencija oktavnog opsega [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

faktor $G = 0$, dok je vrednost faktora G za meko, porozno tlo (trava, vegetacija, itd.) jednaka jedinici. Prema ISO 9613 standardu, da bi se procenio uticaj tla na nivo zvuka u tački prijema, najpre je potrebno definisati tri regiona:

- region izvora – prostire se od izvora ka tački prijema u dužini $d_s = \max(30h_s, d_p)$, pri čemu h_s [m] označava visinu izvora u odnosu na tlo, dok je d_p [m] rastojanje između ortogonalnih projekcija tačkastog izvora zvuka i prijemne tačke na ravan terena;
- region prijema – prostire se od tačke prijema ka izvoru zvuka u dužini $d_r = \max(30h_r, d_p)$, pri čemu je h_r [m] visina prijemne tačke u odnosu na površinu tla;
- središnji region – prostire se između regiona izvora i regiona prijema duž linije koja povezuje izvor i prijemnu tačku. Ako je $d_p < (30h_s + 30h_r)$, regioni izvora i prijema se (delimično) preklapaju, tako da središnji region ne postoji.

Potom je za svaki od definisanih regiona potrebno utvrditi prosečnu vrednost faktora G kako bi se, primenom izraza datih u tabeli 6.3, procenio uticaj pojedinih regiona na nivo buke u tački prijema (ΔL_s , ΔL_r i ΔL_m), a zatim i korekcija nivoa buke zbog uticaja terena:

$$\Delta L_{gr} = \Delta L_s + \Delta L_r + \Delta L_m \text{ [dB]}. \quad (6.7)$$

6.2.1.3 Modelovanje difrakcije zvuka

Ukoliko zvučni talasi prilikom prostiranja naiđu na fizičku prepreku (barijeru), oblast iza prepreke dobija zvučnu energiju difrakcijom, to jest savijanjem

Tabela 6.3: Određivanje ΔL_s , ΔL_r i ΔL_m korekcionih nivoa [14]

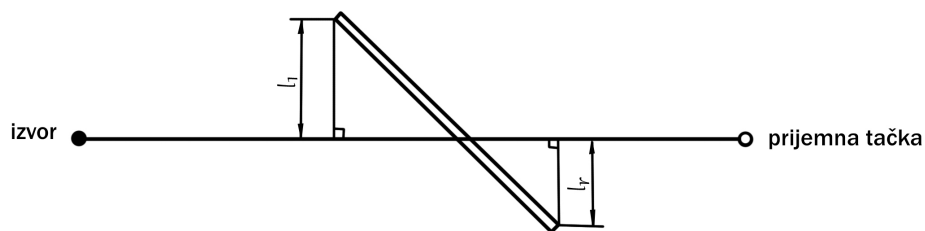
Centralna frekvencija [Hz]	ΔL_s ili ΔL_r [dB]	L_m [dB]
63	-1,5	-3q
125	$-1,5 + G \cdot a(h)$	$-3q(1 - G_m)$
250	$-1,5 + G \cdot b(h)$	
500	$-1,5 + G \cdot c(h)$	
1000	$-1,5 + G \cdot d(h)$	
2000	$-1,5(1 - G)$	
4000	$-1,5(1 - G)$	
8000	$-1,5(1 - G)$	
$a(h) = 1,5 + 3,0e^{-0.12(h-5)^2}(1 - e^{-d_p/50}) + 5,7e^{-0.09h^2}(1 - e^{-2,8 \cdot 10^{-6}d_p^2})$ $b(h) = 1,5 + 8,6e^{-0.09h^2}(1 - e^{-d_p/50})$ $c(h) = 1,5 + 14,0e^{-0.46h^2}(1 - e^{-d_p/50})$ $d(h) = 1,5 + 5,0e^{-0.9h^2}(1 - e^{-d_p/50})$		
Kada se računa ΔL_s : $G = G_s$ i $h = h_s$, dok je pri proračunu ΔL_r vrednosti: $G = G_r$, a $h = h_r$. $q = \begin{cases} 0, & \text{ako je } d_p \leq 30(h_s + h_r) \\ 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}, & \text{inače} \end{cases}$		

zvučnih talasa oko ivica prepreke. Primena ISO 9613 standarda omogućava modelovanje difrakcije talasa oko gornje, kao i oko bočnih ivica fizičke prepreke. Barijera se modeluje kao tanki ravni objekat sa poprečnim presekom u obliku trapeza čije su vertikalne stranice paralelne, dok se prepreke složenijeg oblika mogu predstaviti nizom barijera. Pri tom se smatra da barijera unosi slabljenje nivoa buke u i -tom oktavnog opsegu ako je ispunjen sledeći uslov:

$$\lambda_i < l_l + l_r. \quad (6.8)$$

Sa λ_i [m] je označena talasna dužina (koja odgovara centralnoj frekvenciji i -tog oktavnog opsega), dok l_l [m] i l_r [m] predstavljaju najkraća rastojanja između vertikalnih ivica barijere i duži koja spaja izvor i tačku prijema (slika 6.2).

Ukoliko između izvora i prijemne tačke postoji više prepreka prostiranju zvuka, potrebno je odabrati dve "najizražajnije" (koje najviše zaklanjaju optičku vidljivost između izvora i tačke prijema), a sve ostale prepreke zanemara-



Slika 6.2: Određivanje l_l i l_r rastojanja [14]

riti. Ukupno slabljenje usled postojanja većeg broja prepreka aproksimira se slabljenjem usled difrakcije talasa oko dve “najizražajnije” prepreke.

Kako bi se odredila frekventijska karakteristika slabljenja nivoa zvuka koje unosi barijera, potrebno je primeniti sledeći izraz:

$$\Delta L_B = 10 \log \left(3 + \frac{20}{\lambda_i} C z K_{met} \right) \text{ [dB]}, \quad (6.9)$$

gde je

λ_i – talasna dužina (koja odgovara centralnoj frekvenciji i -tog oktavnog opsega),

z – razlika puteva difraktovanog i direktnog talasa izražena u metrima,

K_{met} – korekcija zbog meteoroloških uslova.

Ako između izvora i prijemne tačke postoji jedna barijera, vrednost parametra C iznosi 1, dok se u slučaju difrakcije talasa oko dve zvučne barijere vrednost parametra C određuje primenom sledeće jednačine:

$$C = \left[1 + \left(\frac{5\lambda_i}{e} \right)^2 \right] / \left[\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda_i}{e} \right)^2 \right]. \quad (6.10)$$

Pri tom je sa e [m] označeno rastojanje između ivica barijera oko kojih se deluje difrakcija talasa.

Meteorološka korekcija K_{met} se računa prema formuli:

$$K_{met} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{A \cdot B \cdot d}{2z}}\right), & \text{difrakcija oko gornje ivice barijere} \\ 1, & \text{difrakcija oko vertikalne ivice} \end{cases} \quad (6.11)$$

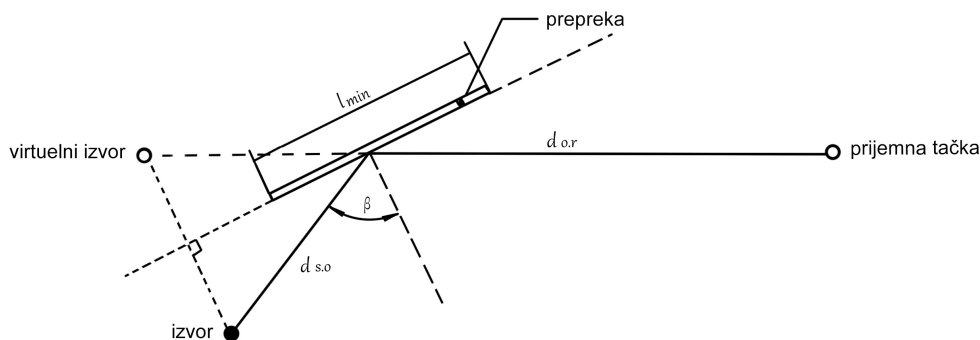
Sa A [m] i B [m] su označena rastojanja izvora i prijemne tačke do gornje ivice (bliže) barijere, respektivno.

Prilikom modelovanja difrakcije talasa oko gornje ivice barijere korekcija zbog uticaja terena $\Delta L_G = 0$ dB.

6.2.1.4 Modelovanje refleksije

Kako bi se modelovala refleksija zvučnih talasa uvodi se virtuelni izvor zvuka koji se pozicionira simetrično u odnosu na ravan refleksije, kao lik u ogledalu realnog izvora zvuka (slika 6.3). Kako se jedan deo zvučne energije gubi usled apsorpcije na refleksionoj površini, nivo zvučne snage virtuelnog izvora $L_{W,im}$ zavisi od koeficijenta refleksije ρ (tabela 6.4):

$$L_{W,im} = L_W + 10 \log(\rho) \text{ [dBA]}. \quad (6.12)$$



Slika 6.3: Modelovanje refleksije zvuka uvođenjem virtuelnog izvora [14]

Uticaj refleksije na nivo zvuka u i -tom oktavnom opsegu se smatra zanemarljivim ako je ispunjen sledeći uslov:

$$1/\lambda_i \leq [2/(l_{min} \cos \beta)^2] [d_{s,o} d_{o,r} / (d_{s,o} + d_{o,r})] \quad (6.13)$$

gde je

l_{min} – manja dimenzija refleksione površine izražena u metrima,

β – upadni ugao izražen u radijanima,

$d_{s,o}$ – rastojanje između izvora i tačke refleksije (tačke preseka refleksione površine i duži koja spaja virtuelni izvor i tačku prijema), izraženo u metrima,

$d_{o,r}$ – rastojanje između tačke refleksije i tačke prijema izraženo u metrima.

Tabela 6.4: Vrednost koeficijenta refleksije ρ prema ISO 9613 standardu [14]

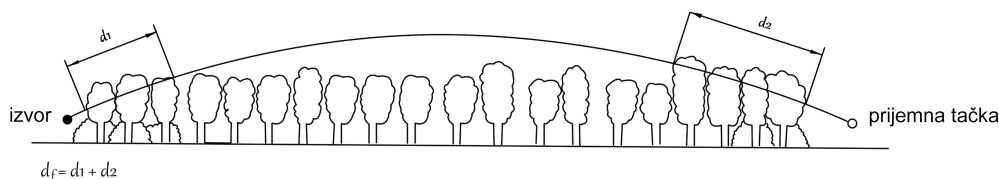
Refleksiona površina	ρ
Tvrd, ravan zid	1,0
Zidovi (stambenih objekata) sa prozorima/terasama	0,8
Zid fabrike čijih se 50% površine čine otvori ili cevi	0,4
Otvorene instalacije (cevi, dimnjaci, itd.)	0,0

6.2.1.5 Umanjenje buke biljnim zasadima

Primena ISO 9613 standarda omogućava procenu slabljenja nivoa zvuka usled prostiranja zvučnih talasa kroz gustu vegetaciju (koja blokira optičku vidljivost između izvora zvuka i tačke prijema). Pri tom se predpostavlja da se zvučni talas prostire duž zakrivljene putanje čiji poluprečnik iznosi 5 km. U tabeli 6.5 date su vrednosti slabljenja koje se mogu postići biljnim zasadima, ΔL_{fol} , pri čemu je sa d_f [m] označena dužina dela putanje koji prolazi kroz biljne zasade (slika 6.4). Ako je $d_f < 10$ m, uticaj vegetacije na nivo zvuka u prijemnoj tački se zanemaruje, a ako je $d_f > 200$ m, slabljenje nivo zvuka ΔL_{fol} je potrebno izračunati za $d_f = 200$ m.

Tabela 6.5: Slabljenje zvuka pri prostiranju kroz gustu vegetaciju [14]

	Centralna frekvencija oktavnog opsega [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Slabljenje [dB], ako je $10 \text{ m} \leq d_f < 20 \text{ m}$	0	0	1	1	1	1	2	3
Slabljenje [dB/m], ako je $20 \text{ m} \leq d_f \leq 200 \text{ m}$	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12



Slika 6.4: Propagacija zvuka kroz gustu vegetaciju [14]

6.3 Softver za izradu lokalnih mapa buke

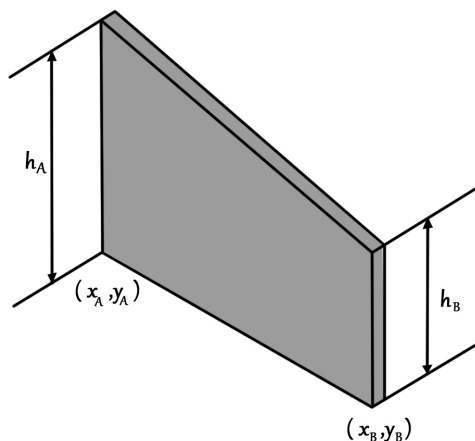
Izrada lokalnih mapa buke omogućava procenu zvučnog polja u okolini jednog ili više izvora buke, a u cilju projektovanja, poređenja, kao i optimizacije različitih rešenja za zaštitu od buke u životnoj sredini. Razvijeni softver za izradu lokalnih karata buke omogućava modelovanje zvučnog polja u otvorenom prostoru u kome postoji više prepreka prostiranju zvuka. Proračun slabljenja zvuka zasniva se na ISO 9613 standardu. Softver predstavlja tehničko rešenje izrađeno u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „Razvoj metodologija i sredstava za zaštitu od buke urbanih sredina“ (akronim urbaNoise) [129, 130].

Prilikom primene razvijenog softverskog paketa, zvučno polje se predstavlja trodimenzionalnom mrežom čvorova (tj. prijemnih tačaka) kojom su obuhvaćeni svi objekti koji utiču na formiranje zvučnog polja, poput izvora zvuka, barijera, refleksionih površina, itd. Mrežni čvorovi pripadaju ekvidistantnim površinama čiji je oblik identičan obliku terena iznad kog se zvuk prostire. U najjednostavnijem slučaju, teren se modeluje horizontalnom ravni, tako da trodimenzionalna mreža ima oblik kvadra čije su stranice paralelne osama Dekartovog koordinatnog sistema. Prijemnička mreža se definiše brojem tačaka duž svake od osa Dekartovog koordinatnog sistema (N_x, N_y, N_z), položajem početne tačke (x_0, y_0, z_0) i koracima između dve tačke duž osa koordinatnog sistema ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$). S obzirom da se neravan teren modeluje krivom površi, zvučno polje se predstavlja sa N_z ekvidistantnih, zakrivljenih slojeva, pri čemu rastojanje između susednih slojeva iznosi Δz . Da bi bilo moguće koristiti program za kreiranje lokalnih mapa buke neophodno je da svaki od slojeva bude predstavljen mrežom tačaka koje formiraju konveksne četvorouglove. Ako pojedini delovi terena predstavljaju prepreke prostiranju zvuka, potrebno ih je modelovati kao zvučne barijere.

Mreža prijemnih tačaka može imati najviše 8192 sloja ($N_z \leq 8192$), dok se površ terena, a samim tim i svaki od slojeva, predstavlja matricom sa najviše 8192 reda i 8192 kolone ($N_x, N_y \leq 8192$). Sa uvedenim ograničenjima zvučno polje se predstavlja sa maksimalno 549.755.813.888 prijemnih tačaka u kojima se proračunava nivo zvuka. Kako bi se omogućilo poređenje eksperimentalnih rezultata sa proračunatim nivoima buke, pored mreže prijemnih tačaka, omogućeno je definisanje do 1024 kontrolne tačke. Svaka kontrolna tačka se opisuje Dekartovim koordinatama (x_i, y_i, z_i) , a položaj kontrolne tačke odgovara položaju mernog mesta.

Izvor buke se predstavlja sa jednim ili više tačkastih izvora zvuka. Svaki od tačkastih izvora je potrebno opisati zvučnom snagom (ili odgovarajućim oktavnim spektrom) i položajem, odnosno koordinatama (x_i, y_i, z_i) u Dekartovom koordinatnom sistemu. U standardnoj verziji programa moguće je definisati do 256 tačkastih izvora (uz mogućnost povećanja maksimalnog broja izvora).

