UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Miodrag S. Stanojević

PROCENA INDEKSA PRIVATNOSTI U ZGRADAMA NA OSNOVU UGAONE RASPODELE INCIDENTNE ENERGIJE

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Miodrag S. Stanojević

ESTIMATION OF SPEECH PRIVACY INDEX IN BUILDINGS BASED ON ANGULAR DISTRIBUTION OF INCIDENCE ENERGY

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2023

Mentor:

dr DRAGANA ŠUMARAC PAVLOVIĆ, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr MILOŠ BJELIĆ, docent,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr LJILJANA BRAJOVIĆ, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

dr JELENA ĆERTIĆ, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr DRAGOMIR EL MEZENI, docent,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se profesorima Dragani Šumarac Pavlović i Miomiru Mijiću na sveukupnoj podršci tokom studiranja. Njihovom zaslugom sam se zainteresovao za oblast tehničke akustike, a svojom energijom su učinili da Laboratoriju za Akustiku s ponosom smatram svojom matičnom kućom. Njihov doprinos mom profesionalnom i ljudskom razvoju, kao i izradi ove teze je nemerljiv.

Zahvaljujem se kolegi i saborcu Milošu Bjeliću. Bez njega bi ovaj rad bio apsolutno nemoguć. Od prvog zajedničkog projekta pre 12 godina do danas je prava privilegija sarađivati s ovakvim čovekom. Njegova marljivost i posvećenost su inspiracija. Njegova podrška je bila presudna u izradi ove disertacije.

Zahvaljujem se prijateljima i porodici na podršci i razumevanju tokom ovog procesa.

Naslov teze: Procena indeksa privatnosti u zgradama na osnovu ugaone raspodele incidentne energije

Rezime – Privatnost je najznačajnija komponenta zvučnog komfora u zgradama. Ona se odnosi na primetnost zvukova nastalih ljudskim aktivnostima u okruženju, od kojih je najznačajniji govor. Percepcija govora, njegova prepoznatljivost i razumljivost, zavise od odnosa signal/šum na mestu slušanja. U kontekstu privatnosti pod signalom se podrazumeva neželjeni zvuk govora iz susednih prostorija određen izolacionim svojstvima pregrada, a šum je ambijentalna buka čiji maskirajući efekat utiče na osećaj privatnosti. U urbanim sredinama izvor konstantne buke u prostorijama je zvuk saobraćaja koji prodire kroz fasadu. Energetska efikasnost u savremenoj gradnji nametnula je višeslojna, debela staklena okna, što je dovelo do značajnog poboljšanja zvučne izolovanosti unutrašnjosti zgrada. Rezultat toga je veoma nizak nivo ambijentalne buke u stanovima, što se odrazilo i na stanje privatnosti.

U tradicionalnom pristupu projektovanju zgrada podešavanje zvučnog komfora vrši se isključivo kriterijumima zvučne izolacije, zanemarujući u tome značaj ambijentalne buke. To je u mnogim slučajevima dalo nezadovoljavajuće rezultate, pa se ambijentalna buka nametnula kao istraživačka tema. Ova disertacija objedinjuje skup istraživanja koja su imala za cilj razvoj metodologije za predikciju ambijentalne buke u zgradama. Ona je zasnovana na primeni mikrofonskih nizova i prostorno-vremenske obrade signala kao alata za uvid u strukturu zvučnog polja koje napada fasade zgrada, odnosno ugaonu raspodelu incidentne energije. Iz toga se mogu proceniti postignuta izolaciona svojstva fasadnih pregrada u različitim urbanim konfiguracijama.

U disertaciji je sprovedena analiza mogućnosti optimizacije parametara prostorno-vremenske obrade signala, ugaone rezolucije i vremenskog intervala uzorkovanja buke, a rezultati su tumačeni sa aspekta uticaja na procenu izolacione moći fasadnih pregrada u zadatim okolnostima i predikciju ambijentalne buke. Cilj ovog istraživanja je optimizacija parametara obrade prema zadatoj situaciji na terenu. Analiza je sprovedena na četiri tipične urbane lokacije, različite po profilu terena i poziciji u odnosu na prometne gradske saobraćajnice, zbog čega imaju različite karakteristike incidentne energije na fasadama. U disertaciji je prikazana analiza globalnih karakteristika saobraćajne buke i ključnih zvučnih događaja na lokacijama, i na osnovu toga je procenjen uticaj optimizacije na nivo ambijentalne buke u prostorijama.

Da bi se predložena metodologija verifikovala u kontekstu stanja u zgradama izvršeno je istraživanje u kome su objedinjeni rezultati merenja ambijentalne buke u boravišnim prostorijama različitih zgrada. Takođe, prikupljeni su podaci o karakteristikama različitih izvora buke susedstva u zgradama. Rezultati njihove analize dokazali su postojanje realnog problema narušene privatnosti i potrebe za predikcijom stanja ambijentalne buke u zgradama.

Na osnovu sprovedenog istraživanja u disertaciji su predložena dva pristupa za korekciju laboratorijskih vrednosti izolacione moći fasada u realnim urbanim situacijama i komentarisan je njihov uticaj na stanje ambijentalne buke u zgradama. Razmatrana je mogućnost definisanja klasa zvučnog komfora i metodologije za izbor optimalnih građevinskih elemenata u ranoj fazi projektovanja kako bi se postigla zadata klasa zvučnog komfora.

Ključne reči: klase privatnosti, korektivni faktori, mikrofonski niz, optimizacija, privatnost, ugaona raspodela, zvučna izolacija, zvučni komfor

Naučna oblast: Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Akustika

UDK broj: 621.3

Dissertation title: Estimation of speech privacy index in buildings based on angular distribution of incidence energy

Summary – Privacy is the most important component of the acoustic comfort in buildings. Privacy refers to the noticeability of the sounds from surrounding human activities, out of which speech is the most important one. Speech perception, its noticeability and intelligibility depend on the signal to noise ratio at the place of listening. In the context of privacy, signal refers to the unwanted sound of the speech from the adjacent rooms whose level is determined by the partitioning wall, and noise refers to the ambient noise whose masking effect influences the impression of privacy. In urban environments the source of the constant noise in buildings is the sound of traffic penetrating the façade. Energy efficiency in modern civil engineering has led to standard use of multilayered, thick glass partitions, which significantly improved the sound insulation of the building interior. The result is a low level of ambient noise, which affects privacy.

In the traditional approach to building design, the adjustment of the acoustic comfort is performed exclusively with sound insulation criteria, thereby neglecting the importance of ambient noise. In many cases this led to unsatisfactory results, and imposed ambient noise as an important research topic. This thesis encompasses a collection of researches with a goal of developing a methodology for the prediction of ambient noise in buildings. It is based on using microphone arrays and space-time signal processing as tools which can give insight into the structure of the sound field and the angular distribution of incident energy impeding facades. This allows for the prediction of the insulation properties of façade partitions in different urban configurations.

A research is presented which analyzes the optimization of space-time processing parameters, spatial resolution and time interval of noise sampling. The results are interpreted in the context of influence on the prediction of façade insulation and ambient noise. The goal of this research is the parameter optimization according to the given field situation. The analysis is performed on four urban locations, which differ in terrain configuration, relative position to the dominant city traffic areas, resulting in significantly different characteristics of the incident energy on the façade. The analysis is conducted on global noise characteristics of the location, as well as key sound events, based on which the influence of the optimization on the ambient level is assessed.

For the purpose of verification of the proposed methodology in the context of noise state in buildings, a research is conducted, in which results of ambient noise measurements in different buildings were performed. Furthermore, the data on the characteristics of different neighboring noise sources in buildings were collected. Analyses of this data has confirmed existence of a real problem of compromised privacy and the need for ambient noise prediction in buildings.

Based on the conducted research, two methods for the correction of laboratory values of sound insulation of facades are proposed. Their influence on the predicted state of ambient noise is analyzed. The discussion is presented on the possibility of defining acoustic comfort classes and the methodology for selection of optimal constructive elements in building design to achieve the desired class of acoustic comfort.

Keywords: Acoustic comfort, angular distribution, corrective coefficient, microphone array, optimization, privacy class, privacy, sound insulation,

Scientific area: Electrical engineering

Scientific subarea: Acoustics

UDK code: 621.3

Sadržaj:

1 UVOD 1

2 PRIVATNOST I ZVUČNI KOMFOR 4

2.1 Uvod 4
2.2 Faktori koji određuju privatnost u boravišnim prostorijama 4
2.3 Parametri za kvantifikovanje stanja privatnosti 7
2.4 Ambijentalna buka kao faktor privatnosti 10

3 TEORIJA MIKROFONSKIH NIZOVA I PROSTORNO-VREMENSKA OBRADA SIGNALA 12

3.1 Uvod 12
3.2 Geometrija mikrofonskih nizova 13
3.3 Predstavljanje usmerenosti mikrofonskog niza 15
3.4 Prostorno-vremenska obrada signala sa mikrofonskih nizova 17
3.4.1. Konvencionalni beamforming 18
3.4.2. Dekonvolucioni algoritmi 20
3.4.3. DAMAS algoritam 21
3.4.4. DAMAS2 algoritam 22

4 METODOLOGIJA MERENJA MIKROFONSKIM NIZOM 24

4.1 Ugaona raspodela incidentne energije 25
4.2 Korekcija izolacionih moći monolitnih pregrada 26
4.3 Korekcija laboratorijskih vrednosti izolacione moći složenih pregradnih konstrukcija na bazi ugaone raspodele incidentne energije 28
4.3.1. Proračun incidentne energije u difuznom i homogenom polju 28
4.3.2. Izolaciona moć pregrade pri pobudi iz difuznog polja 30
4.3.3. Proračun korekcionog faktora na osnovu raspodele incidentne energije 32
4.4 Eksperimentalna postavka 35

5 POVEĆANJE EFIKASNOSTI MERNE METODOLOGIJE 37

5.1 Kompleksnost algoritama prostorno-vremenske obrade signala 37
5.2 Optimizacija ugaone rezolucije algoritama prostorno-vremenske obrade signala 38
5.2.1. Eksperimentalna analiza mogućnosti optimizacije ugaone rezolucije u prostorno-vremenskoj obradi signala 42
5.3 Eksperimentalna analiza mogućnosti optimizacije vremenskog intervala merenja 52
5.4 Analiza ključnih događaja u ulicama 59

6 ISTRAŽIVANJE STANJA AMBIJENTALNE BUKE U STANOVIMA 63

6.1 Postupak analize postojećeg stanja ambijentalne buke u prostorijama 63
6.2 Rezultati analize 64
6.3 Procena ambijentalne buke u prostorijama primenom mikrofonskog niza 66
6.4 Diskusija 70

7 ANALIZA STANJA PRIVATNOSTI U BORAVIŠNIM PROSTORIJAMA 71

7.1 Očekivani nivoi buke u prostorijama – „buka suseda“ 72
7.2 Stanje privatnosti pri standardnim vrednostima izolacione moći pregradih konstrukcija 75
7.3 Ocena privatnosti za različita stanja nivoa ambijentalne buke 76
7.4 Predikcija nivoa ambijentalne buke u različitim urbanim sredinama 78
7.5 Procena varijabilnosti indeksa privatnosti na osnovu analize ključnih događaja 80

9 ZAKLJUČAK 83

10 LITERATURA 86

11 PRILOZI 92

1 Uvod

Svakodnevni život čoveka ne pruža mogućnost spoznaje da njegovo čulo sluha ima izuzetno veliku osetljivost. Koristeći elementarnu teoriju zvučnog polja u vazduhu može se proceniti da je pri najtišim zvukovima koje uvo u idealnim uslovima može registrovati pomeraj molekula vazduha koji deluju na uvo na srednjim frekvencijama reda veličine Angstrema [1], [2], [3]. To je apsolutna donja granica percepcije čula sluha koja bi se mogla označiti i kao „granica apsolutne tišine“ iznad koje čulo sluha ima sposobnost da registruje zvukove.