Prepreke prostiranju zvuka modeluju se kao tanki objekti sa trapeznim poprečnim presekom, čije su paralelne stranice vertikalne. Prepreka (barijera) se opisuje visinama h_a i h_b i projekcijama vertikalnih stranica na xy ravan Dekartovog koordinatnog sistema (x_a, y_a) i (x_b, y_b) , kao što je prikazano na slici 6.5. Prepreku složenijeg oblika potrebno je predstaviti nizom barijera trapeznog oblika. U standardnoj verziji programa moguće je definisati do 256 barijera, a omogućeno je i povećanje maksimalnog broja barijera.

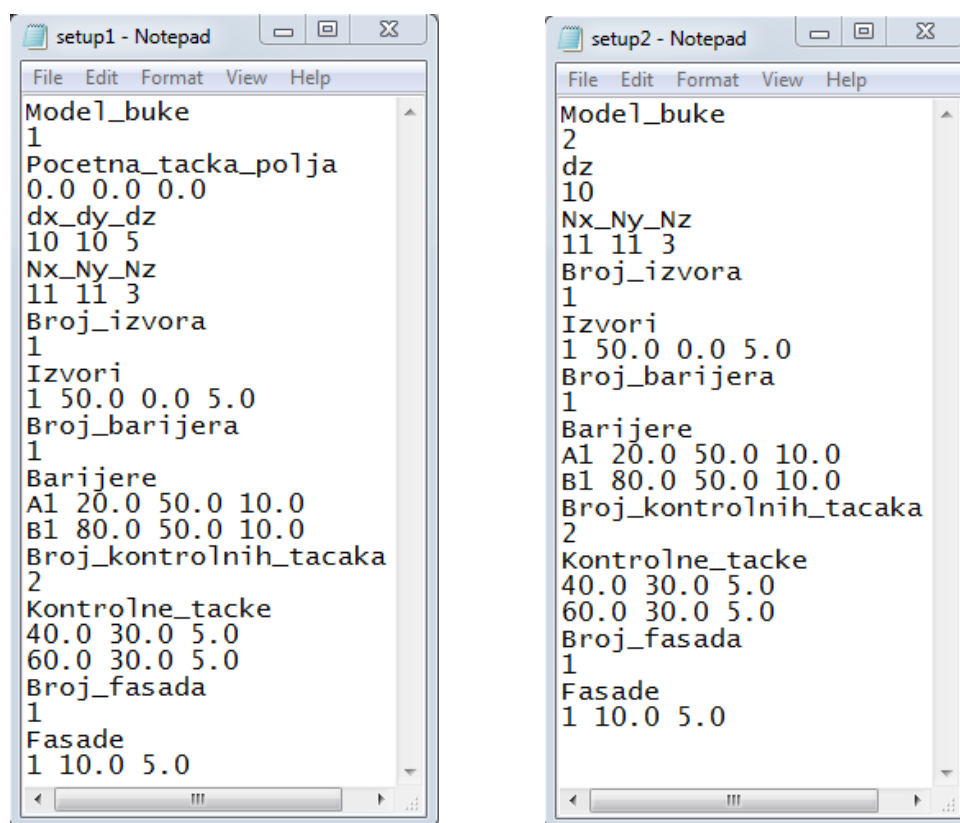


Slika 6.5: Model zvučne barijere [129]

Primenom razvijenog programskog rešenja moguće je proceniti i nivo buke na površini fasade. Fasada se modeluje barijerom na čijoj se površini formira mreža prijemnih tačaka definisanjem horizontalnog (Δd) i vertikalnog (Δz) rastojanja između susednih tačaka mreže. U standardnoj verziji programa moguće je definisati najviše 64 fasade, ali je moguće i povećanje maksimalnog broja fasada.

6.3.1 Upotreba softverskog rešenja

Razvijeni program za mapiranje buke ima tekstualni korisnički interfejs. Ulazni podaci se zadaju u ulaznoj datoteci "setup.dat", dok se izlazni rezultati čuvaju u izlaznoj datoteci "outup.dat" i prikazuju na ekranu računara. Na slikama 6.6 i 6.7 dati su primeri ulaznih datoteka, kao i izlazne datoteke, redom.



(a) ravan teren

(b) neravan teren

Slika 6.6: Ulazna datoteka [129]

U prvoj liniji ulazne datoteke navodi se proizvoljni tekst koji može sadržati više reči spojenih donjim crtama, a koji se koristi kao podsetnik (uobičajeno se navodi "Model_buke"). Naredna linija datoteke sadrži ceo broj čija je vrednost 1 ili 2 u zavisnosti od toga da li je teren iznad kog se zvuk prostire ravan ili

neravan. U slučaju ravnog tla:

- sledeća linija datoteke sadrži proizvoljni tekst koji ima ulogu podsetnika, a čiji je uobičajeni sadržaj “Pocetna_tacka_polja”;
- u narednoj liniji se navode koordinate početne tačke (x_0, y_0, z_0) trodimenzionalne mreže prijemnih tačaka u formatu tri realna broja međusobno odvojena razmacima;
- sledeća linija, kao podsetnik, sadrži proizvoljni tekst (uobičajeno “dx_dy_dz”);
- u narednoj liniji datoteke navode se koraci između tačaka mreže Δx , Δy i Δz u formatu tri realna broja međusobno odvojena razmacima.

Ukoliko je teren neravan:

- kao podsetnik, naredna linija datoteke sadrži proizvoljni tekst u obliku jedne reči (obično “dz”);
- u sledećoj liniji navodi se vertikalno rastojanje između slojeva trodimenzionalne mreže prijemnih tačaka u formatu realnog broja.

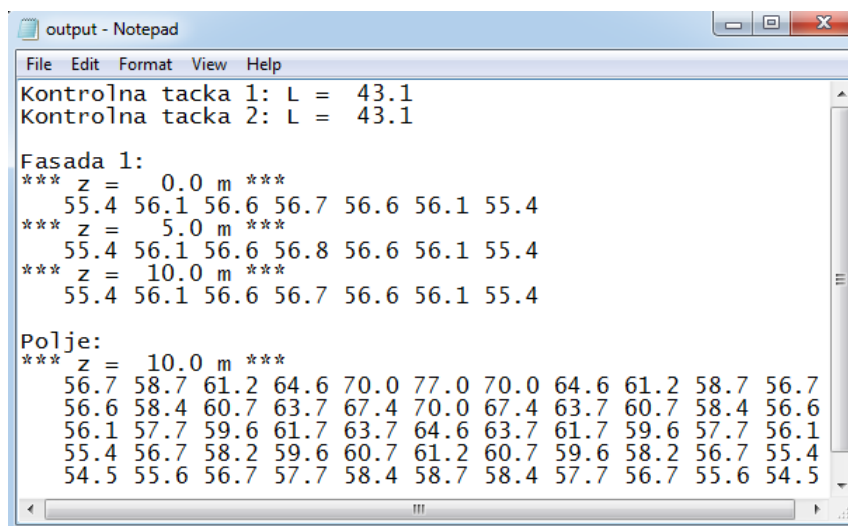
Dalji sadržaj datoteke ima sledeći format:

- naredna linija ima ulogu podsetnika, pa shodno tome sadrži proizvoljni tekst (uobičajeno “Nx_Ny_Nz”);
- u sledećoj liniji datoteke navode se brojevi tačaka duž svake od osa Dekartovog koordinatnog sistema N_x , N_y i N_z u formatu tri realna broja međusobno odvojena razmacima;
- u narednoj liniji se, kao podsetnik, uobičajeno navodi “Broj_izvora”, ali je moguće uneti i proizvoljan tekst u obliku jedna reči;
- sledeća linija sadrži broj izvora (ceo broj, bez decimalne tačke);
- naredna linija se koristi kao podsetnik i uobičajeno sadrži tekst “Izvori”;
- slede linije kojima se opisuju izvori zvuka, pri čemu svaka linija sadrži redni broj izvora (ceo broj, bez decimalne tačke), koordinate izvora (tri realna broja) i nivo zvučne snage (realni broj), međusobno odvojene razmacima;
- naredna linija ima ulogu podsetnika i uobičajeno sadrži tekst “Broj_barijera”;

- sledeća linija sadrži broj barijera (ceo broj, bez decimalne tačke). Ukoliko u okviru posmatranog prostora ne postoje prepreke, potrebno je uneti broj 0;
- u narednoj liniji se kao podsetnik navodi proizvoljni tekst u obliku jedne reči (uobičajeno se navodi tekst “Barijere”);
- slede linije kojima se opisuju barijere (prepreke). Pri tom je svaka barijera opisana sa po dve linije: prva linija sadrži oznaku najviše tačke jednog kraja barijere (uobičajeno, ali ne i obavezno, A1, A2, ...) i njene koordinate, dok druga linija sadrži oznaku najviše tačke drugog kraja barijere (uobičajeno, ali ne i obavezno, B1, B2, ...), kao i koordinate date tačke. Ukoliko ne postoje prepreke prostiranju zvuka, ove linije se izostavljaju;
- naredna linija datoteke sadrži proizvoljni tekst koji ima ulogu podsetnika (uobičajeno “Broj_kontrolnih_tacaka”);
- sledeća linija sadrži broj kontrolnih tačaka (ceo broj, bez decimalne tačke);
- kao podsetnik, naredna linija uobičajeno sadrži tekst “Kontrolne_tacake”;
- slede linije koje sadrže koordinate kontrolnih tačaka u formatu tri realna broja međusobno odvojena razmacima;
- uobičajeni sadržaj sledeće linije je tekst “Broj_fasada”, ali je moguće, kao podsetnik, navesti proizvoljan tekst u obliku jedne reči;
- naredna linija sadrži broj fasada na kojima je potrebno odrediti nivoe buke (ceo broj, bez decimalne tačke);
- sledeća linija, kao podsetnik, uobičajeno sadrži tekst “Fasade_dd_dz”;
- za svaku od fasada se, u narednim linijama datoteke, navodi redni broj barijere kojom se modeluje odgovarajuća fasada (ceo broj, bez decimalne tačke), kao i dva realna broja koji predstavljaju horizontalno (Δd) i vertikalno (Δz) rastojanje između susednih tačaka mreže formirane na površini fasade.

Ukoliko se modeluje zvučno polje iznad neravnog tla, potrebno je opisati teren u okviru datoteke “Polje.dat”. U svakom redu datoteke opisuje se po jedna tačka terena sa tri realna broja koji predstavljaju njene koordinate u Dekartovom koordinatnom sistemu.

Ako je ulaz ispravan, nakon proračuna, program upisuje rezultate u izlaznu datoteku "output.dat". U prvim redovima izlazne datoteke navode se procenjeni nivoi buke u kontrolnim tačkama. Svaki red sadrži redni broj kontrolne tačke, njene koordinate i izračunati nivo buke. Zatim slede nivoi buke na površinama fasada. Pri tom je svaki horizontalni red mreže prijemnih tačaka (formirane na površini fasade) opisan jednim redom u datoteci, kojem prethodi i informacija o visini reda u odnosu na dno fasade. Nakon podataka o nivoima buke na fasadama stambenih objekata sledi prikaz zvučnog polja. Za svaki od slojeva prijemnih tačaka, nakon informacije o visini sloja u odnosu na ravan terena, navode se izračunati nivo buke u formi matrice čije redovi odgovaraju pomeraju po x osi, a kolone pomeraju po y osi.



```
output - Notepad
File Edit Format View Help
Kontrolna tacka 1: L = 43.1
Kontrolna tacka 2: L = 43.1
Fasada 1:
*** z = 0.0 m ***
55.4 56.1 56.6 56.7 56.6 56.1 55.4
*** z = 5.0 m ***
55.4 56.1 56.6 56.8 56.6 56.1 55.4
*** z = 10.0 m ***
55.4 56.1 56.6 56.7 56.6 56.1 55.4
Polje:
*** z = 10.0 m ***
56.7 58.7 61.2 64.6 70.0 77.0 70.0 64.6 61.2 58.7 56.7
56.6 58.4 60.7 63.7 67.4 70.0 67.4 63.7 60.7 58.4 56.6
56.1 57.7 59.6 61.7 63.7 64.6 63.7 61.7 59.6 57.7 56.1
55.4 56.7 58.2 59.6 60.7 61.2 60.7 59.6 58.2 56.7 55.4
54.5 55.6 56.7 57.7 58.4 58.7 58.4 57.7 56.7 55.6 54.5
```

Slika 6.7: Izlazna datoteka [129]

7 Zaključak

Drumski saobraćaj predstavlja dominantni izvor komunalne buke u urbanim sredinama. Procenjuje se da je oko 68 miliona stanovnika Evropske unije izloženo povišenim nivoima saobraćajne buke koji remete miran san i uzrokuju negativne efekte po psihofizičko zdravlje ljudi. U cilju smanjenja emisije saobraćajne buke, zakonskim aktima Evropske unije propisane su maksimalno dozvoljene vrednosti nivoa buke motornih vozila. Da bi ispunili propisane uslove o graničnim vrednostima emisije buke, proizvođači vozila ulažu u razvoj novih tehnologija koje će omogućiti smanjenje buke motornih vozila (ali samo u onoj meri koja je neophodna za zadovoljenje propisanih uslova, s obzirom da razvoj i primena novih tehnologija značajno povećavaju troškove proizvodnje). Da bi doneti zakonski propisi dali odgovarajuće rezultate potreban je duži vremenski period kako bi se postojeći vozni park zamenio novim vozilima. Međutim, kako se zakonskom regulativom ne obavezuju vlasnici motornih vozila da emisiju buke održavaju u okviru propisanih granica, čak i sa zadržavanjem voznog parka nije realno očekivati značajno smanjenje ekvivalentnog nivoa saobraćajne buke. Iz navedenih razloga, odgovarajući model za predviđanje buke drumskog saobraćaja predstavlja nezamenljivi alat u procesu zaštite od komunalne buke čija primena omogućava procenu ugroženosti stanovništva bukom, kao i kontrolu ukupne emisije buke motornih vozila kroz upravljanje saobraćajnim tokom.

U dostupnoj literaturi brojni autori ponudili su veliki broj matematičkih modela koji predviđaju saobraćajnu buku sa različitom tačnošću i koji se međusobno razlikuju po parametrima koje uzimaju u obzir. U poglavlju 2 ovog rada, nakon opisa često korišćenih matematičkih modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja, izvršeno je poređenje izloženih modela i uočene su značajne razlike u vrednostima prosečnih nivoa buke motornih vozila. Takav rezultat je moguće objasniti činjenicom da je svaki od modela dobijen na osnovu

eksperimentalnih podataka, pa je shodno tome prilagođen karakteristikama i specifičnostima voznog parka i putnog zastora urbane sredine za koju je razvijen (kao i navikama i veštini vozača). Stoga se i nameće zaključak da postojeće modele treba veoma obazrivo primenjivati u drugim sredinama. U okviru ove disertacije je pokazano da se primenom često korišćenih modela za predviđanje saobraćajne buke dobijaju vrednosti koje značajno odstupaju od eksperimentalno izmerenih nivoa buke oko drumskih saobraćajnica na teritoriji grada Niša. Kako u Republici Srbiji ne postoji zvaničan model za predviđanje i analizu buke drumskog saobraćaja, kao jedan od doprinosa ove doktorske disertacije razvijen je novi matematički model za predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke oko drumskih saobraćajnica u urbanim sredinama. U poglavlju 4 ovog rada, opisane su sve faze razvoja matematičkog modela, počevši od prepoznavanja značajnih kategorija vozila koje karakteriše različiti uticaj na emisiju saobraćajne buke, preko merenja ekvivalentnog nivoa zvuka uz prikupljanje podataka o protoku vozila i sastavu saobraćajnog toka, pa do određivanja faktora uticaja pojedinih kategorija vozila na nivo saobraćajne buke.