Ovaj podatak o najmanjoj veličini poremećaja u vazduhu pri kome čulo sluha može registrovati zvučnu senzaciju dokazuje tvrdnju o velikoj osetljivosti čula sluha čoveka. Iako se u ljudskom saznanju izuzetna osetljivost sluha pripisuje samo nekim životinjama, očigledno je da su i kod čoveka fizičke granice percepcije zvuka u apsolutnom smislu velike. Nažalost, to se u svakodnevnom životu ne može doživeti kao iskustvo, te stoga ljudi nemaju svest o izuzetnosti svog čula. Razlog tome je permanentno prisustvo raznih zvukova u životnom okruženju koji su uvek manje ili više iznad te apsolutne donje granice percepcije. Oni se uobičajeno označavaju kao „ambijentalna buka“ i predstavljaju jednu od fizičkih odlika životne sredine. Zbog toga svest o apsolutnoj granici percepcije za čoveka u običnom životu ostaje samo pojam iz teorije, a mogućnost da se to dokazuje moguće je samo u laboratorijama i u posebnom medicinskim ispitivanjima.

Pojam buke se u svesti ljudi uglavnom vezuje za veoma jake zvukove. Tada se opravdano postavlja pitanje zaštite čula sluha od trajnih fizioloških posledica, a u ekstremnim slučajevima i od anatomskih oštećenja [4]. Međutim, to su po pravilu ekscesne situacije koje se u normalnim životnim okolnostima izuzetno retko dešavaju. U svakodnevnom životu uticaj ambijentalne buke je u sasvim drugom domenu. Naime, pojedinačni zvukovi koji čine ambijentalnu buku potiču od mnoštva izvora koji se nalaze u širokom krugu oko slušaoca. Oni su na ulazu u uvo integrisani u jedinstvenu zvučnu pojavu u kojoj je nemoguće raspoznati pojedinačne zvučne komponente, što znači da je u tom zvuku izbrisan svaki informacioni sadržaj i registruje se samo holistički [5], [6]. Neprimetnost ambijentalne buke, iako je svojim intenzitetom iznad apsolutne granice percepcije, posledica je činjenice da takav zvuk ne nosi informacije koje bi u svesti slušaoca skrenule pažnju na svoje postojanje. Čulo sluha u mozgu bavi se dekodovanjem informacija iz zvuka koji prima, pa kada ih u onom što se čuje ne prepoznaje, takav zvuk ne ostavlja traga u domenu svesnog. Zato se u mnogim okolnostima subjektivno prepoznaje tišina samo zbog toga što prisustvo neumitne ambijentalne buke ostaje neprimećeno. Ipak, i tada uticaj ambijentalne buke postoji, ali na sasvim drugačiji način.

I kada ne privuče pažnju slušaoca, buka iz okruženja u unutrašnjem uvu neumitno pobuđuje na oscilovanje njegovu bazilarnu membranu. Svaka zvučna pobuda nivoa nižeg od prisutne ambijentalne buke ne ostavlja traga u odzivu bazilarne membrane, a time ni u svesti slušaoca. Takva pojava se u psihoakustici naziva maskiranje [2], [7], [8]. Kada bi u životnoj sredini nekim čudom nestala stalno prisutna ambijentalna buka, na otvorenom prostoru bi se čuli i razumeli razgovori ljudi koji se odvijaju u širokom krugu oko slušaoca, čulo bi se preletanje svih aviona na nebu i slične zvučne pojave. Možda to može izgledati kao zanimljivo iskustvo, ali bi vrlo brzo postalo velika mora. Svi ti iznenadno dostupni zvukovi, budući da postaju primetni čulom sluha, prinudno bi skretali pažnju i remetili koncentraciju u okolnostima kad se želi mir, kad se vodi razgovor ili kada se jednostavno želi prepuštanje sopstvenim mislima. Dakle, samo zahvaljujući nekom tihom huku, stalno prisutnom svuda i čineći tako „realnu“ tišinu, mnogi neželjeni zvukovi ostaju neprimećeni, to jest maskirani. Zbog toga je u mnogim okolnostima prisutnost buke, i kada se subjektivno ne primećuje, od bitnog uticaja za doživljaj životnog okruženja [9].

Ono što se svakodnevno doživljava kao tišina značajno je iznad pomenute apsolutne donje granice percepcije čula sluha. Informacije o tome mogu se naći u raznorodnoj literaturi. Na primer, u kriterijumima koji definišu uslove za akustički dizajn studijskih prostora za snimanje muzike i slične

namene. U takvim objektima nalaze se prostorije sa najstrožim zahtevima u pogledu potiskivanja ambijentalne buke jer, subjektivno ocenjivano, studiji moraju biti „oaze tišine“. Podaci iz literature pokazuju da zvuk čiji je nivo oko 20 dB iznad pomenute apsolutne granice čujnosti stvara subjektivni utisak „apsolutne“ tišine kakva je potrebna u studijima [10], [11], [12], [13], [14]. U realnim okolnostima, izvan ekstremnih studijskih uslova, ambijentalna buka čiji je nivo oko 30 dB iznad apsolutne granice čujnosti doživljava se kao tišina ako u njoj nema pojedinačnih ekscesnih zvukova koji bi privukli pažnju čula sluha [15]. Takav podatak je u nacionalnim regulativama svih država predstavljen kao maksimalno dozvoljeni nivo ambijentalne buke u boravišnim prostorijama koje treba da zadovolje potrebne uslove tišine za normalan san. Propisan je za boravišne prostorije stanova, za hotelske sobe i slične prostore [16]. Najzad, u literaturi se mogu naći podaci da se i ambijentalna buka nivoa oko 40 dB iznad apsolutne granice percepcije može u nekim okolnostima subjektivno doživljavati kao tišina. Podaci iz literature koji definišu kriterijume za akustički dizajn poslovnih prostora navode da u nekim okolnostima čak i ambijentalna buke nivoa oko 50 dB(A) predstavlja ambijent koji omogućava neophodnu koncentraciju i intelektualni rad, dakle tišinu [17], [18], [19].

Navedeni podaci iz raznorodne literature ukazuju da pojam tišine nije apsolutan, već u značajnoj meri predstavlja subjektivnu kategoriju isključivo vezanu za trenutni doživljaj zvuka. Dok god je zvučna pobuda koja deluje na čulo sluha dovoljno niskog energetskog nivoa, doživljaj tišine povezan je samo s činjenicom da li zvuk nosi neke prepoznatljive informacije detektabilne za moždane centre čula sluha ili ne. Kada takvih informacija nema, slušalac ima doživljaj tišine. Ta činjenica čini razliku između fizičkog domena u kome se prisustvo zvučne energije, bez obzira na apsolutni nivo, uvek može registrovati objektivnim merenjima pomoću instrumenata, i subjektivnog domena u kome je presudna svest o postojanju zvuka u okruženju. Polazeći od pojma i značaja tišine izgrađen je kompleksniji pojam kojim se opisuje kvalitet zvučnog ambijenta i koji se naziva zvučni komfor. On na svoj način određuje doživljaj zvuka u životnoj sredini. Zvučni komfor je definisan preko uslova koje treba zadovoljiti da bi se postiglo takvo stanje [20], [21], [22], [23]. To su: da čovek u prostoriji gde boravi ne čuje aktivnosti suseda i sused ne čuje njegove aktivnosti (označeno kao privatnost), da nivo ambijentalne buke bude ispod neke granice definisane s ciljem da ostane subjektivno neprimetan, i da željeni zvukovi nisu degradirani u meri koja bi ugrozila prepoznatljivost informacija koje nose. U rešavanju zvučnog komfora u zgradama važno je razumevanje specifične uloge tišine u oba domena, fizičkom i subjektivnom.

Zahtev u odnosu na zvučnu izolaciju u projektantskom rešavanju zvučnog komfora može se redefinisati u zahtev za obezbeđenjem uslova u kojim se ne prepoznaju zvukovi iz okruženja. Tako se dolazi do zaključka da u rešavanju tog zadatka bitnu ulogu ima ambijentalna buka. Ona određuje da li će se neki neželjeni zvukovi iz okruženja prepoznati u prostoru koji se štiti ili ne. Ukratko, u realnim okolnostima kakve postoje u zgradama, stambenim i poslovnim, ambijentalna buka je ono što određuje stanje zvučnog komfora [9]. Ovakav stav je u velikom broju praktičnih inženjerskih zadataka jasno dokazan. Brojni su primeri u kojim su žalbe zbog čujnosti zvukova iz okoline, komšijskih iz susednih stanova ili saobraćajnih sa ulice, artikulisane kao problem nedovoljne zvučne izolacije. Pokazalo se da takve žalbe, osim u ređim okolnostima drastičnih propusta projektanata ili izvođača, u najvećem broju nastaju usled prekomerno niskog nivoa osnovne ambijentalne buke u boravišnim prostorijama. To su okolnosti u kojim se inženjerski zadatak sanacije zvučnog komfora neumitno transformiše u zadatak podešavanja nivoa ambijentalne buke da bi se postigla neprepoznatljivost zvukova u kojim su informacije o aktivnosti komšija, o prolasku vozila na ulici i o sličnim zvučnim pojavama. Zanimljivo je da u inženjerskoj praksi to najčešće čini i jedini mogući pristup za rešavanje akustičkih problema u zgradama.

Polazeći od takve suštine i značaja ambijentalne buke u boravišnim prostorijama, ova teza je obuhvatila istraživanja čiji je cilj bio razvijanje metodologije za predikciju njenog nivoa kako bi se omogućila rana procena stanja privatnosti u fazi projektovanja zgrada. Boravišne prostorije stanova se nalaze u okruženju gde postoje dva oblika zvučnih ambijenata iz kojih zvuk dospeva u njih: spoljašnja buka koja u urbanim uslovima dominantno potiče od saobraćaja na ulicama i unutrašnja

buka koja nastaje ljudskim aktivnostima, pre svega govorom, u prostorijama s kojim se te prostorije graniče. Osnovna ideja je da se na osnovu podataka o očekivanim spektralnim i drugim karakteristikama ambijentalne buke mogu utvrditi minimalna potrebna izolaciona svojstva pregradnih elemenata u zgradama za postizanje željenog nivoa ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova, i time obezbedi zadata klasa privatnosti u njima. Sa takvim ciljevima ova disertacija je obradila nekoliko tema u okviru kojih je ostvaren izvestan doprinos.

U tezi su obrađene procedure za predikciju ambijentalne buke unutar zgrada u zavisnosti od urbanog okruženja. Predložena je metoda za precizniju predikciju ambijentalne buke u boravišnim prostorijama zgrade, a time i predikciju vrednosti indeksa privatnosti u njima u ranoj fazi projektovanja. Metoda kao ulazni podatak koristi ugaonu raspodelu incidentne zvučne energije na fasadi dobijenu mikrofonskim nizom i prostorno-vremenskom obradom signala. Pri tome je korišćen mikrofonski niz optimizovan za saobraćajnu buku kojim je izvršeno kvantifikovanje uticaja mikrolokacije u urbanoj zoni na buku koja pogađa fasadu zgrade. Rezultati dobijeni u takvoj analizi omogućavaju unapređenje metoda predikcije stanja buke u zgradama još u fazi njihovog projektovanja i iskorak u odnosu na uobičajene procene stanja buke samo na osnovu zadatih kriterijuma.

Predložena su dva metoda korekcije izolacione moći fasadnih pregrada. Prvi metod podrazumeva korišćenje izmerenih ugaonih raspodela energije na proračun izolacionih moći monolitnih pregrada prema analitičkoj formuli. Drugi metod daje korekcione faktore za laboratorijski izmerene izolacione moći kompleksnih konstrukcija. Predloženi korekcioni faktori se utvrđuju za datu lokaciju prema izemerenim ugaonim raspodelama. U radu su analizirani rezultati primene oba metoda korekcije.

Ispitivanjem realno potrebne prostorne rezolucije algoritama za prostorno-vremensku obradu signala i vremenskog trajanja obrađivanog uzorka buke, u tezi je dokazana mogućnost ubrzavanja i pojednostavljenja postupka analize buke na fasadi mikrofonskim nizom. Pokazano je da se bez značajnijeg gubitka tačnosti rezultata mogu izvršiti redukcije u prostornoj rezoluciji i vremenskom trajanju signala koji se obrađuje. Izvršeno je smanjivanje računske i vremenske kompleksnosti metode kojom se izračunava ugaona raspodela incidentne zvučne energije na fasadi zgrada. Time se ubrzava i olakšava procena stanja saobraćajne buke unutar boravišnih prostorija, što je neophodan korak u predikciji stanja privatnosti u njima.

Izvršeno je eksperimentalno istraživanje ambijentalne buke u boravišnim prostorijama zgrada zidanim prema savremenim standardima i klasifikacija rezultata. Ukazano je na postojanje izuzetno niskih nivoa ambijentalne buke u značajnom procentu merenih rezultata. U radu je dat pregled karakteristika različitih izvora buke koji se mogu pojaviti u stambenim zgradama. Na osnovu ovih rezultata, izvršena je analiza stanja privatnosti pri standardnim vrednostima izolacione moći pregradnih konstrukcija i ukazano je na problem ugrožene privatnosti pri niskim nivoima ambijentalne buke. Izvršena je primena predložene metodologije predikcije ambijentalne buke i stanja privatnosti na četiri merne lokacije. Za različite pretpostavljene konstrukcije fasadnih pregrada dobijeni su rezultati predikcije koji su upoređeni sa mernim rezultatima ambijentalne buke, čime je vršena verifikacija predložene metodologije. Rezultati prikazane analize se mogu koristiti u procesu projektovanja objekata za odabir konstruktivnih elemenata.

U radu je izvršeno nalaženje ugaone incidencije na osnovu analize ključnih događaja koji se mogu uočiti na zadatoj lokaciji. Ovakvim postupkom omogućava se dobijanje rezultata na osnovu veoma kratkih segmenata snimljenih signala, čime se ostvaruju značajne uštede u vremenu obrade. Prikazan je koncept određivanja težinskih koeficijenata koji odgovaraju klasi urbane lokacije, i kojim se težinuju doprinosi pojedinačnih događaja u globalnoj raspodeli incidentne energije. Izvršena je analiza promenljivosti indeksa privatnosti pri različitim događajima. Posmatrajući ekvivalentne nivoe buke ispred fasade i nakon prolaska kroz fasadu ukazano je na uticaj tipa lokacije i njoj odgovarajuće ugaone raspodele na varijansu ekvivalentnih nivoa buke nakon prolaska kroz fasadu.

2 Privatnost i zvučni komfor

2.1 Uvod

Pojam "komfor" označava udobnost u najopštijem smislu [24]. Sledeći to značenje, u građevinskoj akustici je uveden pojam "zvučni komfor". To je jedan od oblika komfora koji se mogu prepoznati u životnoj sredini kao dimenzije njenog kvaliteta, i koji se nekim inženjerskim metodama moraju u dovoljnoj meri obezbediti u boravišnim prostorijama zgrada. Vazdušni, toplotni i svetlosni komfor odavno su postali rutinski zadatak projektanata [25]. Definicije ovih vrsta komfora i načini na koji se postižu pretočeni su u neophodne standarde i pravila za projektovanje. Za razliku od tih, može se reći "tradicionalnih" oblika komfora, zvučni komfor tek u novije vreme dobija mesto koje zaslužuje u projektovanju i izgradnji stambenih i poslovnih zgrada [26].

Postoji više razloga zbog kojih u inženjerskom domenu zvučnom komforu treba pridavati veći značaj. Prvo, po ulasku u zgradu najbrže se primećuju njegovi nedostaci. Na primer, nedovoljna zvučna izolacija konstatuje se gotovo trenutno po useljenju u stan, ili ubrzo po sedanju na radno mesto [27]. Drugo, najteže se saniraju eventualni nedostaci zgrade u domenu zvučnog komfora zbog složenosti putanja kojim zvuk prolazi između prostorija [28]. Svako njegovo unapređenje zahteva građevinske radove, uz moguće posledice po integritet i dimenzije prostora. Najzad, zdravstvene posledice kod ljudi nastale usled neadekvatnog zvučnog komfora najteže se leče, jer su u one u domenu mentalnog zdravlja ljudi čije se promene mogu konstatovati tek sa značajnim zakašnjenjem [29].

Sa aspekta korisnika zgrade verovatno najvažnija dimenzija zvučnog komfora je privatnost. Ona je postala istraživačka tema dosta davno [30]. Privatnost podrazumeva stanje u kome se ne prepoznaju zvukovi nastali aktivnostima suseda, a pre svega govor iz okruženja. Problem obezbeđenja privatnosti u zgradama u svakodnevnom životu nije samo u onome na šta asocira osnovno značenje tog pojma, a to je zaštita poverljivosti izgovorenog, već u sasvim drugom domenu. Govor je akustički signal koji nosi veliku količinu informacija i kao takav, kada se čuje, u svesti privlači pažnju, čak i nevoljno. Posledica toga je da primetnost i razumljivost nekog govora u okruženju skreće pažnju i, u najgorem slučaju, remeti koncentraciju u radu. Kada se privatnost posmatra kroz prizmu zaštićenosti govora, njeno stanje nije binarno - ima je ili je nema. U tome se prepoznaju različiti nivoi zaštite, a time i privatnosti. Govor može biti neprimetan, jedva primetan, primetan ali nerazumljiv, delimično razumljiv ili potpuno razumljiv, a verovatno se mogu definisati još neki međunivoi na takvoj skali percepcije. Govorni aspekt privatnosti detaljnije je ilustrovan u nastavku ovog poglavlja.

Činjenica je takođe da se jedan deo aktivnosti na obezbeđenju zvučnog komfora u zgradama, pa i privatnosti govora, nalazi u administrativnom domenu. To je pitanje kućnog reda, pa čak i nekih zakonskih i podzakonskih dokumenata [30], [16]. Ipak, glavni prostor u kome se traže rešenja za obezbeđenje zvučnog komfora i privatnosti kao njegove najvažnije dimenzije nalazi se u domenu građevinsko-tehničkih sredstava koji se projektom definišu u zgradi, a zatim realizuju na adekvatan način tokom izgradnje.

2.2 Faktori koji određuju privatnost u boravišnim prostorijama

Obezbeđenje privatnosti ljudima koji će u zgradama raditi ili stanovati zadatak je projektanata. Jedan od ključnih koraka u tome je sprečavanje prepoznatljivosti govora iz susednih prostorija – iz stana u stan, iz kancelarije u kancelariju, iz kancelarije ili sobe za sastanke u zajednički okolni prostor i slično. U savremenoj inženjerskoj praksi sve se češće pojavljuje kao problem i prepoznatljivost govora iz okruženja unutar iste prostorije. Takav slučaj je u *open-space* kancelarijama koje su vremenom postale standard u projektovanju i organizaciji poslovnih zgrada.

U procesu projektovanja zgrada privatnost se uobičajeno razmatra indirektno, kroz izbor pregradnih konstrukcija (zidova, tavanica, vrata, prozora) i njihovih izolacionih svojstava. Svaka takva projektantska analiza počinje i završava se procenjivanjem minimalno potrebne vrednosti izolacione

moći *R* pregrada koje se nalaze na relevantnim pozicijama u zgradi, uglavnom bez šireg razmatranja konteksta u kome će se te pregrade nalaziti. Kao što je nagovešteno u uvodu ove disertacije, slabljenje zvukova izolacionim svojstvima pregrada samo je jedan aspekt u obezbeđivanju privatnosti. Drugi, podjednako značajan aspekt je poznavanje stanja ambijentalne buke u prostorima gde se privatnost traži.

Zanimljivo je da se u savremenoj praksi akustičkih konsultanata u značajnom obimu pojavljuju žalbe korisnika zgrada, kada se traži nekakva sanacija postojećih prostora, stambenih i poslovnih. U njima se nakon useljenja u zgradu otkrivaju smetnje zbog nevoljnog praćenja razgovora iz okruženja. Sve brojniji zahtevi za rešavanje takvih problema učinili su da je zaštita privatnosti postala važan aspekt projektovanja i izgradnje poslovnih zgrada. Za takvu praksu izdiferencirala se i jedna posebna multidisciplinarna inženjerska oblast koja se bavi tehničkim sredstvima za poboljšanje privatnosti.