Većina dostupnih modela ocenjuje nivo buke na osnovu informacija o protocima lakih i teških motornih vozila. Kako bi se omogućilo detaljnije modelovanje saobraćajnice kao izvora zvuka, a samim tim i tačnija predviđanja nivoa buke, definisano je pet kategorija motornih vozila: laka motorna vozila, autobusi, motocikli, srednje teška i teška teretna vozila. Kategorizacija motornih vozila je izvršena na osnovu graničnih vrednosti nivoa buke motornih vozila propisanih Direktivom 70/157/EEC. Iako u okviru pojedinih kategorija mogu postojati značajne razlike u emisionim nivoima buke, prilikom kategorizacije vozila vođeno je računa o tome da se podaci o protoku i strukturi saobraćaja mogu lako prikupiti kako bi i primena modela bila dovoljno praktična.

Većina dostupnih modela zasniva se na uspostavljanju funkcionalne zavisnosti između ekvivalentnog nivoa buke i dva ili tri značajna parametra kojima se opisuje protok i sastav saobraćaja. Pri tom se funkcionalna veza najčešće dobija primenom regresione analize. Međutim, kako je ovom disertacijom uvedena složenija kategorizacije motornih vozila, regresiona analiza ne predstavlja dovoljno pouzdan alat za formiranje odgovarajućeg modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja. Sa druge strane *soft computing* tehnike su pogodne za rešavanje problema koji nemaju egzaktno rešenje, pri čemu omogućavaju pronalženje približnih rešenja u razumnom vremenskom roku i pri tom su tolerantne na nepreciznosti i nesigurnosti ulaznih parametara. S obzirom da *soft computing* tehnike omogućavaju razvoj višeparametarskih modela, njihovom prime-

nom procenjen je uticaj svake od pet definisanih kategorija motornih vozila na nivo saobraćajne buke i uspostavljena je funkcionalna veza između ekvivalentnog nivoa buke i parametara koji opisuju protok vozila i sastav saobraćajnog toka. Radi poređenja različitih *soft computing* tehnika optimizacija modela izvršena je primenom PSO algoritma, kao i primenom genetskog algoritma, a na osnovu eksperimentalnih podataka (izmerenih ekvivalentnih A-ponderisanih nivoa buke i prikupljenih podataka o protocima motornih vozila). S obzirom da primena korišćenih algoritama može rezultovati pronalaženjem lokalnog optimuma, proces optimizacije je ponavljan više puta, a menjani su i konfiguracijski parametri algoritama. Svaka primena kako PSO algoritma, tako i GA algoritma, u rešavanju zadatog problema minimizacije srednje kvadratne greške predviđanja rezultovala je pronalaženjem istog rešenja. Pri tom je uočeno da PSO algoritam karakteriše veća sklonost ka globalnom pretraživanju prostora mogućih rešenja, a samim tim i brže pronalaženje optimuma.

Kako bi se omogućilo predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa saobraćajne buke na proizvoljnom rastojanju od saobraćajnice u okruženju sa izraženim uticajem refleksije, definisani su i odgovarajući korekcionni faktori za procenu uticaja širenja talasnog fronta, refleksije zvuka, kao i određenih karakteristika saobraćajnice na nivo buke na mestu prijema. Kako je predloženi matematički model razvijen na osnovu eksperimentalnih podataka prikupljenih merenjem buke oko drumskih saobraćajnica grada Niša, on realno odražava specifičnosti saobraćajnog toka i drumske infrastrukture na teritoriji ovog grada. Razvijeni model moguće je prilagoditi okruženju sa drugačijom strukturom vozila i karakteristikama saobraćajnice, pri čemu je potrebno izvršiti kalibraciju modela na osnovu eksperimentalnih podataka, a u skladu sa metodologijom za procenu uticaja pojedinih kategorija vozila na ekvivalentni nivo zvuka, opisanom u poglavlju 4 ove disertacije.

Nešto drugačiji pristup modelovanju saobraćajne buke omogućen je primenom veštačkih neuralnih mreža. Nakon definisanja ulaznih parametara (tj. značajnih parametara za prognozu buke drumskog saobraćaja), kreirana je višeslojna *feedforward* neuralna mreža za predviđanje ekvivalentnog A-ponderisanog nivoa buke oko drumske saobraćajnice u urbanom okruženju. Kako bi se sprečilo preobučavanje mreže primenjen je metod ranog zaustavljanja obuke.

Validacija i verifikacija razvijenog matematičkog modela i kreirane neuralne mreže izvršene su statističkom analizom odstupanja izmerenih od izračunatih nivoa buke, kao i korelacionom analizom ovih nivoa, a na osnovu eksperimentalnih podataka koji nisu korišćeni za razvoj pomenutih modela. Urađena je i

uporedna analiza rezultata dobijenih primenom predloženih modela, kao i nekih od najčešće korišćenih modela za predviđanje buke drumskog saobraćaja. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da razvijeni modeli daju pouzdane rezultate koje karakteriše visok stepen korelativnosti sa eksperimentalnim rezultatima merenja buke. Takođe, primena predloženih modela rezultuje značajno manjom greškom predviđanja u odnosu na ostale analizirane modele. Dobijeni rezultati ukazuju da ANN mreža omogućava najtačnija predviđanja ekvivalentnog nivoa buke drumskog saobraćaja. Međutim, da bi neuralna mreža adekvatno aproksimirala funkcionalnu zavisnost između ekvivalentnog nivoa buke i značajnih parametara za prognozu saobraćajne buke i samim tim stekla željenu sposobnost generalizacije, potrebno je obezbediti znatno više eksperimentalnih podataka za obuku mreže nego što je to potrebno za kreiranje matematičkog modela prema postupku opisanom u poglavlju 4 ovog rada. Takođe, razvijeni matematički model pruža jasan uvid u uticaj svake od definisanih kategorija motornih vozila na ekvivalentni nivo saobraćajne buke, za razliku od veštačke neuralne mreže koju je moguće smatrati svojevrsnom “crnom kutijom”.

Novoformirani modeli predstavljaju značajan alat za predviđanje buke u procesu izrade idejnih projekata stambenih naselja, prilikom planiranja novih saobraćajnica ili proširivanja postojećih, kao i izmene režima saobraćaja na postojećoj mreži. Takođe, njihova primena omogućava detektovanje zona koje su najogruženije bukom drumskog saobraćaja i uočavanje potrebe za primenom određenih mera i/ili sredstava za zaštitu od buke. Razvojem ovih modela omogućena je i procena efekata primene određenih mera za upravljanje saobraćajnim tokom na smanjenje emisije saobraćajne buke (poput zabrane prometa pojedinih kategorija vozila ili smanjenje protoka motornih vozila).

Kako bi se omogućila procena zvučnog polja u okruženju sa vertikalnim preprekama prostiranju zvuka, u okviru ove disertacije formulisana je i metodologija za izradu lokalnih karata buke, pri čemu je definisan postupak modelovanja saobraćajnice kao izvora zvuka, kao i procene slabljenja nivoa zvuka prilikom propagacije zvučnih talasa od izvora ka mestu prijema. Razvijeno je i softversko rešenje za izradu lokalnih karata buke, koje je realizovano korišćenjem C++ programskog jezika. Dati doprinos je značajan za procenu ugroženosti stanovništva bukom, a samim tim i prepoznavanje potrebe za primenom pojedinih mera ili sredstava za zaštitu od komunalne buke. Takođe, omogućeno je projektovanje, poređenje, kao i optimizacija različitih rešenja za zaštitu stanovništva od povišenih nivoa zvuka u životnoj sredini.

Literatura

- [1] <http://www.zavodks.co.rs/izvestaji/buka>.
- [2] Aslak Fyhri and Ronny Klæboe. Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health—a structural equation model exercise. *Environment International*, 35(1):91–97, 2009.
- [3] Sandra Pirrera, Elke De Valck, and Raymond Cluydts. Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health. *Environment international*, 36(5):492–498, 2010.
- [4] E Öhström and R Rylander. Sleep disturbance by road traffic noise—a laboratory study on number of noise events. *Journal of Sound and Vibration*, 143(1):93–101, 1990.
- [5] Marcel AJ Theebe. Planes, trains, and automobiles: the impact of traffic noise on house prices. *The Journal of Real Estate Finance and Economics*, 28(2-3):209–234, 2004.
- [6] EU Directive. Directive 2002/49/ec of the european parliament and the council of 25 june 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*, 189(12):0012–0026, 2002.
- [7] Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini. *Sl. glasnik RS, br. 36/2009 i 88/2010*.
- [8] Pravilnik o metodama merenja buke, sadržini i obimu izveštaja o merenju buke. *Sl. glasnik RS, br.72/2010*.
- [9] Pravilnik o sadržini i metodama izrade strateških karata buke i načinu njihovog prikazivanja javnosti. *Sl. glasnik RS, br.80/2010*.
- [10] Pravilnik o metodologiji za izradu akcionih planova. *Sl. glasnik RS, br.72/2010*.
- [11] Pravilnik o metodologiji za određivanje akustičnih zona. *Sl. glasnik RS, br.72/2010*.

- [12] Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini. *Sl. glasnik RS, br.75/2010*.
- [13] P De Vos and G Licitra. Noise maps in the european union: An overview. *Noise Mapping in the EU: Models and Procedures*, 13:285–310, 2012.
- [14] International Organization for Standardization. *ISO 9613-2 : Acoustics - Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors: Parte 2, General method of calculation*. ISO, 1996.
- [15] RH Bolt, SJ Lukasik, AW Nolle, and AD Frost. Handbook of acoustic noise control wadc technical report. *Wright Air Development Center*, pages 52–204, 1952.
- [16] Campbell Steele. A critical review of some traffic noise prediction models. *Applied acoustics*, 62(3):271–287, 2001.
- [17] DR Johnson and EG Saunders. The evaluation of noise from freely flowing road traffic. *Journal of Sound and Vibration*, 7(2):287IN1289–288309, 1968.
- [18] J Quartieri, NE Mastorakis, G Iannone, C Guarnaccia, S D’ambrosio, A Troisi, and TLL Lenza. A review of traffic noise predictive models. In *Recent Advances in Applied and Theoretical Mechanics, 5th WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics (MECHANICS’09) Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain December*, pages 14–16, 2009.
- [19] MA Burgess. Noise prediction for urban traffic conditions—related to measurements in the sydney metropolitan area. *Applied Acoustics*, 10(1):1–7, 1977.
- [20] ID Griffiths and Frederick John Langdon. Subjective response to road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1):16–32, 1968.
- [21] C Fagotti and A Poggi. Traffic noise abatement strategies: The analysis of real case not really effective. In *Proc. of 18th International Congress for Noise Abatement*, pages 223–233, 1995.
- [22] UK Department of Transport. *Calculation of road traffic noise*. H.M.S.O., 1988.

- [23] Bundesminister für Verkehr. *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-90*. Forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen, 1990.
- [24] Momir Praščević and Dragan Cvetković. *Buka u životnoj sredini. Fakultet zaštite na radu, Niš*, 2005.
- [25] GB Cannelli, K Glück, and S Santoboni. A mathematical model for evaluation and prediction of the mean energy level of traffic noise in italian towns. *Acta Acustica united with Acustica*, 53(1):31–36, 1983.
- [26] A Cocchi, A Farina, and G Lopes. Modelli matematici per la previsione del rumore stradale: verifica ed affinamento del modello cnr in base a rilievi sperimentali nella città di bologna. *Atti del*, 19, 1991.
- [27] Hugo Lyse Nielsen. *Road traffic noise: Nordic prediction method*. Number 525. Nordic Council of Ministers, 1997.
- [28] Timothy M Barry and Jerry A Reagan. *Fhwa highway traffic noise prediction model*. Technical report, 1978.
- [29] A Part. *Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping*. 2003.
- [30] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353, 1965.
- [31] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 100:9–34, 1999.
- [32] Laurene V Fausett. *Fundamentals of neural networks*. Prentice-Hall, 1994.
- [33] Simon Haykin. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR, 1994.
- [34] John H Holland. *Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [35] Rainer Storn and Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4):341–359, 1997.

- [36] Marco Dorigo and Gianni Di Caro. Ant colony optimization: a new metaheuristic. In *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, volume 2, pages 1470–1477. IEEE, 1999.
- [37] Russell Eberhart and James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, pages 39–43. IEEE, 1995.
- [38] Xin-She Yang and Suash Deb. Cuckoo search via lévy flights. In *Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009. World Congress on*, pages 210–214. IEEE, 2009.
- [39] Xin-She Yang. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, pages 65–74, 2010.
- [40] Čarls Darvin. *Postanak vrsta*. Nolit, 1900.
- [41] Kenneth Alan De Jong. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. 1975.
- [42] Lashon Booker. Improving search in genetic algorithms. *Genetic algorithms and simulated annealing*, pages 61–73, 1987.
- [43] David E Goldberg and John H Holland. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99, 1988.
- [44] Kenneth A De Jong and William M Spears. Using genetic algorithms to solve np-complete problems. In *ICGA*, pages 124–132, 1989.
- [45] Lawrence Davis. Handbook of genetic algorithms. 1991.
- [46] David Beasley, David R Bull, and Ralph Robert Martin. An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals. *University computing*, 15(2):56–69, 1993.
- [47] David Beasley, David R Bull, and Ralph Robert Martin. An overview of genetic algorithms: Part 2, research topics. *University computing*, 15(4):170–181, 1993.
- [48] Deniz Yuret. *From genetic algorithms to efficient optimization*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

- [49] M Čangalović. Opšte heuristike za rešavanje problema kombinatorne optimizacije. u: *Kombinatorna optimizacija: Matematička teorija i algoritmi, str*, pages 320–350, 1996.
- [50] AE Eiben. Genetic algorithms+ data structures= evolution programs: Z. michalewicz. springer, berlin, 1996, (appeared in 1992), 387 pp.(hardcover), 68 figures, 36 tables, price dm 58, 1997.
- [51] Heinz Mühlenbein. Genetic algorithms. 1997.
- [52] V Filipović. Predlog poboljšanja operatora turnirske selekcije kod genetskih algoritama. *Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet*, 1998.
- [53] Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998.
- [54] J Kratica. Paralelizacija genetskih algoritama za rešavanje nekih np-kompletnih problema. *Doktorska disertacija, Matematički fakultet, Beograd*, pages 229–239, 2000.
- [55] Cezary Z Janikow and Zbigniew Michalewicz. An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms. In *ICGA*, pages 31–36, 1991.
- [56] Alden H Wright et al. Genetic algorithms for real parameter optimization. *Foundations of genetic algorithms*, 1:205–218, 1991.
- [57] Heinz Mühlenbein and Dirk Schlierkamp-Voosen. Predictive models for the breeder genetic algorithm i. continuous parameter optimization. *Evolutionary computation*, 1(1):25–49, 1993.
- [58] Nicholas J Radcliffe. Equivalence class analysis of genetic algorithms. *Complex systems*, 5(2):183–205, 1991.
- [59] JD Schaer and L Eshelman. Real-coded genetic algorithms and interval schemata. *foundations of genetic algorithms-2-*, d. whitley, ed, 1993.
- [60] Yousef Shafahi and Mehdi Bagherian. A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(1):52–67, 2013.

- [61] Anna Rakitianskaia and Andries P Engelbrecht. Training neural networks with pso in dynamic environments. In *Evolutionary Computation, 2009. CEC'09. IEEE Congress on*, pages 667–673. IEEE, 2009.
- [62] Gang Xu, Zhi-tao Yang, and Guo-dong Long. Multi-objective optimization of mimo plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5):521–531, 2012.
- [63] Jun-qing Li and Yu-xia Pan. A hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for solving fuzzy job shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–14, 2013.
- [64] Fan Wang, Ligui Luo, Xing-shi He, and Yan Wang. Hybrid optimization algorithm of pso and cuckoo search. In *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on*, pages 1172–1175. IEEE, 2011.
- [65] Pratyay Kuila and Prasanta K Jana. Energy efficient clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Particle swarm optimization approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 33:127–140, 2014.
- [66] Yuhui Shi and Russell C Eberhart. Empirical study of particle swarm optimization. In *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, volume 3, pages 1945–1950. IEEE, 1999.
- [67] Yuhui Shi and Russell Eberhart. Parameter selection in particle swarm optimization. In *Evolutionary programming VII*, pages 591–600. Springer, 1998.
- [68] Asanga Ratnaweera, Saman K Halgamuge, and Harry C Watson. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8(3):240–255, 2004.
- [69] Yuhui Shi and Russell Eberhart. A modified particle swarm optimizer. In *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, pages 69–73. IEEE, 1998.