Objašnjenje fizičkog procesa u kome dolazi do ugrožavanja privatnosti zasniva se na osnovnim principima telekomunikacija u kojima je obrađena tema detektabilnosti signala, što podrazumeva njegovu prepoznatljivost i rekonstrukciju na prijemu. Poznato je da tu mogućnost određuje odnos signal/šum, pa se teorija telekomunikacija bavi načinima za izvlačenje korisnog signala iz šuma. Isti koncept važi i u govornim komunikacijama koje se odvijaju u akustičkom domenu, to jest u osnovnom frekvencijskom opsegu govornog signala. Kvalitet percepcije govora, njegova prepoznatljivost i razumljivost, zavisi od odnosa signal/šum na mestu gde se nalazi slušalac kao prijemnik. Pod signalom se podrazumeva akustički govorni signal sa svim njegovim dinamičkim specifičnostima, a pod šumom se podrazumeva ambijentalna buka koja postoji u okruženju slušaoca i istovremeno sa govorom deluje na čulo sluha. Prepoznavanje i razumevanje govora nastaje kroz proces diskriminacije govornog signala iz ambijentalne buke. Razlika u odnosu na telekomunikacije je u činjenici da je sposobnost "izvlačenja" govornog signala iz šuma determinisana graničnim mogućnostima čula sluha i ne može se poboljšavati.

U akustičkoj literaturi je pokazano da odnos signal/šum na mestu slušaoca određuje čujnost i razumljivost govora. To znači da ambijent u kome se sluša govor predstavlja faktor koji određuje privatnost [31], [32], [33]. Zbog dinamičkih karakteristika signala govora njegov odnos signal/šum je kompleksna veličina promenljiva u vremenu o kojoj se može govoriti samo statistički. U prvoj aproksimaciji problem se može posmatrati preko ekvivalentnih vrednosti nivoa zvučnog pritiska, što znači s vrednostima koje se dobijaju dovoljno dugim vremenskim usrednjavanjem. Pokazano je da govor postaje nerazumljiv kada srednja vrednost odnosa signal/šum po opsezima 1/3 oktave približno opadne ispod ±2 dB. Pri tome se taj odnos posmatra u frekvencijskom opsegu od značaja za govor, što je ograničeno na raspon od opsega 1/3 oktave čija je centralna frekvencija 160 Hz do opsega na 5 kHz. Prema tome, privatnost govora predstavlja funkciju nivoa govora na mestu slušanja, što je samo po sebi jasno, ali i nivoa ambijentalne buke na istom mestu.

Ambijentalna buka kao faktor koji određuje odnos signal/šum u boravišnim prostorijama stambenih zgrada dominantno dospeva u njih na dva moguća načina:

- kao buka koja kroz elemente fasade prolazi iz spoljašnje sredine (prevashodno kroz staklena okna prozora i balkonskih vrata kao najslabijih mesta na fasadi sa aspekta zvučne izolacije) i
- kao buka koja iz susednih prostorija prolazi kroz pregradne konstrukcije (zidove, tavanice).

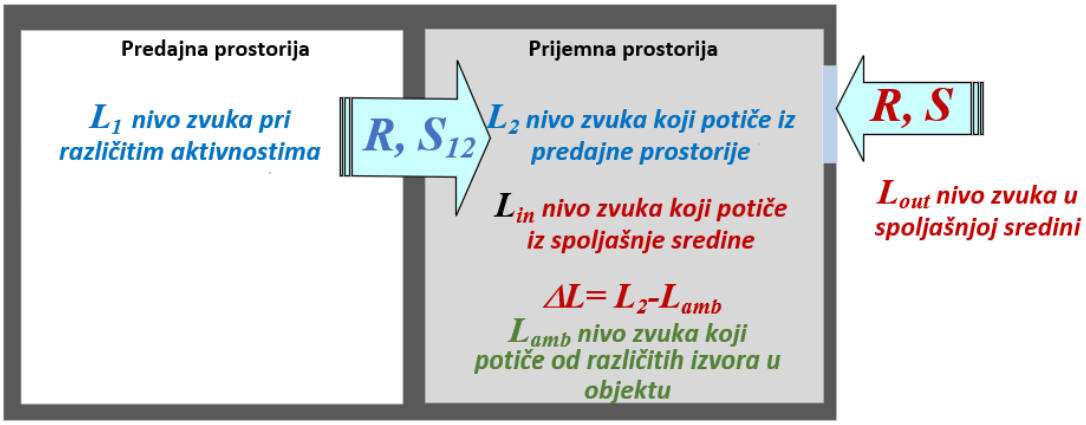
Posmatrano u najopštijem slučaju, u boravišnim prostorijama pored ove dve komponente može postojati i buka uređaja koji se nalaze u njima (frižider, klima uređaj, računar i slično). Takvi izvori buke su pod kontrolom onih koji se nalaze u prostoriji, pa to ovde nije predmet analize. U stanovima se sporadično može javljati i buka vodovodnih i kanalizacionih instalacija. Međutim, ona uglavnom ima nestacionarni, kratkotrajni karakter i ne može se lako kvantifikovati na način koji bi bio primenjiv za procenu njenog uticaja na privatnost.

Buka koja u boravišne prostorije dospeva iz okruženja nastaje kao posledica postojanja nekog zvučnog ambijenta (*soundscape*) koji ih okružuje i iz koga zvučna energija ulazi kroz pregrade. Posmatrajući pravce prolaska buke u boravišne prostorije prepoznaju se dva različita zvučna ambijenta oko njih: spoljašnja sredina i prostori unutar zgrade koji ih okružuju (susedni stanovi, zajedničke prostorije i slično). Ta dva zvučna ambijenta međusobno se razlikuju u sva tri domena: intenzitetskom, spektralnom i vremenskom. Različita su i fizička svojstva putanja kojim zvuk iz ova dva različita ambijenta dospeva u boravišne prostorije.

Zvučni ambijent u spoljašnjoj sredini oko boravišnih prostorija po svom karakteru je dominantno zvuk koji stvara saobraćaj. On zavisi od intenziteta saobraćaja, vrste saobraćaja (automobili, autobusi, tramvaji, vozovi, itd.), konfiguracije zgrada koje okružuju ulicu, strukture fasada i slično. Nasuprot tome, zvučni ambijent u zgradi oko boravišnih prostorija stanova obuhvata sve zvukove koje proizvode ljudske aktivnosti. To je zvučni ambijent susedstva koji nastaje kao proizvod normalnih dnevnih aktivnosti u stanovima, ali takođe mogu nastajati u raznim ekscesnim aktivnostima koji se ponekad mogu okarakterisati i kao „antisocijalno“ ponašanje [34], [35].

Zvučnom ambijentu u prostoru oko boravišnih prostorija stanova u stambenim zgradama mogu doprinositi i razni pogonski mehanizmi koji služe za funkcionisanje zgrade. Međutim, postoji regulativa u kojoj je eksplicitno zabranjeno da se u projektovanju stambenih zgrada prostorije sa takvim sadržajem postavljaju neposredno pored boravišnih prostorija stanova [36]. Nažalost, postoje zgrade u kojima to nije ispoštovano, ali to ne može biti tema u razmatranju ambijentalne buke u stanovima sa aspekta privatnosti.

Na Slici 2.1 šematski su naznačena dva zvučna ambijenta i putanje njihovog uticaja na prostoriju. Koji će od zvukova iz okruženja dominirati u onome što čini ambijentalnu buku unutar neke prostorije zavisi od njihovog karaktera i namene zgrade, od ambijenta u kome se zgrada nalazi, od konstruktivnog sistema kojim je zidana, od opremljenosti prostorija uređajima koji potencijalno stvaraju buku, od starosti tih uređaja, ali i od mnogo drugih faktora koji se ne mogu lako nabrojati, a pogotovo sistematizovati.



Slika 2.1 Šematski prikaz komponenti ambijentalne buke i načina na koje one dospevaju u prostorije utičući na privatnost

Govor iz zvučnog ambijenta susedstva dospeva u prostoriju gde treba obezbediti privatnost kroz pregradnu konstrukciju koja ih deli. To može biti zid, tavanica ili vrata. Polazna veličina u analizi tog procesa je nivo zvuka L_1 koji zvučni ambijent susedstva stvara neposredno pored granične pregrade. Za taj zvučni ambijent je karakteristična periodičnost, nestacionarnost i značajna promenljivost u vremenu. Na svom putu do prostorije u kojoj se analizira stanje privatnosti akustički signal govora prolazi kroz građevinsku pregradu. Snaga zvuka koja dospeva u prostoriju zavisi od izolacione moći pregrade R koju napada zvuk i njene površine S_{12}. Na taj način u prijemnoj prostoriji nastaje signal neželjenog govora definisan vrednošću nivoa govora L_2.

Nivo govornog signala na mestu nastanka L_1 određen je mogućim opsegom zvučne snage koju vokalni trakt može generisati i naučenim načinom na koji ga ljudi uobičajeno koriste. Normativi koji propisuju uslove za pregrade u zgradi, to jest njihova izolaciona svojstva, uobičajeno se zasnivaju na podacima o očekivanom nivou zvuka koji nastaje pri normalnom razgovoru ljudi. U stambenim zgradama to je u izvesnom smislu limitirano još i kućnim redom, a u poslovnim zgradama zahtevima tehnologije rada i eventualno korporativnim normama. Prema regulativi u Srbiji [37] očekivani ekvivalentni nivo zvuka u boravišnim prostorijama zgrada ne prelazi 70 dB(A). Prema istom normativu prostorije u kojima nivo zvuka premašuje tu vrednost spadaju u posebne kategorije označene kao „bučne“, ili „veoma bučne“. Njihova zvučna izolacija se u projektovanju zgrada posebno tretira, pa one generalno nisu tema u razmatranju problema privatnosti.

Jedno ranije istraživanje je detaljnije pokazalo kakvo je stanje nivoa zvuka u boravišnim prostorijama stanova, to jest koliko ozbiljna može biti buka u prosečnim domaćinstvima kada se u njima odvijaju svakodnevne aktivnosti [34], [35], [38]. Isto istraživanje je dalo rezultate koji pokazuju stanje nivoa zvuka u stanovima pri ekscesnim dešavanjima kao što su proslave, slušanje glasne muzike i slično. U sklopu publikovanih rezultata tog istraživanja nalaze se i informacije o izmerenim nivoima zvuka pri razgovoru ljudi u stanovima. Oni pokazuju da se ekvivalentni nivo govora u sobama kreće u opsegu od 60 dB(A) do 73 dB(A). To znači da su rezultati merenja eksperimentalno potvrdili stav unet u zakonsku regulativu da je očekivani ekvivalentni nivo buke u stanovima pri normalnim životnim aktivnostima do 70 dB(A).

U poslovnim zgradama nivo buke u prostorijama je po prirodi stvari kontrolisan zahtevima rada. U literaturi postoje rezultati istraživanja koji pokazuju stanje nivoa zvuka pri razgovoru ljudi u salama za sastanke kakve se uobičajeno nalaze u poslovnim zgradama [32], [39]. Na osnovu merenja u 79 sala zaključeno je da se ekvivalentni nivo govora u njima kreće oko 60 dB(A), sa varijacijama u opsegu ±2 dB. Očigledno je da se u takvoj govornoj komunikaciji ljudi neguje izvesna kultura govora, pa se nivo glasa podešava da bi se govor razumeo u prostoriji, čak i kada se koristi sistem za doozvučavanje. To je značajno niže od nivoa govora kakav povremeno nastaje u stanovima. Jedan od razloga takve razlike može biti i u činjenici da su sale za sastanke u poslovnim zgradama veće od boravišnih prostorija po stanovima.