- [70] Russell C Eberhart and Yuhui Shi. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In *Evolutionary Computation, 2001. Proceedings of the 2001 Congress on*, volume 1, pages 94–100. IEEE, 2001.
- [71] Jianbin Xin, Guimin Chen, and Yubao Hai. A particle swarm optimizer with multi-stage linearly-decreasing inertia weight. In *Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on*, volume 1, pages 505–508. IEEE, 2009.
- [72] Yong Feng, Gui-Fa Teng, Ai-Xin Wang, and Yong-Mei Yao. Chaotic inertia weight in particle swarm optimization. In *Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC'07. Second International Conference on*, pages 475–475. IEEE, 2007.
- [73] Jagdish Chand Bansal, PK Singh, Mukesh Saraswat, Abhishek Verma, Shimpi Singh Jadon, and Ajith Abraham. Inertia weight strategies in particle swarm optimization. In *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*, pages 633–640. IEEE, 2011.
- [74] A Nikabadi and M Ebadzadeh. Particle swarm optimization algorithms with adaptive inertia weight: A survey of the state of the art and a novel method. *IEEE journal of evolutionary computation*, 2008.
- [75] Reza Firsandaya Malik, Tharek Abdul Rahman, Siti Zaiton Mohd Hashim, and Razali Ngah. New particle swarm optimizer with sigmoid increasing inertia weight. *International Journal of Computer Science and Security*, 1(2):35–44, 2007.
- [76] Kyriakos Kentzoglanakis and Matthew Poole. Particle swarm optimization with an oscillating inertia weight. In *Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 1749–1750. ACM, 2009.
- [77] M Senthil Arumugam and MVC Rao. On the performance of the particle swarm optimization algorithm with various inertia weight variants for computing optimal control of a class of hybrid systems. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2006, 2006.
- [78] W Al-Hassan, MB Fayek, and SI Shaheen. Psosa: An optimized particle swarm technique for solving the urban planning problem. In *Computer*

- Engineering and Systems, The 2006 International Conference on*, pages 401–405. IEEE, 2006.
- [79] Hui-Rong Li and Yue-Lin Gao. Particle swarm optimization algorithm with exponent decreasing inertia weight and stochastic mutation. In *Information and Computing Science, 2009. ICIC'09. Second International Conference on*, volume 1, pages 66–69. IEEE, 2009.
- [80] Guimin Chen, Xinbo Huang, Jianyuan Jia, and Zhengfeng Min. Natural exponential inertia weight strategy in particle swarm optimization. In *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, volume 1, pages 3672–3675. IEEE, 2006.
- [81] Yue-lin Gao, Xiao-hui An, and Jun-min Liu. A particle swarm optimization algorithm with logarithm decreasing inertia weight and chaos mutation. In *Computational Intelligence and Security, 2008. CIS'08. International Conference on*, volume 1, pages 61–65. IEEE, 2008.
- [82] John J Hopfield. Artificial neural networks. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 4(5):3–10, 1988.
- [83] Srđan Milenković. *Veštačke neuronske mreže*. Zadužbina Andrejević, 1997.
- [84] Alexander I Galushkin. *Neural networks theory*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [85] John A Hertz, Anders S Krogh, and Richard G Palmer. *Introduction to the theory of neural computation*, volume 1. Basic Books, 1991.
- [86] Sandhya Samarasinghe. *Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition*. CRC Press, 2016.
- [87] <https://owlcation.com/stem/Structure-of-a-Neuron>.
- [88] Warren S McCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4):115–133, 1943.
- [89] Mohamad H Hassoun. *Fundamentals of artificial neural networks*. MIT press, 1995.

- [90] Alexander Borst, Martin Egelhaaf, and HS Seung. Two-dimensional motion perception in flies. *Neural computation*, 5(6):856–868, 1993.
- [91] ML Minsky and S Papert. *Perceptrons: An essay in computational geometry*, 1969.
- [92] Bernard Widrow. Darpa neural network study. *Armed Forces Communication and Electronics Association, Fairfax, VA1988*, 1988.
- [93] David E Rumelhart, Geoffrey E Hinton, and Ronald J Williams. Learning internal representations by error propagation. Technical report, DTIC Document, 1985.
- [94] Lefteri H Tsoukalas and Robert E Uhrig. *Fuzzy and neural approaches in engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [95] Filipe Araujo, Bernardete Ribeiro, and Luis Rodrigues. A neural network for shortest path computation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 12(5):1067–1073, 2001.
- [96] Russell Beale and Tom Jackson. *Neural Computing-an introduction*. CRC Press, 1990.
- [97] A Cochocki and Rolf Unbehauen. *Neural networks for optimization and signal processing*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [98] Franco Scarselli and Ah Chung Tsoi. Universal approximation using feedforward neural networks: A survey of some existing methods, and some new results. *Neural networks*, 11(1):15–37, 1998.
- [99] <https://www.automatika.rs/baza-znanja/neuralne-mreze/uvod-u-neuralne-mreze.html>.
- [100] http://automatika.etf.bg.ac.rs/images/FAJLOVI_srpski/predmeti/izborni_kursevi_os/obrada_signala/OS4P0/materijali/Prezentacija_NN.pdf.
- [101] Donald Olding Hebb. *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. Psychology Press, 2005.
- [102] Kenneth Levenberg. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2):164–168, 1944.

- [103] Donald W Marquardt. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2):431–441, 1963.
- [104] Bent Andersen, J Kragh, and H BENDSEN. Acoustic performance-low noise road pavements. *ACOUSTIC PERFORMANCE-LOW NOISE ROAD PAVEMENTS*, (44), 2006.
- [105] Pravilnik o podeli motornih i priključnih vozila i tehničkim uslovima za vozila u saobraćaju na putevima. *Sl. glasnik RS, br.63/2017*.
- [106] <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1970/157/2013-07-01>.
- [107] Saša Z Babić. *Modeliranje buke nastale od drumskog saobraćaja na osnovu strukture voznog parka i parametara saobraćajnog toka*. PhD thesis, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, 2013.
- [108] Momir R Prasevic, Darko I Mihajlov, and Dragan S Cvetkovic. Measurement and evaluation of the environmental noise levels in the urban areas of the city of nis (serbia). *Environmental monitoring and assessment*, 186(2):1157–1165, 2014.
- [109] Darko Mihajlov, Momir Prašćević, and Dragan Cvetković. An analysis of the environmental noise levels on the territory of the city of niš. In *proc. of the 4th International and 23rd National Conference "Noise and Vibration*, pages 49–58, 2012.
- [110] Međunarodna organizacija za standardizaciju. *Akustika — Opisivanje, merenje i ocenjivanje buke u životnoj sredini — Deo 1: Osnovne veličine i procedure ocenjivanja*. ISO, 2010.
- [111] Međunarodna organizacija za standardizaciju. *Akustika — Opisivanje, merenje i ocenjivanje buke u životnoj sredini — Deo 2: Određivanje nivoa buke u životnoj sredini*. ISO, 2010.
- [112] J Tomić, N Bogojević, M Pljakić, and D Šumarac-Pavlović. Assessment of traffic noise levels in urban areas using different soft computing techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4):EL340–EL345, 2016.
- [113] Jelena Tomić, Nebojša Bogojević, and Zlatan Šoškić. Application of the particle swarm optimization for development of a traffic noise prediction model. *Mechanics Transport Communications*, 15(3):IV 47– IV 52, 2017.

- [114] Maurice Clerc. Standard particle swarm optimisation. 2012.
- [115] Bugarski Vladimir. *Ekspertski sistem za upravljanje brodskom prevodnicom zasnovan na računarskoj inteligenciji*. PhD thesis, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015.
- [116] Francisco Herrera, Manuel Lozano, and Jose L Verdegay. Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis. *Artificial intelligence review*, 12(4):265–319, 1998.
- [117] Miomir Mijić. Refleksija zvučnog talasa. http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/te4e/Akustika_06_Refleksija_zvuka.pdf.
- [118] Clive WJ Granger, Timo Terasvirta, et al. Modelling non-linear economic relationships. *OUP Catalogue*, 1993.
- [119] Dipti Srinivasan, AC Liew, and CS Chang. A neural network short-term load forecaster. *Electric Power Systems Research*, 28(3):227–234, 1994.
- [120] Xiru Zhang. Time series analysis and prediction by neural networks. *Optimization Methods and Software*, 4(2):151–170, 1994.
- [121] Kevin Swingler. *Applying neural networks: a practical guide*. Morgan Kaufmann, 1996.
- [122] Michael J Berry and Gordon Linoff. *Data mining techniques: for marketing, sales, and customer support*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [123] Adam Blum. *Neural networks in c++*. NY: Wiley, 697, 1992.
- [124] Andreas Weigend. On overfitting and the effective number of hidden units. In *Proceedings of the 1993 connectionist models summer school*, volume 1, pages 335–342, 1994.
- [125] Igor V Tetko, David J Livingstone, and Alexander I Luik. Neural network studies. 1. comparison of overfitting and overtraining. *Journal of chemical information and computer sciences*, 35(5):826–833, 1995.
- [126] Warren S Sarle. Stopped training and other remedies for overfitting. *Computing science and statistics*, pages 352–360, 1996.
- [127] Francis Besnard, Jérôme Defrance, Michel Bérengier, Guillaume Dutilleul, Fabrice Junker, David Ecotiere, Emmanuel Le Duc, Marine Baulac,

- Bernard Bonhomme, Jean-Pierre Deparis, et al. Road noise prediction 2noise propagation computation method including meteorological effects (nmpb 2008). *SETRA*, september, 2009.
- [128] British Standards Institution. Bs en 1793-3:1998 road traffic noise reducing devices. test method for determining the acoustic performance. normalized traffic noise spectrum. 1998.
- [129] Zlatan Šoškić, Zoran Petrović, Branko Radičević, and Nebojša Bogojević. Softver za proračun lokalnih mapa buke. 2013.
- [130] <http://www.mfkv.kg.ac.rs/urbanoise/>.
- [131] Miomir Mijić. Uvod u akustiku. http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/te4e/Akustika_01_Uvod_u_akustiku.pdf.

A Deskriptori buke u životnoj sredini

Zvuk je svaka vremenski promenljiva mehanička deformacija u elastičnoj sredini koju može registrovati čovekovo čulo sluha [131]. Čovekov organ sluha ima sposobnost percepcije mehaničkih oscilacija koje su u opsegu od 20 Hz do 20 kHz (ukoliko je intenzitet nadražaja iznad granice čujnosti).

Deformacija pri pojavi zvuka je praćena promenom pritiska u elastičnoj sredini. Ukupni pritisak ima svoju statičku komponentu, p_0 , kao i promenljivu komponentu, $p(t)$:

$$p = p_0 + p(t) \text{ [Pa]}. \quad (\text{A.1})$$

Čulo sluha nije osetljivo na statički pritisak, već samo na vremenski promenljivu komponentu pritiska, koja se naziva zvučni pritisak. U okolnostima kada je vremenski oblik zvučnog pritiska kompleksan, kao mera stanja u zvučnom polju posmatra se efektivna vrednost pritiska, $p_{eff}(t)$, koja se dobija vremenskim usrednjavanjem kvadrata zvučnog pritiska:

$$p_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t p^2(\tau) d\tau} \text{ [Pa]}. \quad (\text{A.2})$$

Dakle, efektivna vrednost zvučnog pritiska je vremenski promenljiva veličina čija brzina promene zavisi od odabranog vremena usrednjavanja T . U postupku merenja buke uglavnom se koriste sledeće konstante usrednjavanja:

- kratka (uobičajno se označava sa “*fast*”), čija vrednost iznosi 125 ms,
- duga (označava se sa “*slow*”), čija je vrednost $T = 1$ s.

Izbor konstante usrednjavanja najčešće je propisan standardom koji bliže definiše konkretan postupak merenja. Kako bi se detektovale vršne vrednosti buke impulsnog karaktera mogu se primenjivati i kraći vremenski intervali usrednjavanja (na primer $T = 35$ ms), dok se u postupku merenja saobraćajne buke koriste i znatno duži intervali: 15 minuta, pojedini delovi dana, ceo dan (24 h).

Kako subjektivni doživljaj promene jačine zvuka predstavlja funkciju procentualne promene pobude (Veber-Fehnerov zakon), uvedena je nova veličina koja se naziva nivo zvučnog pritiska:

$$L = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \text{ [dB]}, \quad (\text{A.3})$$

Pri tom je referentni zvučni pritisak $p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Kako bi se dobijena vrednost nivoa zvučnog pritiska prilagodila subjektivnom doživljaju jačine zvuka primenjuje se frekvencijska ponderacija nivoa buke. U praksi se najčešće primenjuje A-ponderaciona kriva koja približno odgovara izvrnutoj izofonskoj liniji od 40 fona. S obzirom da se sa povećanjem nivoa zvuka smanjuje nelinearnost čula sluha, za visoke nivoe buke primenjuje se C-težinska kriva koja odgovara izvrnutoj izofonskoj liniji od 100 fona. Slabljenje težinskih krivi po tercnim opsezima prikazano je u tabeli A.1.

Tabela A.1: Slabljenje težinskih krivi

f [Hz]	Kriva A [dB]	Kriva C [dB]
50	-30.2	-1.3
63	-26.2	-0.8
80	-22.5	-0.5
100	-19.1	-0.3
125	-16.1	-0.2
160	-13.4	-0.1
200	-10.9	0
250	-8.6	0
315	-6.6	0
400	-4.8	0
500	-3.2	0
630	-1.9	0
800	-0.8	0
1000	0	0
1250	0.6	0
1600	1.0	-0.1
2000	1.2	-0.2
2500	1.3	-0.3
3150	1.2	-0.5
4000	1.0	-0.8
5000	0.5	-1.3
6300	-0.1	-2.0
8000	-1.1	-3.0
10000	-2.5	-4.4

Ekvivalentni A-ponderisani nivo zvuka:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_T p_A^2(t)/p_o^2 dt \right) \text{ [dBA]}, \quad (\text{A.4})$$

predstavlja najčešće korišćeni deskriptor buke. Pri tom $p_A(t)$ označava A-ponderisani zvučni pritisak u trenutku t , dok je T period usrednjavanja. Pored ekvivalentnog nivoa zvučnog pritiska, za dodatno opisivanje promenljive buke koriste se sledeći deskriptori:

- maksimalni nivo zvučnog pritiska, L_{max} ,
- minimalni nivo zvučnog pritiska, L_{min} ,
- kvantil (procentni nivo buke) L_N koji predstavlja nivo zvuka koji je premašen tokom $N\%$ vremena. Pri tom se najčešće primenjuju L_1 , L_{10} , L_{50} , L_{90} i L_{99} nivoi.

Umesto ekvivalentnog nivoa buke, za definisanje energije tranzijentnih (kratkotrajnih) pojava koristi se nivo izloženosti zvuku (buci), L_{AE} [dBA], koji se često označava sa SEL (*Sound Exposure Level*), a određuje se prema sledećoj formuli:

$$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t)/p_o^2 dt \right) \text{ [dBA]}, \quad (\text{A.5})$$

gde je

$p_A(t)$ – trenutna vrednost A-ponderisanog zvučnog pritiska,

$t_2 - t_1$ – posmatrani vremenski interval koji je dovoljno dug da obuhvati tranzijentnu pojavu buke,

t_0 – referentno trajanje (1 s).

Prema ISO 1996 standardu dvadesetčetvoročasovni ekvivalentni nivo buke definiše se sledećim izrazom:

$$L_{den} = 10 \log \left(\frac{12}{24} \cdot 10^{0,1L_d} + \frac{4}{24} \cdot 10^{0,1(L_e+5)} + \frac{8}{24} \cdot 10^{0,1(L_n+10)} \right) \text{ [dBA]}, \quad (\text{A.6})$$

pri čemu je

L_d – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke u dnevnom periodu (07:00-19:00),

L_e – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke u večernjem periodu (19:00-23:00),

L_n – ekvivalentni A-ponderisani nivo buke u noćnom periodu (23:00-07:00).