Zahtevi zvučne izolacije u zgradama zapisani u građevinskim normativima podešavani su sa idejom da se govor ljudi pri ovakvim očekivanim vrednostima njegovog nivoa na mestu nastanka ne razume, ali ne i da se u svim prilikama ne primećuje da postoji sa suprotne strane zidova. U tom procesu implicitno je, kao konstanta, usvojena neka očekivana vrednost ambijentalne buke u prostorijama zgrada. Međutim, inženjersko rešavanje privatnosti u zgradama susreće se sa činjenicom da nivo ambijentalne buke u prostorijama iz raznih razloga ima prilično varijabilnu vrednost. Brojni su primeri ugrožene privatnosti u zgradama iako su ispoštovani zahtevi zvučne izolacije iz važećih normativa. To ukazuje da je u inženjerskoj praksi neophodno kvantifikovati stanje privatnosti, a time i kvalitet zgrada, uzimajući u obzir obe veličine koje određuju odnos signal/šum na mestu slušanja – nivo govora i nivo ambijentalne buke.

Kontinualna buka u prijemnoj prostoriji dominantno nastaje prodorom zvučnog ambijenta spoljašnje sredine kroz pregradne elemente fasade. U prvom redu to su putanje zvuka kroz staklena okna prozora, eventualno balkonskih vrata, jer fasadni zidovi imaju značajno veću vrednost izolacione moći od stakla. Nivo ambijentalne buke u prijemnoj prostoriji L_{in} koja određuje vrednost odnosa signal/šum zavisi od nivoa ambijentalne buke u spoljašnjoj sredini L_{out}, izolacione moći R i površine prozora S na prostoriji.

2.3 Parametri za kvantifikovanje stanja privatnosti

U literaturi se mogu naći neka rešenja za kvantifikovanje stanja privatnosti govora koja uzimaju u obzir odnos signal/šum na mestu slušanja. Jedno moguće rešenje prihvatljivo za istraživanja u ovoj

tezi pronađeno je u američkom standardu ASTM E2638 [40]. Postupak koji je u njemu izložen zasnovan je na radovima Bredlija i saradnika koji su se u dužem periodu bavili tom temom razmatrajući problem sa različitih aspekata [31], [41], [32], [33], [39], [42], [43], [44]. Taj standard definiše parametar nazvan *Speech Privacy Class* (SPC). To je kvantitativna mera stanja privatnosti govora iz prostorije sa aspekta potencijalnog slušaoca koji se nalazi izvan nje. Parametar SPC se u standardu definiše kao mera bezbednosti i poverljivosti govora u salama za sastanke. Iako s takvom originalnom namenom, on se može primeniti za ocene i u drugim okolnostima, kao što su stambene zgrade.

Vrednost SPC je prema standardu definisana kao zbir dva faktora koji određuju prepoznatljivost i razumljivost govora između susednih prostorija. To su: nenormalizovana zvučna izolovanost D između njih i nivoa buke L_b u tački gde se može nalaziti potencijalni slušalac:

$$SPC = D + L_b. \tag{2.1}$$

Kao što se vidi iz izraza (2.1) ovako koncipiran parametar predstavlja zbir dva nezavisna faktora. Prvi član, izolovanost D, pokazuje stanje zvučne izolacije, ali indirektno i nivo govornog signala. Prethodno pomenuta istraživanja nivoa zvuka govora u salama za sastanke i u stanovima pokazala su statističke osobine ovih zvukova i granice u kojim se kreću. To je omogućilo da se u nalaženju odnosa signal/šum pri slušanju govora iz susedne prostorije nivo govornog signala posmatra kroz vrednost izolovanosti D. Drugi član, nivo ambijentalne buke, definiše efekat maskiranja zvukovima iz okruženja. Sabrane, ove dve veličine pokazuju ukupni efekat na stanje privatnosti govora. Što je veća vrednost *SPC*, manji je odnos signal/šum na mestu slušanja.

Standard definiše da se za određivanje vrednosti *SPC* sve relevantne veličine mere u opsezima 1/3 oktave, pa se i izolovanost izračunava po tim opsezima:

$$D_i = L_{pred,i} - L_{prij,i}, \tag{2.2}$$

gde je u i-tom opsegu 1/3 oktave izolovanost D_i, $L_{pred,i}$ nivo zvuka u predajnoj prostoriji u i-tom opsegu 1/3 oktave, a $L_{prij,i}$ nivo zvuka u prijemnoj prostoriji u istom frekvencijskom opsegu. Obe veličine se u standardu posmatraju u opsegu relevantnom za govor, a to je od 160 Hz do 5000 Hz, što je ukupno 16 opsega. Za potrebe izračunavanja vrednost *SPC* ukupna izolovanost se definiše kao neponderisana srednja vrednost po svim opsezima 1/3 oktave:

$$D = \sum_{i=1}^{16} D_i / 16, \tag{2.3}$$

gde je i oznaka opsega 1/3 oktave. Na isti način se izračunava i nivo buke u prijemnoj prostoriji:

$$L_b = \sum_{i=1}^{16} L_{b,i} / 16. \tag{2.4}$$

U radu Bredlija [31], kao i u prilogu standarda ASTM E2638 [40] opisana su očekivana stanja privatnosti govora za različite vrednosti parametra SPC. U Tabeli 2.1 predstavljeni su ti opisi da bi se stekao uvid u značenje numeričkih vrednosti *SPC*. Opisi definišu verovatna stanja razumljivosti i čujnosti govora. Vidi se da tek pri vrednostima *SPC* preko 70 privatnost postaje relativno zadovoljavajuća, ali ne i apsolutna, to jest maksimalno moguća. Jasno je da se zbog svoje dinamike u okviru dužeg govora, ali i dinamike unutar svake rečenice, nivo govora može posmatrati samo statistički preko dugovremene efektivne vrednosti. U tom smislu tumačenje značaja pojedinih vrednosti *SPC* iz Tabele 2.1 može da definiše samo najverovatniju učestanost pojavljivanja manje ili više čujnih segmenata.

Tabela 2.1 Opisi stanja privatnosti za različite vrednosti parametra SPC [32]

SPC	opis stanja
< 60	govor je skoro uvek čujan i često se razume
60-65	zvuk govora uglavnom čujan, kratke izgovorene fraze se povremeno razumeju
65-70	zvuk govora često čujan, kratke izgovorene fraze su ređe razumljive
70-75	zvuk govora je retko čujan, govor suštinski nerazumljiv (kratke fraze čujne najviše jednom u 15 minuta)
75-80	zvuk govora retko čujan, govor nerazumljiv
80-85	zvuk govora eventualno čujan na svakih 15 minuta, govor nerazumljiv
> 85	zvuk govora neprimetan

Iz vrednosti *SPC* prikazanih u tabeli proizilaze neki važni zaključci o potrebnim vrednostima građevinske izolacione moći u stambenim zgradama s kojim se obezbeđuje potpuna privatnost. Na primer, pri nivou ambijentalne buke oko 20 dB(A) u boravišnim prostorijama stana neophodno je za potpunu privatnost govora obezbediti prema susedima vrednost građevinske izolacione moći oko 60 dB. Minimalna vrednost izolacione moći pregrada između stanova koja se decenijama usvaja u projektovanju stambenih zgrada, i koja je kao takva definisana u normativu [37], značajno je ispod vrednosti koja obezbeđuje privatnost.

U delu sveta gde se primenjuje ISO standardizacija utvrđivanje faktora koji određuju zvučni komfor zasnovano je na merenju građevinske izolacione moći prema standardu ISO 16283-1 [45], i ekvivalentnog nivoa ambijentalne buke L_{Aeq} izraženog u dB(A) prema standardu ISO 1996-1 [46]. Rezultat merenja zvučne izolacije iskazuje se merodavnom vrednošću izolacione moći R'_w koja se izračunava prema standardu ISO 717-l [47]. U literaturi je predložena jedna modifikacija u definiciji *SPC* da bi se bazirala na vrednostima iskazanim kao rezultati mernih postupaka prema ISO standardizaciji primenjivanoj u Evropi [48]. Predložen je ekvivalent *SPC* nazvan Indeks privatnosti govora (*IPG*) koji je definisan kao:

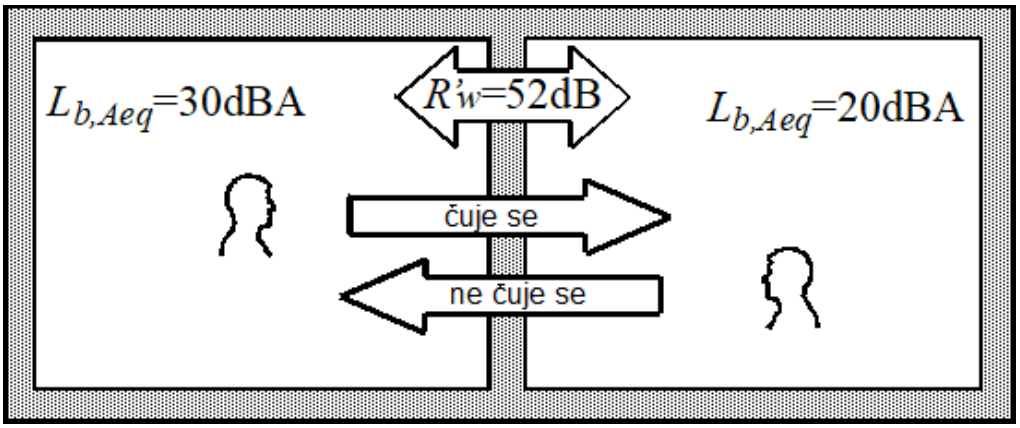
$$IPG = R'_w + L_{A,eq}. \qquad 2.5$$

Pokazano je da vrednost *IPG* sa dovoljnom tačnošću estimira vrednost *SPC*, a to znači da se u istom smislu može koristiti i za ocenu stanja privatnosti govora između prostorija koristeći standardne pokazatelje definisane ISO standardima koji se rutinski mere.

Zanimljivo je da je značaj nivoa ambijentalne buke u zaštiti privatnosti prepoznat i u standardnim postupcima za kvantifikovanje stanja privatnosti u *open-space* kancelarijama. U standardu koji definiše relevantne parametre za ocenu kvaliteta ovih specifičnih prostora predviđeno je i merenje ekvivalentnog nivoa ambijentalne buke [46]. U proceduri koja je opisana u tom standardu uticaj buke se posmatra posredno, i to kroz opadanje vrednosti indeksa prenosa govora sa rastojanjem. Posmatra se rastojanje od govornika na kome se govorni signal utopi u postojeću ambijentalnu buku i tako praktično nestane njegova razumljivost. U poslovnim prostorijama se u mnogim okolnostima za te namene koriste pomoćna sredstva za kontrolu nivoa buke u ambijentu i njegovo podešavanje.

2.4 Ambijentalna buka kao faktor privatnosti

U poglavlju o faktorima kojim određuju privatnost pokazano je da ona nije određena samo postignutom izolacionom moći pregrada koje razdvajaju prostorije u zgradi, već je jednako važan faktor i ambijentalna buka, ili preciznije postignuta „tišina“ u njima. Ta činjenica proizilazi iz ranije pokazanih izraza (2.1) i (2.5) koji definišu numeričke pokazatelje nivoa privatnosti. Prvi faktor, stanje zvučne izolovanosti između prostorija u zgradama, predstavlja temu koja je u literaturi široko dokumentovana, kako sa aspekta predikcije pomoću matematičkih modela, tako i sa aspekta poznavanja realnog stanja utvrđivanog brojnim merenjima u zgradama i laboratorijskim atestima. Međutim, za predikciju stanja privatnosti potrebno je još i poznavanje očekivane vrednosti nivoa ambijentalne buke u prostorijama. Kao što je pokazano na slici 2.1, nju čine buka koja potiče iz spoljašnje sredine, iz susednih stanova i kao posledica rada različitih sistema u samom objektu. Sve ove tri komponente određuju ono što se registruje kao ambijentalna buka.



Slika 2.2 Jedna ilustracija značaja ambijentalne buke za doživljaj privatnosti [48]

Jedan primer opisan u literaturi šematski prikazan na slici 2.2 dobro ilustruje značaj ambijentalne buke za doživljaj privatnosti [48]. Utvrđeno je da u jednoj zgradi u Beogradu postoje žalbe jednog stanara na nedovoljnu zvučnu izolaciju prema susedu. Sprovedeno je merenje izolacione moći pregrade između njih i dobijena je vrednost 52 dB, što je označeno na slici. Prema postojećem normativu u Srbiji to je granična vrednost koja zadovoljava postavljenu normu [37]. Međutim, stanje privatnosti u tim susednim stanovima različito je deklarisano sa dve strane zida jer stanar sa suprotne strane nije registrovao problem. Sprovedeno je testiranje razumljivosti govora u dva različita smera u kome je utvrđeno da se zaista u jednom smeru govor iz susedstva čuje, i stanari se opravdano žale na nedovoljnu zvučnu izolaciju, a u suprotnom smeru govor se ne čuje iako ih razdvaja jedinstvena pregrada. Testiranje je obavila ista grupa govornika i slušaoca, čime je eliminisan eventualni uticaj subjektivnih razlika među ljudima sa dve strane zida.

Radi provere izvršeno je merenje i nivoa ambijentalne buke u oba stana, to jest sa obe strane zida. U sobi gde se ne čuje govor iz susedstva ekvivalentna vrednost nivoa buke bila je oko 30 dB(A), dok je u stanu gde se čuje govor iz susedstva ekvivalentni nivo ambijentalne buke bio oko 20 dB(A). Ove vrednosti su označene na slici. U radu [48] se navodi da je razlika u nivou buke posledica renoviranja stana u kome je izmeren niži nivo buke. U njemu su zamenjeni svi prozori, pri čemu novougrađeni imaju veliku izolacionu moć. Značajno je i to da su u renoviranom stanju svi kućni uređaji novi, pre svega frižider, sa nižim nivoom buke koju generišu pri radu. Prema tome, u primeru iz literature pokazano je da, iako je zvučna izolacija pregradne konstrukcije jedinstvena, razlika u nivou ambijentalne buke proizvela je za govor iz susednog stana različit odnos signal/šum u dve prostorije. Posledica toga je i različito stanje privatnosti sa dve strane zida.

Ambijentalna buka u stanovima je faktor privatnosti o kome u literaturi nema mnogo adekvatnih i direktno primenjivih rezultata. Raspoloživi rezultati uglavnom se odnose na ankete u kojim se ispituje doživljaj ugroženosti bukom stanara [49]. Zbog toga se u inženjerskoj predikciji stanja privatnosti u

projektovanim zgradama projektantski zadaci rešavaju bez pouzdanih podataka iskazanih nekim numeričkim pokazateljima utvrđenim na terenu. Za procenu su na raspolaganju samo propisane maksimalno dozvoljene granične vrednosti nivoa u dB(A). One postoje u regulativi kao kriterijum koji se mora ispoštovati pri projektovanju i izgradnji zgrada [16]. Tamo je propisano 30 dB(A) kao maksimalno dopuštena vrednost nivoa ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova za period noći. Verovatno na osnovu takve pretpostavke o stanju buke utvrđen je svojevremeno i kriterijum za minimalno zahtevanu vrednost izolacione moći pregrada između stanova u zgradi, za koju je usvojeno 52 dB [37]. Sa te dve nominalne vrednosti – maksimalno dopuštenim nivoom buke i minimalnom vrednošću izolacione moći – proizilazi da u stambenim zgradama takođe nominalna vrednost indeksa privatnosti govora može biti do oko 80 dB. Prema klasifikaciji prikazanoj u Tabeli 2.1 to ukazuje na relativno visoku privatnost.

Na slici 2.1 prikazano je da ambijentalna buka koja se konstatuje u boravišnim prostorijama stanova dospeva u njih na dva načina: iz susednih prostorija kao zvuk nastao ljudskim aktivnostima, i kao zvuk iz spoljašnje sredine koji se literaturi najčešće označava kao „komunalna buka“. U naseljima zvuk u spoljašnjoj sredini je dominantno saobraćajna buka generisana kretanjem vozila na ulicama [50], [51], [52], [53], [54]. To je relativno stacionarna zvučna pojava koja postoji permanentno u vremenu, i čije su spektralne karakteristike u izvesnom smislu standardizovane [55]. Šta više, u velikim gradovima varijacije njenog ekvivalentnog nivoa tokom dana dešavaju se u relativno ograničenom opsegu vrednosti. Na taj način i saobraćajna buka koja u prostorije dospeva iz spoljašnje sredine kroz fasadu predstavlja zvučnu pojavu blisku stacionarnoj. Zbog toga je njen nivo relevantan za ocenu stanja privatnosti u prostorijama zgrada.

Buka u stanovima je tema kada se razmatra ugrožavanje privatnosti, i ona nastaje aktivnostima ljudi. U literaturi postoje rezultati monitoringa buke u stanovima za vreme uobičajenih aktivnosti stanara u njima [34], [35]. Prikazani su ukupni nivoi zvuka i njihovi spektri. Aktivnosti ljudi u boravišnim prostorijama su povremeni događaji, pa je i stanje te vrste buke vrlo nestacionarno.

Iskustveno je jasno da su realni nivoi ambijentalne buke u stanovima, posebno noću, značajno ispod propisane granične vrednosti. Veliki pomak u domenu snižavanja ambijentalne buke u zgradama dogodio se uvođenjem propisa o energetskoj efikasnosti [56]. Zahtevana termička izolacija zgrada nametnula je kao standard ugradnju prozora sa višeslojnim staklenim oknima značajne ukupne debljine, što je bio pomak u odnosu na prethodno korišćene prozore. Takva promena je kao sporedni efekat donela i poboljšanje izolovanosti unutrašnjosti zgrada od spoljašnje ambijentalne buke. Na taj način su u novije zidanim stambenim zgradama boravišne prostorije postale „oaze tišine“, sa nivoom buke standardno ispod maksimalno propisane vrednosti od 30 dB(A). Tako je izveden zaključak da podatak L_{amb} sa slike 2.1 predstavlja nepoznanicu koju je za potrebe analize stanja privatnosti neophodno detaljnije istražiti.

3 Teorija mikrofonskih nizova i prostorno-vremenska obrada signala

3.1 Uvod

Naziv „mikrofonski niz“ odnosi se na sistem sastavljen od većeg broja mikrofona čiji se signali na neki način tretiraju zajedno. Teorijski koncept senzora postavljenih u nekom prostornom rasporedu čiji se signali zajedno obrađuju dugo je poznat u literaturi. Pojavio se u oblastima gde se veći broj senzora koristi za određivanje lokacije izvora u prostoru. Najstarije informacije o tome su iz oblasti radio astronomije, ali se taj koncept proširio na antenske nizove, sonare, mikrofone, itd. [57]. Matematički modeli koji se koriste za obradu signala u ovim oblastima vrlo su slični i sa manjim izmenama primenjivi su u svim navedenim varijantama primenjenih senzora.

Senzorski nizovi u akustici podrazumevaju mikrofone koji su raspoređeni u prostoru na odabrani, unapred definisani način, i to se naziva „geometrija niza“ [58]. Odrednica „niz“ ustaljen je u literaturi, a nastao je u vreme kada je predmet proučavanja bio samo sistem kod koga su mikrofoni raspoređeni u jednoj liniji u vidu niza. Taj naziv se zadržao do danas iako se u najvećem broju slučajeva opisanih u literaturi, kao i kod gotovo svih komercijalno dostupnih nizova na tržištu, radi o sistemima kod kojih mikrofoni nisu postavljeni duž jedne linije, već su raspoređeni u prostoru na neki složeniji način. Broj mikrofona i njihov geometrijski raspored određuju karakteristike takvog sistema.

Preuzimanje signala sa jednog mikrofona uvodi vremensko uzorkovanje zvučnog polja, dok istovremena upotreba mikrofona distribuiranih u prostoru dodatno uvodi i njegovo prostorno uzorkovanje. Kada u ambijentu gde se nalazi mikrofonski niz radi neki zvučni izvor, prostorni raspored mikrofona uvodi razlike u njihovim rastojanjima od tog izvora. Kao posledica javljaju se vremenske i amplitudske razlike između signala na izlazima mikrofona. Procesiranjem se na osnovu tih razlika određuje pravac iz koga zvučni talas nailazi na niz, kao i položaj izvora u prostoru [57]. Za rad mikrofonskog niza, a to znači za algoritme kojim se obrađuju signali iz mikrofona, neophodno je poznavanje njegove geometrije - tačnih koordinata položaja svih mikrofona u prostoru.

Početna pretpostavka u analizama rada mikrofonskog niza je da su svi mikrofoni presioni, to jest neusmereni. To znači da imaju odziv na zvučnu pobudu koja ne zavisi od pravca nailaska zvuka. Suština takvog sistema je da veći broj neusmerenih mikrofona postavljenih u prostoru kao rezultat daju odziv koji postaje usmeren. Njegova usmerenost, kao i u svim drugim slučajevima usmerenih akustičkih senzora, kvantifikuje se dijagramom usmerenosti čiji oblik zavisi od primenjenog broja mikrofona, rasporeda u prostoru i frekvencije [58].

U literaturi se za definisanje usmerenosti mikrofonskog niza koristi parametar koji se naziva „otvor niza“. Pod tim se podrazumeva rastojanje između dva najudaljenija mikrofona u sistemu. Otvor niza određuje donju graničnu frekvenciju njegovog radnog opsega [59]. Da bi se na niskim frekvencijama postigla usmerenost potrebno je da su mikrofoni postavljeni na adekvatno velikom prostoru, to jest da otvor niza bude dovoljno veliki u odnosu na najveću talasnu dužinu. S druge strane, za usmeravanje niza na višim frekvencijama potrebno da mikrofoni budu na adekvatno malom rastojanju [60]. Iz ovoga proizilazi da je za usmerenost u širem frekvencijskom opsegu potrebno formirati prostorno dovoljno veliki niz, i sa velikim brojem mikrofona da bi bili na dovoljno malim međusobnom rastojanjima. Formiranje mikrofonskog niza sa željenom usmerenošću u proizvoljno širokom radnom opsegom često nije moguće. Zbog toga se za praktične aplikacije frekvencijski opseg rada mikrofonskog niza ograničava i usklađuje sa realnim potrebama.