Korekcionni faktori za večernji i noćni period od 5 dB i 10 dB, redom, su uvedeni zbog veće osetljivosti stanovništva na buku tokom datih perioda dana.

ISO 1996-1:2003 standard uvodi i korekcionni faktor koji je potrebno dodati na ekvivalentni nivo zvučnog pritiska u zavisnosti od dominantnih izvora zvuka, kao i karakteristika buke koju oni generišu, a zbog različitih uticaja na subjektivni doživljaj buke. Vrednost korekcionnog faktora u zavisnosti od tipa buke je navedena u tabeli A.2.

Tabela A.2: Vrednost korekcionnog faktora u zavisnosti od tipa izvora i karaktera buke prema ISO 1996-1:2003 standardu

	Specifikacija	K [dB]
Izvor buke	drumski saobraćaj	0
	vazdušni saobraćaj	3 do 6
	železnički saobraćaj	-6 do -3
	industrija	0
Karakter buke	regularna impulsna buka	5
	izrazito impulsna buka	12
	tonalna buka	3 do 6

Na osnovu dvadesetčetvoročasovnog ekvivalentnog nivoa buke L_{den} može se proceniti procenat stanovništva ugroženog bukom primenom izraza [12]:

$$\begin{aligned}
 \%A &= 1,795 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{den} - 37)^3 + 2,110 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{den} - 37)^2 \\
 &\quad + 0,5353 \cdot (L_{den} - 37) \\
 \%HA &= 9,868 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{den} - 42)^3 + 1,436 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{den} - 42)^2 \\
 &\quad + 0,5118 \cdot (L_{den} - 42)
 \end{aligned}
 \tag{A.7}$$

gde je

$\%A$ – procenat ugroženog stanovništva,

$\%HA$ – procenat veoma ugroženog stanovništva.

Granične vrednosti indikatora buke na otvorenom prostoru date su u tabeli A.3.

Tabela A.3: Granične vrednosti indikatora buke [12]

Zona	Namena prostora	Najveći dozvoljeni nivo buke L_{Aeq} [dBA]	
		Dan	Noć
1.	Područja za odmor i rekreaciju, bolničke zone i oporavilišta, kulturno-istorijski lokaliteti, veliki parkovi	50	40
2.	Turistička područja, mala i seoska naselja, kampovi i školske zone	50	45
3.	Čisto stambena područja	55	45
4.	Poslovno-stambena područja, trgovačko-stambena područja i dečja igrališta	60	50
5.	Gradski centar, zanatska, trgovačka, administrativno-upravna zona sa stanimima, zone duž autoputeva, magistralnih i gradskih saobraćajnica	65	55

B Maksimalno dozvoljeni nivoi buke motornih vozila u stacionarnim uslovima [105,107]

Kategorija		Dozvoljeni nivo [dBA]
Moped		81
Laki tricikl		88
Motocikli	sa dvotaktnim i četvorotaktnim motorom do 125 cm ³	85
	sa dvotaktnim i četvorotaktnim motorom preko 125 cm ³	87
	četvorotaktnim motorom preko 500 cm ³	89
Motocikl sa bočnim sedištem		88
Teški tricikl		88
Laki četvorocikl		87
Teški četvorocikl		87
Putničko vozilo		87
Laki autobus		88
Teški autobus	sa snagom motorom do 147 kW	92
	sa snagom motorom preko 147 kW	95
Lako teretno vozilo čija najveća dozvoljenja masa ne prelazi 3,5 t		88
Srednje teretno vozilo čija najveća dozvoljenja masa prelazi 3,5 t ali ne prelazi 12 t	sa snagom motorom do 147 kW	92
	sa snagom motorom preko 147 kW	95
Teško teretno vozilo čija najveća dozvoljenja masa prelazi 12 t	sa snagom motorom do 147 kW	92
	sa snagom motorom preko 147 kW	95

C Rezultati merenja trećinsko oktavnog spektra buke drumskog saobraćaja

REZULTATI MERENJA TREĆINSKO OKTAVNOG SPEKTRA BUKE DRUMSKOG
SAOBRAĆAJA

12.5 Hz	7.51	8.3	1.57	-2.08	-2.45	-4.66	-2.13	-4.58	-3.14	-5.37
16 Hz	12.9	14.33	7.53	5.51	6.84	6.78	9.78	3.85	4.12	5.25
20 Hz	18.24	19.18	13.32	12.41	12.35	10.65	13.82	11.32	10.06	11.01
25 Hz	22.95	24.04	19.35	18.79	18.53	16.95	18.19	17.58	18.46	17.57
31.5 Hz	27.57	28.32	22.86	23.65	23.19	22.64	23.64	23.55	22.12	23.21
40 Hz	34.1	34.37	28.95	30.92	30.07	29.09	32.5	29.92	30.79	31
50 Hz	40.07	40.02	37.88	41.25	39.68	36.56	38.38	39.79	38.74	40.54
63 Hz	42.99	44.23	42	42.64	47.69	41.41	41	47.33	42.48	40.23
80 Hz	43.58	42.21	40.36	41.29	39.73	39.15	44.75	43.55	40.49	40.49
100 Hz	45.54	45.04	41.59	43.07	43.52	41.34	43.08	52	41.41	47.28
125 Hz	46.78	46.34	43.47	44.86	49.91	43.98	45.22	47.55	45.94	44.57
160 Hz	46.32	47.48	45	46.81	46.95	45.72	49.8	48.78	45.91	46.36
200 Hz	48.07	49.54	48.41	49.32	49.62	48.72	49.59	49.47	48.63	48.17
250 Hz	50.03	50.81	51.37	50.61	50.44	49.48	51.26	49.46	49.34	49.17
315 Hz	50.85	51.96	51.04	51.31	51.85	50.79	51.69	53.47	50.92	50.35
400 Hz	52.57	53.7	52.16	52.53	52.41	51.17	53.07	53.74	52.2	51.72
500 Hz	54.83	55.17	55.48	55.86	54.48	53.03	55.79	56.48	53.83	53.34
630 Hz	55.68	55.98	55.94	56.93	56.01	54.75	56.53	56.35	55.36	54.26
800 Hz	57.26	57.67	56.72	57.89	57.08	56.65	57.48	57.28	56.81	55.87
1 kHz	58.78	59.71	58.5	58.98	58.39	58.26	59.07	58.92	58.87	57.72
1.25 kHz	58.08	58.74	57.82	58.5	58.26	57.98	58.32	58.38	58.24	57.2
1.6 kHz	57.14	58.15	56.69	57.32	57.23	56.38	57.47	57.35	56.99	56.09
2 kHz	55.04	55.96	54.95	55.7	55.14	54.36	55.67	55.44	54.94	53.87
2.5 kHz	52.51	53.22	51.62	53.63	52.07	51.51	53.2	52.63	51.67	51.18
3.15 kHz	50.58	51.08	48.69	50.99	49.58	49.61	51.88	50.75	49.29	48.63
4 kHz	48.52	48.54	45.95	48.55	46.67	46.13	48.65	47.92	46.5	45.42
5 kHz	45.28	46.06	42.74	45.5	43.41	42.71	45.38	44.26	43.25	41.71
6.3 kHz	41.9	42.78	38.9	42.83	40.86	39.87	41.91	41.34	40.57	40.15
8 kHz	38.58	38.54	35.68	39.43	36.94	36.34	37.61	37.89	36.62	35.08
10 kHz	34.29	34.14	30.99	34.34	34.04	32.46	32.66	33.73	31.74	29.73
12.5 kHz	35.24	30.63	26.16	32.52	29.31	27.41	27.61	28.87	31.35	25.29
16 kHz	24.15	27.7	23.32	25.42	23.94	24.7	23.19	22.47	28.35	18.21
20 kHz	16.92	17.28	20.53	16.46	18.12	16.83	15.18	15.39	14.42	19.04

REZULTATI MERENJA TREĆINSKO OKTAVNOG SPEKTRA BUKE DRUMSKOG
SAOBRAĆAJA

12.5 Hz	-1.89	-6.13	-5.8	-3.27	1.86	-4.35	-6.1	-2.02	-2.95	-3.6
16 Hz	7.52	2.96	2.44	6.21	7.34	3.43	5.54	7.18	4.29	4.11
20 Hz	13.06	9.61	8.79	10.77	12.07	8.91	8.65	14.54	10.77	10.3
25 Hz	18.5	16.71	14.5	17.17	17.14	16.06	14.42	16.78	18.66	16.03
31.5 Hz	23.8	22.76	19.45	22.65	22.47	21.53	20.58	21.33	23.33	22.46
40 Hz	33.22	30.09	26.49	29.04	29.14	30.81	40.28	30.94	29.57	31.34
50 Hz	40.14	35.98	37.68	42.61	37.1	43.01	37.91	39.11	37.78	37.2
63 Hz	40.41	41.98	41.56	43.01	47.6	40.42	40.39	39.4	41.12	43.57
80 Hz	40.54	39.2	42.08	42.4	40.65	40.22	39.42	39.14	40.48	41
100 Hz	45.19	41.32	43.03	45.57	43.64	41.89	40.77	42.28	41.5	46.86
125 Hz	46.51	43.76	44.79	47.36	45.51	43.85	43.59	43.85	47.05	49.94
160 Hz	48	47.04	47.74	48.66	45.87	45.97	46.98	44.48	46.45	44.56
200 Hz	48.78	48.73	49.59	50.18	50.46	50.68	47.35	49	48.38	48.44
250 Hz	49.1	49.65	50.06	51.12	50.87	51.46	48.56	48.76	50.79	48.98
315 Hz	50.17	50.6	50.18	51.75	50.45	49.57	50.09	48.32	50.33	50.03
400 Hz	50.58	51.29	52.45	52.71	51.31	52.45	53.24	50.08	51.59	50.21
500 Hz	53.37	53.25	54.23	53.86	53.94	53.59	52.93	53.4	53.61	54.52
630 Hz	55.06	54.23	54.46	54.83	54.84	54.71	53.9	54.59	54.34	54.03
800 Hz	56.26	55.29	55.98	55.84	56.52	56.21	55.2	55.65	55.76	55.46
1 kHz	58.33	57	58.15	57.53	58.14	57.89	57.16	57.27	57.75	57.75
1.25 kHz	57.87	56.69	58.13	57.04	57.76	57.73	56.98	56.99	57.64	57.1
1.6 kHz	56.83	55.72	57.22	56.15	56.57	56.68	55.95	56.05	56.67	56.56
2 kHz	55.08	53.73	55.19	53.99	54.87	54.92	54	53.9	54.53	54.18
2.5 kHz	52.39	50.96	52.01	51.27	52.34	52.36	51.38	51.06	51.37	50.78
3.15 kHz	50.25	50.46	49.37	50.03	50.47	49.84	49.21	48.37	48.91	48.29
4 kHz	47.37	46.25	46.25	46.1	47.52	47.28	46.5	45.69	45.58	45.88
5 kHz	44.25	42.66	42.62	42.4	44.95	44.56	42.87	42.09	42.16	42.61
6.3 kHz	41.45	40.16	39.13	39.77	41.49	42.88	39.26	38.84	39.48	40.43
8 kHz	37.5	36.4	35.35	36.98	38.6	39.12	35.41	34.4	35.55	37.02
10 kHz	32.2	31.76	30.41	31.2	34.71	33.2	30.67	29.71	30.94	33.25
12.5 kHz	26.46	26.01	32.32	27.02	28.95	29.23	25.5	26.06	26.93	26.71
16 kHz	21.77	19.74	21.34	21.79	27.48	23.18	19.71	21.25	21.38	20.6
20 kHz	12.75	11.24	17.94	17.36	15.99	16.02	13.4	15.21	13.94	11.67

REZULTATI MERENJA TREĆINSKO OKTAVNOG SPEKTRA BUKE DRUMSKOG
SAOBRAĆAJA

12.5 Hz	-2.61	0.67	1.99	-0.24	-0.43	0.7	-0.71	3.74	3.66	-0.89
16 Hz	3.27	7.61	7.76	6.12	8.46	7.02	5.55	7.97	10.33	5.76
20 Hz	8.71	12.63	11.99	11.19	12.71	11.22	9.87	13.12	14.71	12.19
25 Hz	16.22	18.13	17.45	17.63	17.26	16.73	15.88	18.62	18.24	16.63
31.5 Hz	20.46	24.28	22.74	22.31	23.37	21.92	21.93	27.42	23.89	22.98
40 Hz	26.24	28.53	32.08	29.68	34.46	31.57	30.04	32.76	30.71	32.78
50 Hz	35.29	40.48	41.15	38.05	40.08	36.26	39.59	40.08	38.44	38.39
63 Hz	40.59	44.87	41.26	41.47	42.57	37.8	42.91	42.98	42.78	47.61
80 Hz	38.64	39.53	42.35	39.27	41	36.72	40.08	42.6	41.84	47.43
100 Hz	39.3	42.51	41.68	42.07	41.91	39.02	42.87	44.4	43.07	43.82
125 Hz	42.49	43.95	43.39	47.96	44.97	44.38	46.47	45.14	46.27	45.87
160 Hz	44.74	47.39	46.02	48.15	46.28	45.8	47.3	47.57	48.9	47.92
200 Hz	46.03	48.9	48.46	48.9	49.09	46.46	50.23	50.42	48.58	48.38
250 Hz	47.2	50.09	49.36	49.73	50.32	48.45	49.46	51.11	49.53	52.04
315 Hz	48.54	52.42	49.61	50.78	50.5	48.91	49.51	52.59	50.42	52.11
400 Hz	49.84	53.43	52.21	52.11	51.84	50.22	50.96	53.76	50.78	53
500 Hz	52.09	55.31	53.56	53.82	53.75	52.02	53.04	55.65	53.98	55.11
630 Hz	52.14	55.77	54.38	54.37	54.81	53.21	53.96	56.6	55.23	56.2
800 Hz	54.45	56.91	55.75	56.11	56.69	55.18	55.77	57.68	56.37	56.95
1 kHz	56.16	57.99	56.96	57.81	57.61	57.07	57.6	59.15	57.77	58.1
1.25 kHz	55.92	57.34	56.81	57.65	57.41	56.73	57.64	58.85	57.72	57.8
1.6 kHz	55.33	56.45	55.98	57.06	56.22	55.9	56.62	58.1	56.65	56.76
2 kHz	53.13	54.8	53.78	54.96	54.15	53.89	54.71	56.3	54.73	54.86
2.5 kHz	50.25	51.75	50.88	52.43	51.54	50.58	52.09	54.24	51.57	52.1
3.15 kHz	47.62	49.16	48.08	49.61	48.58	47.83	49.41	51.33	48.68	49.94
4 kHz	44.59	46.58	45.17	46.77	45.8	44.92	46.87	48.18	45.56	47.59
5 kHz	41.6	43.75	42.52	43.19	42.79	41.63	43.23	45.29	42.1	44.38
6.3 kHz	38.95	40.62	40.24	40.02	40.09	38.65	40.35	44.04	39.19	40.93
8 kHz	34.48	37.73	36.32	35.39	35.8	34.3	35.85	48.75	39.08	37
10 kHz	29.46	33.1	32.82	30.64	31.57	29.55	31.28	34.49	31.72	32.61
12.5 kHz	23.47	34.2	25.61	25.02	26.56	35.71	25.89	38.88	31.07	29.66
16 kHz	17.35	22.51	20.34	20.27	23.71	24.73	20.02	27.77	32.74	22.17
20 kHz	8.89	16.05	11.63	15.57	15.99	16.39	12.73	21.15	18.15	13.11

D Eksperimentalni podaci o protoku i strukturi saobraćaja i izmerenim nivoima buke

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
96	4	1	6	0	62.2
124	3	0	3	0	63.4
112	0	0	3	0	62.8
50	0	0	1	0	61.1
273	6	2	3	0	63.2
380	0	0	4	0	64
161	0	0	2	0	60.9
148	1	1	10	0	68.5
244	1	1	14	2	69.6
129	0	0	12	0	67.3
61	0	0	7	0	67.4
278	5	0	19	0	69.5
331	3	1	25	0	69.6
174	1	0	19	1	69.2
27	0	0	0	0	61
135	1	1	0	0	63.7
139	0	0	0	0	62.9
90	1	0	0	1	61.1
67	0	0	0	0	62
37	0	0	0	0	58.5
99	7	1	3	0	65.8
134	3	3	6	0	65.8
97	4	0	4	0	64.4
31	2	0	1	0	61.5
71	1	1	2	0	62.5
109	3	1	4	0	65.1
117	2	0	5	0	62.6
70	0	0	2	0	63.8
142	0	1	0	1	66.2
225	1	0	0	0	68
147	1	0	0	0	65.4
76	0	0	0	0	63.5
21	1	0	0	0	59.6
95	1	0	4	0	61.4

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
136	1	1	9	0	64.7
92	0	0	8	0	65.6
37	0	0	4	0	59.9
185	3	3	1	0	68
230	4	2	4	0	69.1
43	0	0	4	0	63.1
194	6	0	7	2	64.7
258	1	1	4	0	63.4
169	0	0	8	1	65
66	0	1	1	0	61.7
51	0	1	0	0	57.3
35	0	0	0	2	58.5
52	0	0	0	1	58
235	5	6	8	1	64.3
241	2	1	17	3	64.2
188	0	2	11	1	63.6
72	0	0	0	5	60.5
175	4	0	0	1	62.7
256	1	0	0	2	64.2
195	1	0	1	2	66.4
100	0	0	0	0	64.1
26	1	0	0	0	60.3
186	10	3	0	2	67.8
266	3	2	2	5	69.3
165	1	0	1	0	68.2
88	0	0	0	0	66.1
172	5	5	10	1	66.4
195	6	3	13	1	65
122	1	1	7	0	64
37	1	0	7	0	61.8
95	3	0	2	1	62.3
82	1	1	4	2	61.3
80	1	0	2	0	61.8
32	0	0	2	0	58.8

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
49	0	0	6	0	62.1
63	0	0	3	3	61.2
37	1	1	3	0	60.2
82	5	1	7	0	63.8
136	0	1	4	3	62.6
106	0	0	9	2	62.7
39	0	0	1	0	58.7
307	2	3	3	0	63.3
165	0	0	2	1	61.5
186	6	0	12	0	68.3
234	4	0	18	5	68
204	1	1	12	1	67.7
80	0	0	7	1	64.5
22	1	0	0	0	60.3
301	4	0	20	4	69.8
287	8	0	25	6	69.2
214	2	0	11	10	68.6
85	1	0	9	1	67.4
23	0	0	0	0	58.2
143	3	0	0	0	62.9
180	4	1	2	5	64.4
148	1	0	1	3	62.8
51	1	0	0	0	59.1
135	3	4	4	1	67.1
137	5	6	7	6	65.4
133	3	1	5	1	64.1
56	0	0	1	0	61.4
17	0	0	0	0	57.5
100	2	2	1	0	63.7
126	2	3	3	1	65.8
118	1	0	4	3	63.1
49	0	1	2	0	60
161	1	1	0	2	66.7
238	2	0	0	2	68.7

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
125	1	0	0	6	65.8
67	0	0	0	1	62.5
131	0	0	7	4	62.7
136	4	0	9	5	63.7
160	1	0	6	2	65.1
48	2	0	6	0	62
177	5	2	1	6	67.1
200	6	1	1	8	66.7
217	1	1	4	5	68.4
66	0	0	2	0	62.6
227	7	4	10	5	65.8
238	6	1	6	5	63.5
185	3	0	6	8	64.9
75	0	0	2	3	61.5
45	0	0	0	1	57.2
40	0	0	0	1	55.4
48	0	0	0	5	56.8
170	1	1	10	3	62.4
13	0	1	4	4	60
210	2	0	0	3	64.6
236	2	1	0	6	63.9
221	0	0	0	5	64.1
96	2	0	0	4	64.3
208	12	2	0	7	67.9
223	8	0	1	5	67.7
150	1	0	0	2	66.7
59	1	1	3	3	65.3
17	1	0	0	0	59.7
170	6	4	10	4	66.2
198	8	3	19	9	66.1
140	1	0	9	4	63.3
46	1	0	0	0	58.6
80	4	2	1	1	62.3
75	6	0	4	2	60.4

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
82	0	0	2	1	60.9
46	0	0	1	0	57.9
53	1	0	2	0	60.1
69	1	0	4	0	62.3
59	1	0	4	2	60.4
40	0	0	1	1	58.8
91	3	3	3	2	61.7
114	0	0	6	8	63.1
50	0	0	1	2	61.1
54	0	0	2	4	60.3
318	1	2	4	9	62.4
148	0	0	2	2	59.5
175	1	0	7	1	66.4
220	5	1	16	3	69.4
120	0	0	6	6	65.9
21	2	0	1	0	58
276	3	1	12	13	68.8
277	4	0	24	10	70.2
234	3	0	11	13	71.1
125	1	0	11	1	65.8
36	1	0	1	0	60.4
125	2	0	0	8	63.5
119	0	1	1	1	63.1
126	1	0	0	5	62.2
60	1	0	0	3	59.6
123	2	2	2	2	63.2
161	3	4	5	7	64.5
149	5	0	1	4	63.3
38	0	0	0	2	58.9
75	0	1	4	2	63.5
113	2	2	3	3	64
109	1	0	3	0	62.6
58	0	0	1	1	61.2
151	2	0	0	3	64.7

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
194	1	1	0	5	65.2
146	0	0	7	0	64.7
76	0	0	0	6	62.8
15	1	0	0	1	56.1
146	3	1	11	4	63.8
122	1	0	6	7	66.4
36	0	0	4	2	60.8
168	8	4	4	6	68.1
196	10	2	4	7	65.7
174	4	0	5	7	66.5
54	0	0	0	2	60.4
162	4	2	5	4	65.2
251	2	4	9	6	65.2
210	2	1	7	9	63.7
76	0	0	0	0	60
39	0	0	1	0	59.4
36	1	0	0	1	57.1
66	0	0	3	1	59
32	0	0	0	0	55.5
259	2	1	12	2	66.8
177	2	0	10	4	62.5
72	0	0	5	1	59.5
30	0	1	1	1	57.1
191	2	1	0	5	65.3
225	2	1	0	14	64.3
219	1	0	1	2	63.8
70	0	0	0	4	60.7
185	14	4	4	4	68.2
227	8	3	2	6	67.4
168	1	0	5	2	68.1
64	0	0	2	1	63.8
16	0	0	0	0	58.8
184	4	0	5	5	63.8
203	6	1	17	5	64.4

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
135	1	1	15	1	65.4
22	0	0	1	1	56
13	1	1	0	0	57.9
89	1	0	3	4	62.4
102	4	0	4	5	62.3
82	0	0	2	0	61.5
30	2	0	2	0	57.5
64	0	0	2	0	61
66	0	0	3	1	62.1
54	0	0	4	1	61.5
30	1	0	1	0	57.1
81	2	1	0	1	60.2
102	1	0	2	3	61.3
87	0	0	0	2	59.7
290	3	3	3	3	64.8
369	6	0	4	2	64.9
457	1	0	3	0	64.8
113	0	0	4	0	61.6
23	2	0	0	0	55.1
240	6	1	9	4	67.4
263	1	1	19	2	68.7
141	0	0	10	1	65.8
34	0	0	2	1	62.7
21	1	0	3	0	62
322	5	0	12	9	66.8
394	4	1	30	7	69.7
215	2	1	19	0	68.6
66	0	0	6	0	66
152	2	0	0	8	62.3
199	1	0	0	3	63.7
120	0	0	0	1	62.3
25	1	2	0	0	61.3
120	5	11	4	1	67
144	9	2	7	1	67.3

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
109	4	1	1	2	65
117	2	0	1	1	63.1
118	1	0	3	0	65.2
48	0	0	1	0	61.1
208	4	2	0	2	66.9
268	1	1	0	1	66.4
210	0	1	0	0	67
78	0	0	0	0	62.5
20	0	0	0	0	57.6
210	4	0	9	2	64.4
128	0	0	6	0	65.3
24	0	0	0	0	56.9
358	6	5	4	4	70.1
202	5	3	3	2	68.9
134	4	1	4	0	66
26	0	0	1	2	58.5
18	2	0	0	0	58.6
242	5	0	8	1	66.4
267	6	2	5	1	65.6
226	2	1	4	0	65.6
75	0	0	1	0	63.8
33	1	0	0	0	56.7
44	1	0	0	1	57.6
44	0	0	0	0	59
265	7	0	14	0	68.5
320	4	0	15	4	68.4
228	2	0	11	1	67.2
65	0	0	6	0	63.7
250	2	0	0	0	65.3
297	1	0	0	1	65
148	0	0	0	0	64.7
30	0	0	0	0	60.4
225	4	3	4	0	68.9
230	9	2	4	1	68.8

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
141	2	0	3	0	67.8
30	0	0	3	0	62.3
17	0	1	1	0	59.4
274	5	3	16	0	66.6
238	2	2	12	0	65.4
101	1	0	15	0	65.5
24	2	1	0	0	58.4
19	1	0	11	0	61.3
106	3	1	3	0	64.6
110	4	0	4	0	64.2
76	0	0	2	0	62.5
22	0	0	3	0	59.8
61	1	0	2	0	61
63	3	0	4	0	62.1
33	1	0	2	0	62
15	0	0	2	0	59
307	2	3	3	0	63.3
165	0	0	2	1	61.5
332	2	0	3	1	63.3
410	3	2	5	4	64.8
507	3	1	4	6	65.8
115	0	0	3	5	61
61	0	0	0	0	58.9
336	2	1	3	1	64.6
376	2	0	2	5	64.5
114	1	0	1	8	60.2
294	4	0	18	0	68
343	11	0	23	0	70.5
167	0	0	21	0	68.6
62	0	0	19	0	67.2
42	0	0	5	0	63.4
339	11	1	20	4	69.9
387	3	1	18	7	68.6
190	1	0	11	1	66.4

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
63	0	1	12	1	66.4
45	0	0	2	0	62.2
143	3	0	0	0	62.9
180	4	1	2	5	64.4
148	1	0	1	3	62.8
51	1	0	0	0	59.1
67	1	1	0	3	59.5
93	0	0	0	2	61.3
27	0	0	0	4	58.5
135	0	2	0	4	63.4
152	4	0	0	7	62.3
124	1	0	0	9	62.1
64	1	1	3	0	60.7
124	1	1	8	0	66.5
95	1	1	6	0	63.9
38	0	0	1	0	61
158	2	6	3	0	65.9
150	6	3	11	2	65
129	5	2	5	1	66.9
64	1	0	1	0	62.1
17	0	0	1	0	56.6
119	8	1	3	0	65.1
90	11	0	2	0	64.4
125	1	0	2	4	64.5
127	0	0	6	1	65.2
28	0	0	0	0	59.3
92	1	0	3	4	63.1
124	4	0	5	2	64.1
134	0	0	3	4	63.9
46	0	0	1	1	61.5
91	5	0	3	1	63.3
111	5	0	2	5	64.1
172	0	0	1	0	64
236	3	0	0	1	67.3

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
160	1	0	0	7	64.7
53	0	0	0	0	61.5
16	0	0	0	1	56.5
184	1	0	0	3	65
160	1	2	0	5	64.2
229	0	0	0	7	65.4
63	0	0	0	2	61.3
181	1	1	0	4	65.9
153	3	0	6	2	65.6
160	2	0	12	3	66.3
165	0	0	6	1	65
23	0	0	0	0	56.5
155	1	0	7	2	64.7
190	0	0	9	4	64.9
112	0	0	6	0	64.2
151	2	1	7	6	65.4
181	1	1	6	4	65.9
87	0	0	3	4	64
210	11	8	4	1	69
199	7	6	5	4	69.7
161	1	2	3	0	66.6
24	0	0	0	0	57.8
221	5	1	1	3	68.2
270	3	1	5	4	66.1
146	1	0	4	5	66.5
41	0	0	0	0	60.9
190	6	5	3	5	68
258	2	5	3	5	68.8
171	6	0	6	2	63.7
239	5	1	9	1	66
202	4	0	6	5	63.4
75	1	0	2	0	62.3
228	8	1	5	9	64.5
192	2	0	4	8	62.5

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
209	0	0	4	4	66
84	0	0	2	2	61.4
185	5	0	5	6	63.6
245	5	1	6	9	66.6
234	5	2	13	0	66.3
251	3	0	15	0	67.1
220	2	0	10	0	67.5
52	0	0	0	0	60.7
235	1	1	9	2	66.1
319	3	1	17	9	67.3
315	1	0	14	3	67.3
110	2	0	8	3	64.4
62	0	0	0	2	60.8
218	5	1	8	3	66.4
191	0	2	0	1	65.5
258	0	0	0	0	65.1
211	0	0	0	9	66.3
97	0	0	0	0	63.4
23	0	0	0	0	57.2
174	0	0	1	4	63.6
217	0	0	1	10	64.4
96	1	0	0	3	62.3
29	0	0	0	2	56.5
225	3	0	0	13	65.1
214	4	1	5	2	67.8
268	7	1	4	1	69.3
134	0	1	6	2	66.6
21	0	0	0	0	58
217	8	2	0	2	67.1
305	5	1	6	9	68.1
154	1	0	2	3	66.5
38	0	1	0	1	61.1
15	0	1	0	0	58.8
191	9	1	2	3	67.9

EKSPERIMENTALNI PODACI O PROTOKU I STRUKTURI SAOBRAĆAJA I
IZMERENIM NIVOIMA BUKE

N_{lv}	N_{mt}	N_{ht}	N_b	N_m	L_{Aeq}
197	6	2	14	6	64.9
250	3	1	16	1	65.3
90	1	0	10	1	62.8
216	3	4	9	4	63.7
148	3	1	6	4	62.4
133	0	0	9	3	61.6
31	1	0	0	0	56.5
35	0	0	3	0	57.7
207	5	1	12	4	63.8
227	5	1	14	3	64.6
75	2	0	2	1	61.7
97	2	2	3	0	64.2
82	0	0	2	3	61.4
84	1	2	2	2	62.3
93	2	0	3	2	61.8
80	2	0	1	4	61
25	3	0	0	0	58.5
100	2	1	3	3	63.2
118	2	0	4	2	63.7
102	2	0	2	1	63.3
64	0	0	4	1	62.3
53	0	0	1	1	60
59	1	0	3	2	59.4
51	0	0	2	1	58.6
48	0	0	1	1	58.4
54	0	0	3	0	61.1
57	0	0	3	0	60.5
39	1	0	3	0	61.6
17	0	0	1	1	55.6
66	1	0	1	0	62.7

E Normalizovani terčni spektar saobraćajne buke

U prikazanoj tabeli, pored normalizovanog tercnog spektra saobraćajne buke koji je procenjen na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja, radi poređenja, prikazane su i $L_{i,s}$ vrednosti propisane BS EN 1793-3 standardom [128].

f_i [Hz]	L_i [dB]	$L_{i,s}$ [dB]
25	-48.4	/
31.5	-43.1	/
40	-35.1	/
50	-27.0	/
63	-23.6	/
80	-25.4	/
100	-22.9	-20
125	-20.7	-20
160	-19.0	-18
200	-17.0	-16
250	-16.0	-15
315	-15.3	-14
400	-13.7	-13
500	-12.0	-12
630	-11.0	-11
800	-9.6	-9
1k	-7.9	-8
1.25k	-8.1	-9
1.6k	-9.2	-10
2k	-11.0	-11
2.5k	-14.2	-13
3.15k	-16.4	-15
4k	-19.4	-16
5k	-22.8	-18
6.3k	-25.6	/
8k	-29.0	/
10k	-33.9	/
12.5k	-38.5	/
16k	-43.4	/
20k	-49.9	/