Mogućnost određivanja pravca iz koga nailazi zvučni talas, kao i njegov položaj u prostoru, učinila je mikrofonski niz korisnom inženjerskom alatkom za lokalizaciju zvučnih izvora u raznim praktičnim okolnostima gde je to iz nekih razloga potrebno. Oni se koriste u auto industriji za testiranje rada pojedinih sklopova automobila [61], u industriji aviona [62], u detekcijama kvarova na raznim mašinskim i energetskim sistemima, ako su praćeni promenama u karakteru zvuka koji u

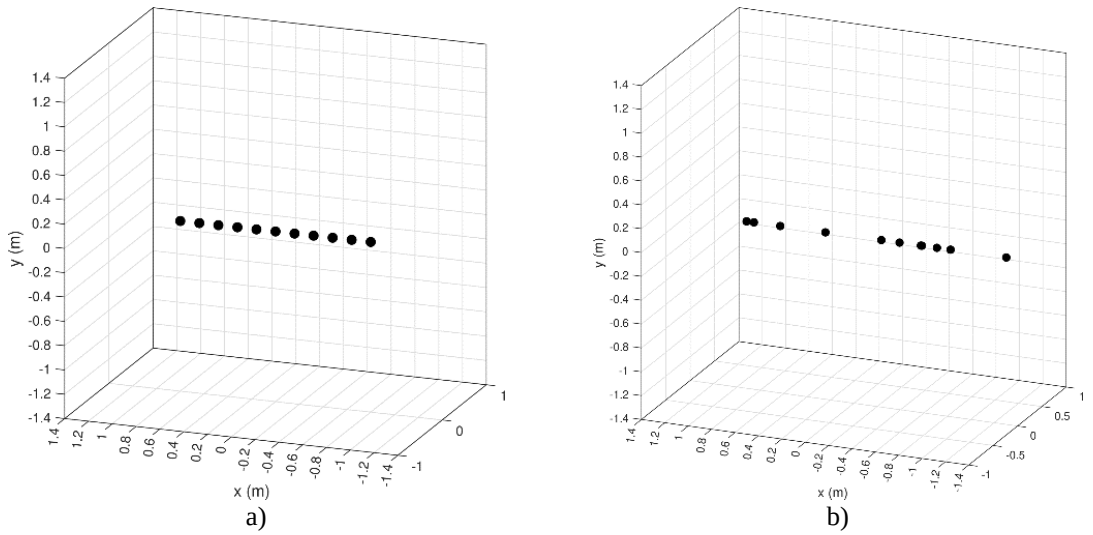
njima nastaje [63], u akustici prostorija za analizu strukture zvučnog polja [64], [65], u testiranju zvučne izolacije [65], [66], i u mnogim drugim okolnostima. Mogućnost izdvajanja signala iz željenog prostornog pravca otvorilo je mogućnost primene mikrofonskog niza u snimanju zvuka kada je potrebno izdvajanje signala jednog zvučnog izvora [67].

Određivanje položaja zvučnog izvora u prostoru uz primenu mikrofonskog niza u literaturi je označeno kao *beamforming* [68]. Praktične primene vremenom su nametnule dodavanje video kamere u sistem da bi se omogućila vizuelizacija prostora u kom se pretražuje lokacija zvučnog izvora. Zvučna slika koja se dobija kao rezultat rada mikrofonskog niza preklapa se vizuelnom slikom. Sistem proširen sa video kamerom komercijalno se naziva „akustička kamera“ .

Osnovni algoritmi kojima se vrši obrada signala sa mikrofonskih nizova nasleđeni su iz oblasti antenskih nizova. Razlika je jedino u fizičkim karakteristikama talasa s kojim se radi, to jest u brzini prostiranja. Akustika se bavi zvučnim poljem u veoma širokom frekvencijskom opsegu. Analiza zvuka se vezuje za čujni frekvencijski opseg čoveka koji je od 20 Hz do 20 kHz i ta činjenica predstavlja otežavajuću okolnost. Akustički signal je širokopojasan, pa se matematički modeli iz drugih oblasti moraju prilagoditi toj realnosti. Računari su omogućili implementaciju i usavršavanje algoritama za prostorno-vremensku obradu signala koje nije bilo moguće jednostavno realizovati analognim kolima. Za razliku od ostalih oblasti zvučni signal nalazi se u osnovnom opsegu, što olakšava njegovu obradu.

3.2 Geometrija mikrofonskih nizova

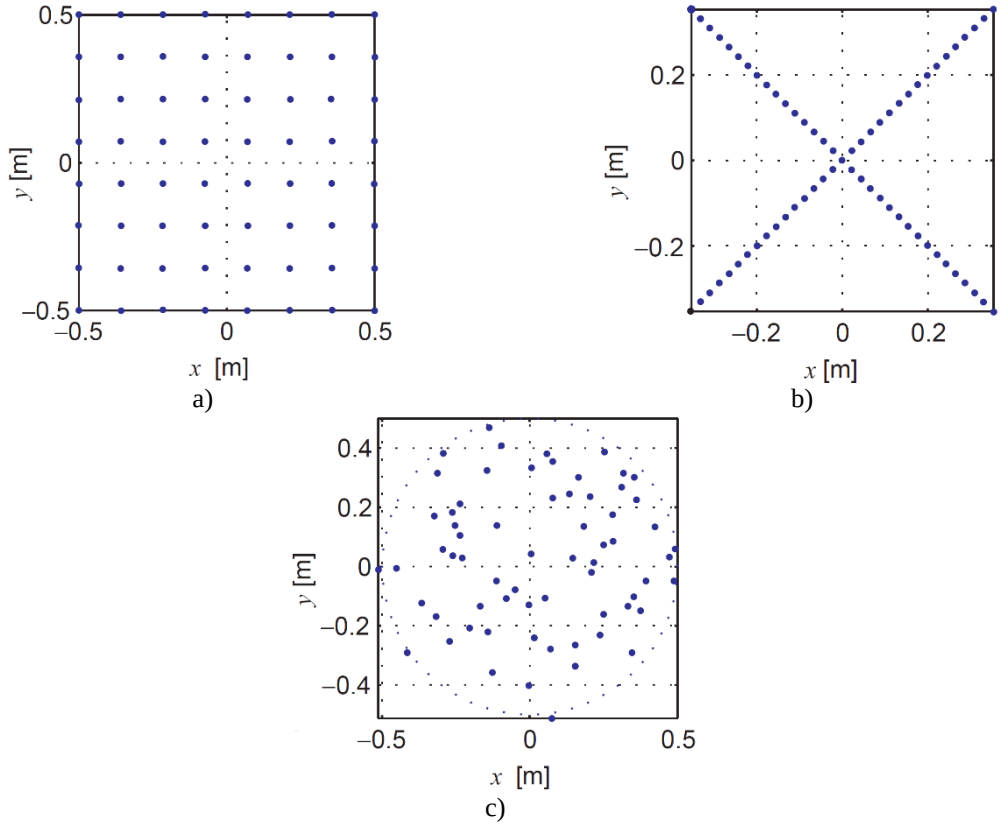
Mikrofonski nizovi mogu imati različit prostorni raspored mikrofona, jer se on prilagođava konkretnim primenama. Na osnovu njihovog rasporeda u prostoru moguće je uvesti sistematizaciju uvodeći tri grupe nizova: linijski, planarni i prostorni [58]. Kod linijskih mikrofonskih nizova (označenih kao 1D) mikrofoni su raspoređeni duž jednog pravca, pa je njihova pozicija u prostoru definisana samo jednom koordinatom pravouglog koordinatnog sistema. Dva karakteristična primera linijskih mikrofonskih nizova prikazana su na Slici 3.1. Planarni (označeni kao 2D) mikrofonski nizovi imaju mikrofone raspoređene u istoj ravni, pa je njihova pozicija definisana sa dve koordinate. Na Slici 3.2 su kao ilustracija prikazane četiri varijante planarnih nizova sa približno jednakim otvorima. Najzad, kod prostornih nizova mikrofoni su raspoređeni u prostoru (označeni kao 3D), pa se njihov položaj definiše pomoću tri koordinate. Neki primeri prostornih mikrofonskih nizova prikazani su na Slici 3.3. Svi prikazani nizovi na slikama imaju 24 mikrofona, jer njihovo međusobno poređenje po performansama ima smisla samo ako im je broj mikrofona jednak.



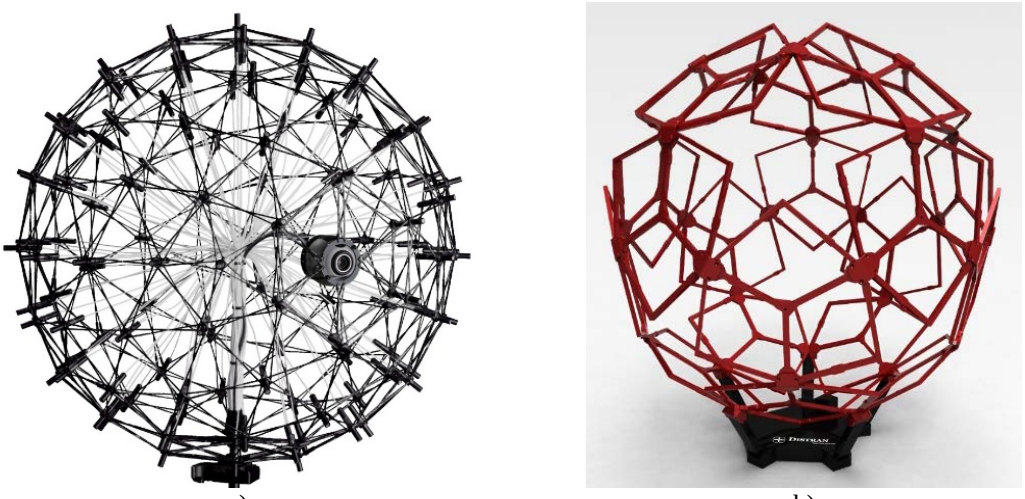
a) b)

Slika 3.1 Raspored mikrofona u prostoru linijskog mikrofonskog niza za: a) regularnu strukturu, b) neregularnu strukturu

U sistematizaciji mikrofonskih nizova svaka od tri navedene grupe može se još dodatno podeliti na regularne i neregularne. Kod regularnih mikrofonskih nizova međusobna rastojanja između mikrofona se ponavljaju, pa mikrofoni prostorno čine neku pravilnu geometrijsku strukturu. Primeri regularnih mikrofonskih nizova prikazani su na Slikama 3.1 a), 3.2 a), 3.2 b), i 3.3 a). Nasuprot tome, kod neregularnih mikrofonskih nizova mikrofoni ne formiraju pravilnu strukturu u prostoru, već su rastojanja između njih nejednaka. Neregularne strukture nizova mogu nastati slučajnim raspoređivanjem mikrofona u prostoru ili nekim optimizacionim postupkom koji ima za cilj ostvarivanje nekih zadatih performansi niza [59]. Primeri neregularnih nizova prikazani su na Slikama 3.1 b), 3.2 c) i 3.3 b).