F Algoritam PSO optimizacije

```
1 function optimised_parameters = PSO_optimization (swarm_size,...
2     num_dimensions, space_limits, objective_function, optimization_goal,...
3     velocity_clamping_factor, min_inertia_weight, max_inertia_weight,...
4     max_iterations)
5
6 % PSO_optimization – optimizacija rojem cestica
7
8 % Ulazne promenljive:
9     % swarm_size – velicina roja (broj cestica)
10    % num_dimensions – broj promenljivih cije je vrednosti potrebno
11    %                   utvrditi postupkom optimizacije
12    % space_limits – granice prostora pretrage u formi matrice sa
13    %                   num_dimensions redova i dve kolone (i-ti red
14    %                   matrice sadrzi minimalnu i maksimalnu vrednost
15    %                   i-te promenljive)
16    % objective_function – naziv funkcije ciji je optimum potrebno
17    %                   utvrditi
18    % optimization_goal – string 'min' ili 'max' u zavisnosti od
19    %                   toga da li se PSO algoritmom resava problem
20    %                   minimizacije ili maksimizacije
21    % velocity_clamping_factor – faktor ogranicenja brzine
22    % min_inertia_weight – minimalna vrednost koeficijenta inercije
23    % max_inertia_weight – maksimalna vrednost koeficijenta inercije
24    % max_iterations – ukupan broj iteracija
25
26 % Izlazne promenljive:
27 % optimised_parameters – optimalne vrednosti trazениh parametara
28
29     % provera da li su prilikom pozivanja particle_swarm_optimization
30     % funkcije unete sve promenljive
31     if nargin < 9
32         error('Nisu unete sve promenljive')
33     end
34
35     % provera da li je space_limits matrica adekvatno definisana
36     [row,col]=size(space_limits);
37     if row~=num_dimensions || col~=2
38         error('Matrica space_limits nije adekvatno definisana: neodgovarajuće
39             dimenzije matrice')
40     end
41     for i=1:num_dimensions
42         if space_limits(i,1)>=space_limits(i,2)
43             error('Matrica space_limits nije adekvatno definisana: minmumi su
44                 veci od maksimuma')
45         end
46     end
47
48     % definisanje donjih i gornjih granica prostora pretrage
49     space_lower_limits = space_limits(:,1);
50     space_upper_limits = space_limits(:,2);
```



```
50     format long;
51
52     % inicijalizacija roja – smestanje cestica na nasumicno odabrane
53     % pozicije u okviru definisanog prostora pretrage
54     for i=1:num_dimensions
55         particle(:,i) = space_lower_limits(i) + ...
56             (space_upper_limits(i) - space_lower_limits(i))...
57             * rand(swarm_size,1);
58     end
59
60     % definisanje maksimalne i minimalne brzine kretanja
61     Vmax = (space_upper_limits-space_lower_limits)...
62         * velocity_clamping_factor;
63     Vmin = -Vmax;
64
65     % definisanje inicijalnih brzina
66     for i=1:num_dimensions
67         velocity(:,i) = Vmin(i) + (Vmax(i)-Vmin(i)) * rand(swarm_size,1);
68     end
69
70     % pretraga prostora mogucih resenja kroz max_iterations iteracija
71     for itr=1:max_iterations
72         % linearno smanjenje vrednosti koeficijenta inercije (tokom
73         % iteracija PSO algoritma)
74         w(itr) = ((max_iterations - itr)*(max_inertia_weight - ...
75             min_inertia_weight))/(max_iterations-1) + min_inertia_weight;
76
77         % definisanje vrednosti koeficijenata kognitivnog i socijalnog
78         % ucenja (u zavisnosti od rednog broja tekuce iteracije)
79         social_constant = 0.5 + 2*itr/max_iterations;
80         cognitive_constant = 2.5 - 2*itr/max_iterations;
81
82         for p=1:swarm_size
83             % procena kvaliteta p-te cestice (tj. njenog poloza)
84             parameter = particle(p,:,itr);
85             fitness(p,itr) = feval(objective_function,parameter);
86
87             switch optimization_goal
88                 case 'min' % problem minimizacije
89                     format long;
90
91                     % pronalazenje najboljeg poloza (u okviru definisanog
92                     % prostora pretrage) kojeg je p-ta cestica do sada
93                     % posetila (pBest)
94                     [pBest_fitness,index] = min(fitness(p,:));
95                     pBest=particle(p,:,index);
96
97                     % odredjivanje globalno najboljeg resenja (gBest)
98                     if(p==1 && itr==1)
99                         gBest = pBest;
100                        gBest_fitness = pBest_fitness;
101                    elseif fitness(p,itr) < gBest_fitness
102                        gBest_fitness = fitness(p,itr);
103                        gBest = particle(p,:,itr);
104                    end
105
```

```
106         case 'max' % problem maksimizacije
107             format long;
108
109             % pronalazenje najboljeg položaja (u okviru definisanog
110             % prostora pretrage) kojeg je p-ta čestica do sada
111             % posetila (pBest)
112             [pBest_fitness, index] = max(fitness(p, :));
113             pBest = particle(p, :, index);
114
115             % odredjivanje globalno najboljeg rešenja (gBest)
116             if (p==1 && itr==1)
117                 gBest = pBest;
118                 gBest_fitness = pBest_fitness;
119             elseif fitness(p, itr) > gBest_fitness
120                 gBest_fitness = fitness(p, itr);
121                 gBest = particle(p, :, itr);
122             end
123
124             otherwise
125                 error('Potrebno je uneti min ili max')
126         end
127
128         % azuriranje brzine p-te čestice
129         velocity(p, :, (itr+1)) = w(itr)*velocity(p, :, itr) ...
130             + social_constant*rand(1, num_dimensions) ...
131             .*(gBest-particle(p, :, itr)) + cognitive_constant ...
132             *rand(1, num_dimensions).*(pBest-particle(p, :, itr));
133         for l=1:num_dimensions
134             if velocity(p, l, (itr+1))<Vmin(l)
135                 velocity(p, l, (itr+1)) = Vmin(l);
136             end
137             if velocity(p, l, (itr+1))>Vmax(l)
138                 velocity(p, l, (itr+1)) = Vmax(l);
139             end
140         end
141
142         % promena položaja p-te čestice
143         particle(p, :, (itr+1)) = particle(p, :, itr) ...
144             + velocity(p, :, (itr+1));
145         for l=1:num_dimensions
146             if space_upper_limits(l)<particle(p, l, (itr+1))
147                 particle(p, l, (itr+1)) = space_upper_limits(l);
148             end
149             if space_lower_limits(l)>particle(p, l, (itr+1))
150                 particle(p, l, (itr+1)) = space_lower_limits(l);
151             end
152         end
153
154     end
155 end
156
157     optimised_parameters = gBest;
158
159 end
```

G PSO optimizacija sa topologijom prstena

```
1 function optimised_parameters = PSO_ring_topology(swarm_size,...
2     num_dimensions, space_limits, objective_function, optimization_goal,...
3     velocity_clamping_factor, min_inertia_weight, max_inertia_weight,...
4     max_iterations)
5
6 % PSO_ring_topology – PSO algoritam sa topologijom prstena
7
8 % Ulazne promenljive:
9     % swarm_size – velicina roja (broj cestica)
10    % num_dimensions – broj promenljivih cije je vrednosti potrebno
11    %                   utvrditi postupkom optimizacije
12    % space_limits – granice prostora pretrage u formi matrice sa
13    %                   num_dimensions redova i dve kolone (i-ti red
14    %                   matrice sadrzi minimalnu i maksimalnu vrednost
15    %                   i-te promenljive)
16    % objective_function – naziv funkcije ciji je optimum potrebno
17    %                   utvrditi
18    % optimization_goal – string 'min' ili 'max' u zavisnosti od
19    %                   toga da li se PSO algoritmom resava problem
20    %                   minimizacije ili maksimizacije
21    % velocity_clamping_factor – faktor ogranicenja brzine
22    % min_inertia_weight – minimalna vrednost koeficijenta inercije
23    % max_inertia_weight – maksimalna vrednost koeficijenta inercije
24    % max_iterations – ukupan broj iteracija
25
26 % Izlazne promenljive:
27 % optimised_parameters – optimalne vrednosti trazениh parametara
28
29 % proverа da li su prilikom pozivanja particle_swarm_optimization
30 % funkcije unete sve promenljive
31 if nargin < 9
32     error('Nisu unete sve promenljive')
33 end
34
35 % proverа da li je space_limits matrica adekvatno definisana
36 [row, col]=size(space_limits);
37 if row~=num_dimensions || col~=2
38     error('Matrica space_limits nije adekvatno definisana: neodgovarajuće
39           dimenzije matrice')
40 end
41 for i=1:num_dimensions
42     if space_limits(i,1)>=space_limits(i,2)
43         error('Matrica space_limits nije adekvatno definisana: minimumi su
44               veci od maksimuma')
45     end
46 end
47
48 % definisanje donjih i gornjih granica prostora pretrage
49 space_lower_limits = space_limits(:,1);
50 space_upper_limits = space_limits(:,2);
```

```
50     format long;
51
52     % inicijalizacija roja – smestanje cestica na nasumicno odabrane
53     % pozicije u okviru definisanog prostora pretrage
54     for i=1:num_dimensions
55         particle(:,i) = space_lower_limits(i) + ...
56             (space_upper_limits(i) - space_lower_limits(i))...
57             * rand(swarm_size,1);
58     end
59
60     % definisanje maksimalne i minimalne brzine kretanja
61     Vmax = (space_upper_limits-space_lower_limits)...
62         * velocity_clamping_factor;
63     Vmin = -Vmax;
64
65     % definisanje inicijalnih brzina
66     for i=1:num_dimensions
67         velocity(:,i) = Vmin(i) + (Vmax(i)-Vmin(i)) * rand(swarm_size,1);
68     end
69
70     % pretraga prostora mogucih resenja kroz max_iterations iteracija
71     for itr=1:max_iterations
72         % linearno smanjenje vrednosti koeficijenta inercije (tokom
73         % iteracija PSO algoritma)
74         w(itr) = ((max_iterations - itr)*(max_inertia_weight - ...
75             min_inertia_weight))/(max_iterations-1) + min_inertia_weight;
76
77         % definisanje vrednosti koeficijenata kognitivnog i socijalnog
78         % ucenja (u zavisnosti od rednog broja tekuce iteracije)
79         social_constant = 0.5 + 2*itr/max_iterations;
80         cognitive_constant = 2.5 - 2*itr/max_iterations;
81
82         for p=1:swarm_size
83             % procena kvaliteta p-te cestice (tj. njenog polozaaja)
84             parameter = particle(p,:,itr);
85             fitness(p,itr) = feval(objective_function,parameter);
86         end
87
88         for p=1:swarm_size
89             % definisanje susedskih veza u skladu sa topologijom prstena
90             neighbor(1) = p-1;
91             neighbor(2) = p+1;
92             if( neighbor(1)==0 )
93                 neighbor(1) = swarm_size;
94             end
95             if( neighbor(2)==(swarm_size+1) )
96                 neighbor(2) = 1;
97             end
98
99             switch optimization_goal
100                 case 'min' % problem minimizacije
101                     format long;
102
103                     % pronalazenje najboljeg polozaaja (u okviru definisanog
104                     % prostora pretrage) kojeg je p-ta cestica do sada
105                     % posetila (pBest)
```

```
106         [pBest_fitness, index] = min(fitness(p, :));
107         pBest = particle(p, :, index);
108
109         % za svakog od suseda p-te cestice odredjuje se
110         % najkvalitetnije pronadjeno resenje
111         [neighbor_best_fitness(1), index_1] = ...
112             min(fitness(neighbor(1), :));
113         [neighbor_best_fitness(2), index_2] = ...
114             min(fitness(neighbor(2), :));
115
116         % za posmatrani skup suseda definise se najbolje
117         % pronadjeno resenje (nBest)
118         nBest = pBest;
119         nBest_fitness = pBest_fitness;
120         if( neighbor_best_fitness(1) < nBest_fitness )
121             nBest = particle(neighbor(1), :, index_1);
122             nBest_fitness = neighbor_best_fitness(1);
123         end
124         if( neighbor_best_fitness(2) < nBest_fitness )
125             nBest = particle(neighbor(2), :, index_2);
126             nBest_fitness = neighbor_best_fitness(2);
127         end
128
129         % odredjivanje globalno najboljeg resenja (gBest)
130         if( p==1 && itr==1 )
131             gBest = particle(1, :, 1);
132             gBest_fitness = fitness(1, 1);
133         elseif fitness(p, itr) < gBest_fitness
134             gBest_fitness = fitness(p, itr);
135             gBest = particle(p, :, itr);
136         end
137         case 'max' % problem maksimizacije
138             format long;
139
140             % pronalazjenje najboljeg položaja (u okviru definisanog
141             % prostora pretrage) kojeg je p-ta cestica do sada
142             % posetila (pBest)
143             [pBest_fitness, index] = max(fitness(p, :));
144             pBest = particle(p, :, index);
145
146             % za svakog od suseda p-te cestice odredjuje se
147             % najkvalitetnije pronadjeno resenje
148             [neighbor_best_fitness(1), index_1] = ...
149                 max(fitness(neighbor(1), :));
150             [neighbor_best_fitness(2), index_2] = ...
151                 max(fitness(neighbor(2), :));
152
153             % za posmatrani skup suseda definise se najbolje
154             % pronadjeno resenje (nBest)
155             nBest = pBest;
156             nBest_fitness = pBest_fitness;
157             if( neighbor_best_fitness(1) > nBest_fitness )
158                 nBest = particle(neighbor(1), :, index_1);
159                 nBest_fitness = neighbor_best_fitness(1);
160             end
161             if( neighbor_best_fitness(2) > nBest_fitness )
```

```
162         nBest = particle(neighbor(2)[:,index_2]);
163         nBest_fitness = neighbor_best_fitness(2);
164     end
165
166     % odredjivanje globalno najboljeg resenja (gBest)
167     if( p==1 && itr==1 )
168         gBest = particle(1, :, 1);
169         gBest_fitness = fitness(1, 1);
170     elseif fitness(p, itr) > gBest_fitness
171         gBest_fitness = fitness(p, itr);
172         gBest = particle(p, :, itr);
173     end
174     otherwise
175         error('Potrebno je uneti min ili max')
176     end
177
178     % azuriranje brzine p-te cestice
179     velocity(p, :, (itr+1)) = w(itr)*velocity(p, :, itr) ...
180     + social_constant*rand(1, num_dimensions) ...
181     .*(nBest-particle(p, :, itr)) + cognitive_constant ...
182     *rand(1, num_dimensions).*(pBest-particle(p, :, itr));
183     for l=1:num_dimensions
184         if velocity(p, l, (itr+1))<Vmin(l)
185             velocity(p, l, (itr+1)) = Vmin(l);
186         end
187         if velocity(p, l, (itr+1))>Vmax(l)
188             velocity(p, l, (itr+1)) = Vmax(l);
189         end
190     end
191
192     % promena položaja p-te cestice
193     particle(p, :, (itr+1)) = particle(p, :, itr) ...
194     + velocity(p, :, (itr+1));
195     for l=1:num_dimensions
196         if space_upper_limits(l)<particle(p, l, (itr+1))
197             particle(p, l, (itr+1)) = space_upper_limits(l);
198             velocity(p, l, (itr+1)) = 0;
199         end
200         if space_lower_limits(l)>particle(p, l, (itr+1))
201             particle(p, l, (itr+1)) = space_lower_limits(l);
202             velocity(p, l, (itr+1)) = 0;
203         end
204     end
205
206     end
207 end
208
209     optimised_parameters = gBest;
210
211 end
```

H GA algoritam sa turnirskom selekcijom

```
1 function optimised_parameters = GA_tournament( objective_function , ...
2     optimization_goal , num_chromosomes , num_genes , min_values , ...
3     max_values , tournament_size , alpha_constant , mutation_rate , ...
4     num_generations )
5
6 % GA_tournament – genetski algoritam sa turnirskom selekcijom
7 %
8 % Ulazne promenljive:
9     % objective_function – naziv funkcije ciji je optimum potrebno
10    %                               utvrditi
11    % optimization_goal – string 'min' ili 'max' u zavisnosti od
12    %                               toga da li se PSO algoritmom resava problem
13    %                               minimizacije ili maksimizacije
14    % num_chromosomes – velicina populacije (broj jedinki u okviru
15    %                               populacije)
16    % num_genes – broj promenljivih cije je vrednosti potrebno
17    %                               utvrditi postupkom optimizacije
18    % min_values – vektor dimenzije 1 x num_genes ciji i-ti element
19    %                               predstavlja minimalnu vrednost i-te promenljive
20    % max_values – vektor dimenzije 1 x num_genes ciji i-ti element
21    %                               predstavlja maksimalnu vrednost i-te promenljive
22    % tournament_size – velicina turnira (broj jedinki koje se nadmeću
23    %                               u turnirskoj selekciji)
24    % alpha_constant – konstanta BLX-alpha ukrstanja
25    % mutation_rate – verovatnoca mutacije gena (mutation_rate <= 1)
26    % num_generations – ukupan broj generacija (iteracija GA algoritma)
27 %
28 % Izlazne promenljive:
29 % optimised_parameters – optimalne vrednosti trazениh parametara
30
31 % proverа da li su prilikom pozivanja GA_tournament
32 % funkcije unete sve promenljive
33 if nargin < 7
34     error('Nisu unete sve promenljive')
35 end
36
37 % proverа da li su min_values i max_values vektori adekvatno definisani
38 [row , col]=size(min_values);
39 if row~=1 || col~=num_genes
40     error('Vektor min_values nije adekvatno definisan')
41 end
42 [row , col]=size(max_values);
43 if row~=1 || col~=num_genes
44     error('Vektor max_values nije adekvatno definisan')
45 end
46 for i=1:num_genes
47     if min_values(i)>=max_values(i)
48         error('Maksimalne vrednosti promenljivih nisu vece od minimalnih
49             vrednosti')
50     end
51 end
```

```
51
52     format long;
53
54     % inicijalizacija – slucajan odabir vrednosti gena
55     chromosomes = zeros(num_chromosomes,num_genes);
56     for i=1:num_chromosomes
57         for j=1:num_genes
58             chromosomes(i,j) = min_values(j) + ...
59                 (max_values(j)-min_values(j))*rand();
60         end
61     end
62
63     % prilikom formiranja nove generacije jedinki, u skladu sa
64     % elitistickom strategijom, najbolja jedinka se direktno
65     % prenosi u narednu generaciju, dok preostale bivaju zamenjene
66     % potomcima, tako da je broj potomaka za jedan manji od velicine
67     % populacije
68     num_childs = num_chromosomes - 1;
69
70     % proces optimizacije odvija se u num_generations iteracija
71     for generation=1:num_generations
72         for chromosome_id=1:num_chromosomes
73             % procena prilagodjenosti jedinke
74             fitness(chromosome_id) = feval(objective_function,...
75                 chromosomes(chromosome_id,:));
76         end
77
78         switch optimization_goal
79             case 'min' % problem minimizacije
80                 format long;
81
82                 % elitizam – pronalazenje najkvalitetnije jedinke
83                 % (best_chromosome)
84                 [sorted_fitness,ind] = sort(fitness);
85                 best_chromosome = chromosomes(ind(1),:);
86
87                 % formiranje potomaka
88                 childs = zeros(num_childs,num_genes);
89                 i=1;
90                 while i<=num_childs
91                     % turnirskom selekcijom biramo (razlicite) roditeljske
92                     % jedinke
93                     tournament = randperm(num_chromosomes);
94                     tournament = tournament(1:tournament_size);
95                     [min_fitness, best_id] = min(fitness(tournament));
96                     parents(1) = tournament(best_id);
97
98                     parents(2) = parents(1);
99                     while parents(2)==parents(1)
100                         tournament = randperm(num_chromosomes);
101                         tournament = tournament(1:tournament_size);
102                         [min_fitness, best_id] = min(fitness(tournament));
103                         parents(2) = tournament(best_id);
104                     end
105
106                 % BLX-alpha ukrstanje odabranih roditelja
```



```
107         for j=1:num_genes
108             min_value = min(chromosomes(parents(1),j) , ...
109                 chromosomes(parents(2),j));
110             max_value = max(chromosomes(parents(1),j) , ...
111                 chromosomes(parents(2),j));
112             I = max_value - min_value;
113             min_value = max(min_value - I*alpha_constant , ...
114                 min_values(j));
115             max_value = min(max_value + I*alpha_constant , ...
116                 max_values(j));
117             childs(i,j) = min_value + (max_value-min_value) ...
118                 *rand();
119         end
120
121         % neuniformna mutacija gena
122         for j=1:num_genes
123             if rand() <= mutation_rate
124                 if rand() < 0.5
125                     delta = (max_values(j)-childs(i,j)) * ...
126                         (1-rand()^((1-generation / ...
127                             num_generations)^3));
128                     childs(i,j) = childs(i,j) + delta;
129                 else
130                     delta = (childs(i,j)-min_values(j)) * ...
131                         (1-rand()^((1-generation / ...
132                             num_generations)^3));
133                     childs(i,j) = childs(i,j) - delta;
134                 end
135             end
136         end
137
138         i = i + 1;
139
140     end
141     case 'max' % problem maksimizacije
142         format long;
143
144         % elitizam - pronalazenje najkvalitetnije jedinke
145         % (best_chromosome)
146         [sorted_fitness, ind] = sort(fitness);
147         best_chromosome = chromosomes(ind(num_chromosomes),:);
148
149         % formiranje potomaka
150         childs = zeros(num_childs, num_genes);
151         i=1;
152         while i <= num_childs
153             % turnirskom selekcijom biramo (razlicite) roditeljske
154             % jedinke
155             tournament = randperm(num_chromosomes);
156             tournament = tournament(1:tournament_size);
157             [max_fitness, best_id] = max(fitness(tournament));
158             parents(1) = tournament(best_id);
159
160             parents(2) = parents(1);
161             while parents(2) == parents(1)
162                 tournament = randperm(num_chromosomes);
```

```
163         tournament = tournament(1:tournament_size);
164         [max_fitness, best_id] = max(fitness(tournament));
165         parents(2) = tournament(best_id);
166     end
167
168     % BLX-alpha ukrstanje odabranih roditelja
169     for j=1:num_genes
170         min_value = min(chromosomes(parents(1),j), ...
171             chromosomes(parents(2),j));
172         max_value = max(chromosomes(parents(1),j), ...
173             chromosomes(parents(2),j));
174         I = max_value - min_value;
175         min_value = max(min_value - I*alpha_constant, ...
176             min_values(j));
177         max_value = min(max_value + I*alpha_constant, ...
178             max_values(j));
179         childs(i,j) = min_value + (max_value-min_value)...
180             *rand();
181     end
182
183     % neuniformna mutacija gena
184     for j=1:num_genes
185         if rand() <= mutation_rate
186             if rand() < 0.5
187                 delta = (max_values(j)-childs(i,j))*...
188                     (1-rand() ^ ((1-generation / ...
189                         num_generations) ^ 3));
190                 childs(i,j) = childs(i,j) + delta;
191             else
192                 delta = (childs(i,j)-min_values(j))*...
193                     (1-rand() ^ ((1-generation / ...
194                         num_generations) ^ 3));
195                 childs(i,j) = childs(i,j) - delta;
196             end
197         end
198     end
199
200     i = i + 1;
201
202     end
203     otherwise
204         error('Potrebno je uneti min ili max')
205     end
206
207     % formiranje nove generacije jedinki
208     chromosomes = [childs; best_chromosome];
209
210 end
211
212 optimised_parameters = chromosomes(num_chromosomes,:);
213
214 end
```

I GA algoritam sa *rank based* selekcijom

```
1 function optimised_parameters = GA_rank_based( objective_function, ...
2     optimization_goal, num_chromosomes, num_genes, min_values, ...
3     max_values, alpha_constant, mutation_rate, num_generations )
4
5 % GA_rank_based - genetski algoritam sa rank-based selekcijom
6
7 % Ulazne promenljive:
8 % objective_function - naziv funkcije ciji je optimum potrebno
9 %                       utvrditi
10 % optimization_goal - string 'min' ili 'max' u zavisnosti od
11 %                       toga da li se PSO algoritmom resava problem
12 %                       minimizacije ili maksimizacije
13 % num_chromosomes - velicina populacije (broj jedinki u okviru
14 %                       populacije)
15 % num_genes - broj promenljivih cije je vrednosti potrebno
16 %                       utvrditi postupkom optimizacije
17 % min_values - vektor dimenzije 1 x num_genes ciji i-ti element
18 %                       predstavlja minimalnu vrednost i-te promenljive
19 % max_values - vektor dimenzije 1 x num_genes ciji i-ti element
20 %                       predstavlja maksimalnu vrednost i-te promenljive
21 % alpha_constant - konstanta BLX-alpha ukrstanja
22 % mutation_rate - verovatnoca mutacije gena (mutation_rate <= 1)
23 % num_generations - ukupan broj generacija (iteracija GA algoritma)
24
25 % Izlazne promenljive:
26 % optimised_parameters - optimalne vrednosti trazениh parametara
27
28 % provera da li su prilikom pozivanja GA_tournament
29 % funkcije unete sve promenljive
30 if nargin < 7
31     error('Nisu unete sve promenljive')
32 end
33
34 % provera da li su min_values i max_values vektori adekvatno definisani
35 [row, col]=size(min_values);
36 if row~=1 || col~=num_genes
37     error('Vektor min_values nije adekvatno definisan')
38 end
39 [row, col]=size(max_values);
40 if row~=1 || col~=num_genes
41     error('Vektor max_values nije adekvatno definisan')
42 end
43 for i=1:num_genes
44     if min_values(i)>=max_values(i)
45         error('Maksimalne vrednosti promenljivih nisu vece od minimalnih
46             vrednosti')
47     end
48
49 format long;
50
```

```
51 % inicijalizacija – slucajan odabir vrednosti gena
52 chromosomes = zeros(num_chromosomes,num_genes);
53 for i=1:num_chromosomes
54     for j=1:num_genes
55         chromosomes(i,j) = min_values(j) + ...
56             (max_values(j)-min_values(j))*rand();
57     end
58 end
59
60 % prilikom formiranja nove generacije jedinki, u skladu sa
61 % elitisticom strategijom, najbolja jedinka se direktno
62 % prenosi u narednu generaciju, dok preostale bivaju zamenjene
63 % potomcima, tako da je broj potomaka za jedan manji od velicine
64 % populacije
65 num_childs = num_chromosomes - 1;
66
67 % proces optimizacije odvija se u num_generations iteracija
68 for generation=1:num_generations
69     for chromosome_id=1:num_chromosomes
70         % procena prilagodjenosti jedinke
71         fitness(chromosome_id) = feval(objective_function,...
72             chromosomes(chromosome_id,:));
73     end
74
75     switch optimization_goal
76     case 'min' % problem minimizacije
77         format long;
78         % elitizam – pronalazenje najkvalitetnije jedinke
79         % (best_chromosome)
80         [fitness,ind] = sort(fitness,'descend'); % sortiranje
81         % jedinki od najlosije ka najkvalitetnijoj
82         best_chromosome = chromosomes(ind(num_chromosomes),:);
83     case 'max' % problem maksimizacije
84         format long;
85         % elitizam – pronalazenje najkvalitetnije jedinke
86         % (best_chromosome)
87         [fitness,ind] = sort(fitness); % sortiranje jedinki od
88         % najlosije ka najkvalitetnijoj
89         best_chromosome = chromosomes(ind(num_chromosomes),:);
90     otherwise
91         error('Potrebno je uneti min ili max')
92     end
93
94     fitness = 1:num_childs;
95     p = fitness/sum(fitness); % za svaku jedinku definise
96     % se verovatnoća selekcije u zavisnosti od njene pozicije
97     % u sortiranom nizu
98
99     % formiranje potomaka
100    cum_p = cumsum(p);
101    childs = zeros(num_childs,num_genes);
102    i=1;
103    while i<=num_childs
104        % selekcijom zasnovanom na rangu biraju se razliciti
105        % roditelji
106        parents(1) = rand();
```

```
107         for j=1:num_chromosomes
108             if parents(1)<=cum_p(j)
109                 parents(1) = ind(j);
110                 break;
111             end
112         end
113
114         parents(2) = parents(1);
115         while parents(2)==parents(1)
116             parents(2) = rand();
117             for j=1:num_chromosomes
118                 if parents(2)<=cum_p(j)
119                     parents(2) = ind(j);
120                     break;
121                 end
122             end
123         end
124
125         % BLX-alpha ukrstanje odabranih roditelja
126         for j=1:num_genes
127             min_value = min(chromosomes(parents(1),j) ,...
128                 chromosomes(parents(2),j));
129             max_value = max(chromosomes(parents(1),j) ,...
130                 chromosomes(parents(2),j));
131             I = max_value - min_value;
132             min_value = max(min_value - I*alpha_constant ,...
133                 min_values(j));
134             max_value = min(max_value + I*alpha_constant ,...
135                 max_values(j));
136             childs(i,j) = min_value + (max_value-min_value)...
137                 *rand();
138         end
139
140         % neuniformna mutacija gena
141         for j=1:num_genes
142             if rand()<=mutation_rate
143                 if rand()<0.5
144                     delta = (max_values(j)-childs(i,j))*...
145                         (1-rand()^((1-generation /...
146                             num_generations)^3));
147                     childs(i,j) = childs(i,j) + delta;
148                 else
149                     delta = (childs(i,j)-min_values(j))*...
150                         (1-rand()^((1-generation /...
151                             num_generations)^3));
152                     childs(i,j) = childs(i,j) - delta;
153                 end
154             end
155         end
156
157         i = i + 1;
158
159     end
160
161     % formiranje nove generacije jedinki
162     chromosomes = [childs; best_chromosome];
```

```
163
164     end
165
166     optimised_parameters = chromosomes(num_chromosomes,:);
167
168 end
```

Biografija autora

Jelena (Zoran) Tomić je rođena 14.5.1986. godine u Kraljevu. Osnovnu školu i Gimnaziju završila je u Vrnjačkoj Banji. Dobitnik je Vukove diplome kako za osnovno, tako i za srednješkolsko obrazovanje. Osnovne akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu upisala je školske 2005/06. godine. Diplomirala je 2009. godine na odseku Telekomunikacije i informacione tehnologije, sa prosečnom ocenom 8.93, odbranivši diplomski rad pod nazivom „Osnovni principi i primene MIMO tehnologija“. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je završila 2011. godine sa prosečnom ocenom 9.67, odbranivši master rad pod nazivom „Analiza tehnika kontrole pristupa medijumu u IEEE 802.11s mrežama“. Školske 2011/12. godine upisala je doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na modulu Telekomunikacije. Sve ispite na doktorskim studijama je položila sa ocenom 10.

U maju 2012. godine, zasnovala je radni odnos na Fakultetu za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu, gde je zaposlena i danas kao istraživač saradnik. Od februara 2014. godine angažovana je kao saradnik u nastavi na predmetima Elektrotehnika sa elektronikom, Fizika i Tehnička fizika. Od 2012. godine učestvuje na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „Razvoj metodologija i sredstava za zaštitu od buke urbanih sredina“ pri čemu je angažovana u izradi softverskog modula za kreiranje karata buke, analizi uticaja dominantnih izvora buke u urbanoj sredini, kao i izradi modela za predviđanje komunalne buke. Od 2017. godine angažovana je na međunarodnom H2020 projektu pod nazivom *Advanced design rules for optiMAL Dynamic properties of Additive Manufacturing products*. Tokom diplomskih i postdiplomskih studija, objavila je 20 naučnih i stručnih radova.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Јелена (Зоран) Томић

Број индекса 5017/11

Изјављујем


да је докторска дисертација под насловом

Примена soft-computing техника за предвиђање нивоа буке друмског саобраћаја

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 27.09.2017



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јелена (Зоран) Томић

Број индекса 5017/11

Студијски програм Телекомуникације

Наслов рада Примена soft-computing техника за предвиђање нивоа буке друмског саобраћаја

Ментор проф. др Драгана Шумарац-Павловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 27.09.2017



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Примена soft-computing техника за предвиђање нивоа буке друмског саобраћаја

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 27.09.2017



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.