Slika 3.2 Raspored mikrofona u prostoru planarnog mikrofonskog niza za: a) pravougaonu (*grid*) strukturu, b) „x“ strukturu i c) neregularnu strukturu [59]



Slika 3.3 Izgled mikrofonskog niza sa prostornom raspodelom mikrofona za: a) regularnu strukturu, b) neregularnu strukturu

3.3 Predstavljanje usmerenosti mikrofonskog niza

Odziv mikrofonskog niza na zvučnu pobudu predstavlja se dijagramom usmerenosti, koji se u literaturi označava kao *beampattern*. On predstavlja promenu osetljivosti niza po prostornom uglu. Kada se analizira dijagram usmerenosti niza uobičajno se uvode dve polazne pretpostavke:

- da su svi mikrofoni u nizu neusmereni, to jest da im je dijagram usmerenosti sfera, i
- da se niz nalazi u dalekom polju zvučnog izvora koji se prati i na koji se niz fokusira.

Kada su zadovoljeni takvi uslovi, dijagram usmerenosti mikrofonskog niza definiše se na sledeći način [38]:

$$\boldsymbol{W}\left(\vec{k}\right)=\sum_{n=1}^{M} w_n \exp\left(-j\vec{k}\,p_n\right). \tag{3.1}$$

gde su:

$\vec{k}$ – talasni broj koji odgovara određenom prostornom uglu,
M – broj mikrofona,
$\boldsymbol{p}_n$ – vektor pozicija mikrofona,
w_n – težinski koeficijenti pojedinačnih mikrofona.

Vrednosti svih koeficijenata w_n su jednake i imaju vrednost $w_n = 1/M$. Vektor pozicija mikrofona je:

$$p_n=\begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}, \tag{3.2}$$

Ovde su p_x, p_y i p_z koordinate pozicije mikrofona u pravouglom koordinatnom sistemu. Talasni broj koji odgovara određenom prostornom uglu je:

$$\vec{k}=k\vec{a}=\frac{\omega}{c}\vec{a}, \tag{3.3}$$

Vektor $\vec{a}$ definiše pravac u kome se posmatra dijagram usmerenosti i jednoznačno je određen azimutom ϕ i elevacijom θ u odnosu na osu mikrofonskog niza postavljenu kroz njegov geometrijski centar. Na taj način vektor $\vec{a}$ se može predstaviti kao:

$$\vec{a}=\begin{bmatrix} -\sin(\theta)\cos(\phi)\vec{k}_x & -\sin(\theta)\sin(\phi)\vec{k}_y & -\cos(\theta)\vec{k}_z \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

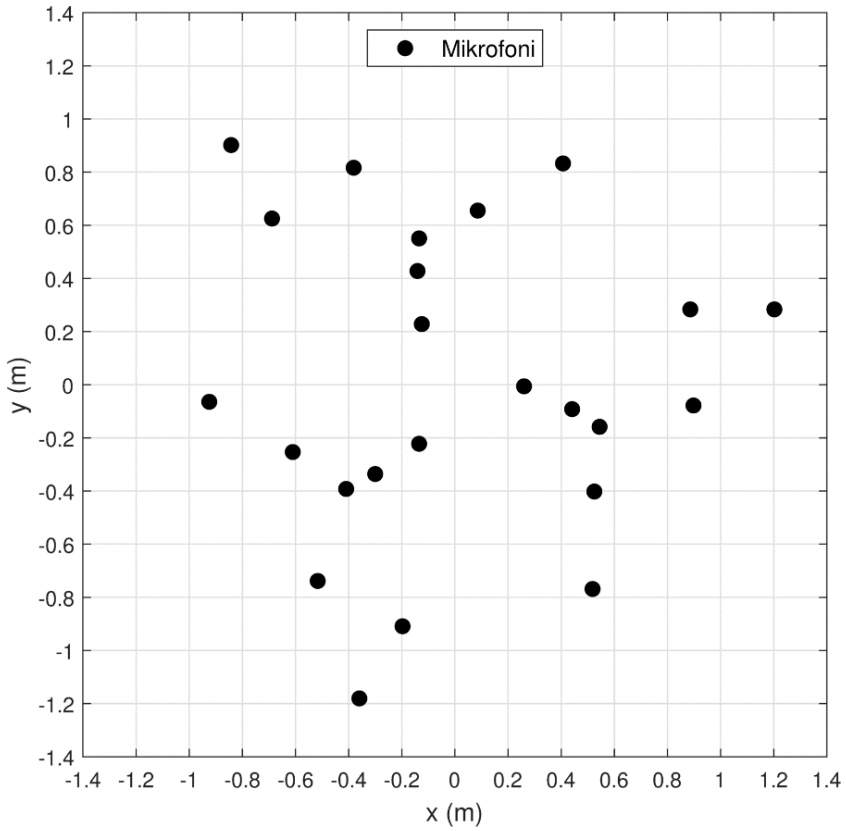
Ovde su:

- k_x, k_y i k_z – jedinični vektori za x, y i z pravac, respektivno,
- T – operacija transponovanja matrice.

Na osnovu izraza 3.1 i 3.4 dijagram usmerenosti mikrofonskog niza je:

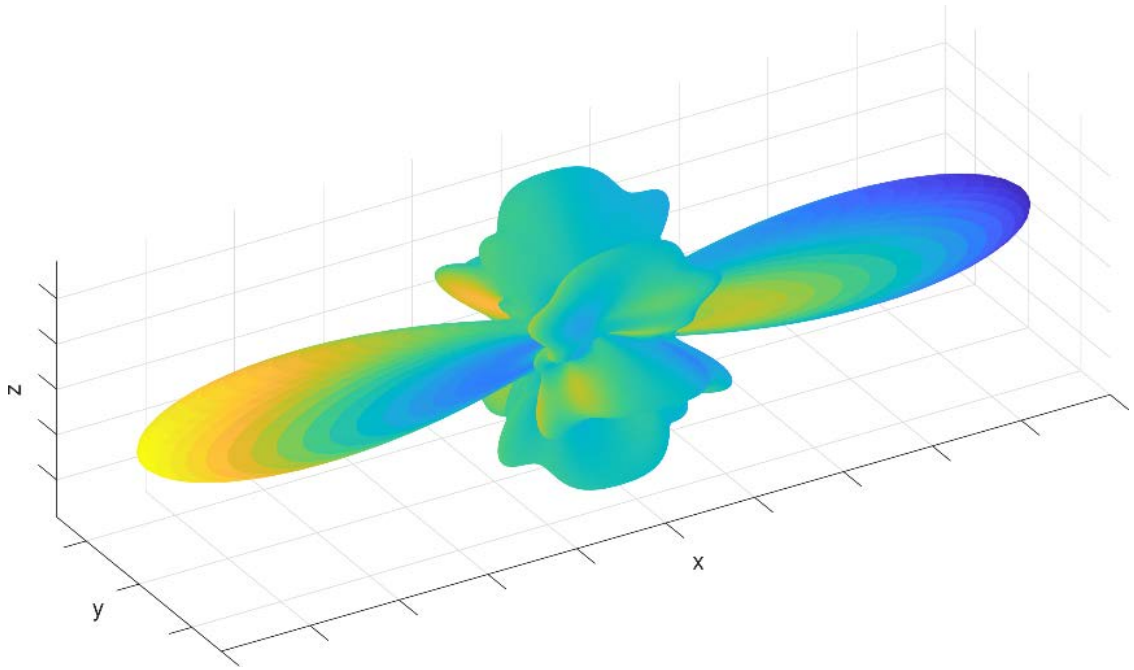
$$\boldsymbol{W}\left(\phi,\theta\right)=\sum_{n=1}^{M}\frac{1}{M}\exp\left(-j\frac{\omega}{c}p_n\begin{bmatrix} -\sin(\theta)\cos(\phi) & -\sin(\theta)\sin(\phi) & -\cos(\theta) \end{bmatrix}^T\right). \tag{3.5}$$

Iz ovoga se vidi da je dijagram usmerenosti karakteristika koja je frekvencijski zavisna. Izraz 3.5 pokazuje da je na jednoj frekvenciji dijagram usmerenosti niza određen samo brojem mikrofona i njihovom pozicijom u prostoru.



Slika 3.4 Primer jednog neregularnog planarnog mikrofonskog niza sa 24 mikrofona; pozicije mikrofona su predstavljene tačkama u koordinatnom sistemu

Za principijelni prikaz usmerenosti mikrofonskog niza odabran je jedan neregularni planarni niz sastavljen sa 24 mikrofona. Njihov raspored je predstavljen na Slici 3.4 [69]. Ovakav oblik niza je odabran za ovu ilustraciju zbog toga što je u nastavku poglavlja upravo on korišćen za objašnjenje relevantnih pojmova. Za niz sa Slike 3.4 dijagram usmerenosti je izračunat koristeći izraz 3.5 za frekvenciju 4 kHz. Rezultat je prikazan u pravouglom koordinatnom sistemu na Slici 3.5, gde su bojama kodovane vrednosti izražene u dB.

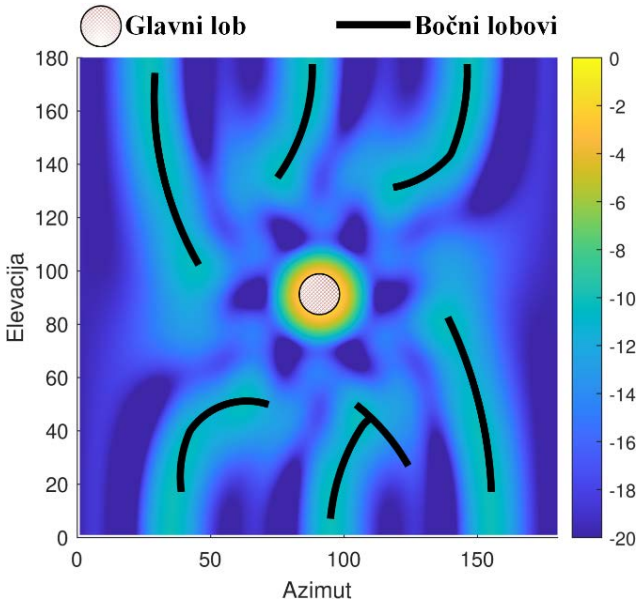


Slika 3.5 Dijagram usmerenosti planarnog neregularnog mikrofonskog niza (razmera u dB)

Dijagram usmerenosti planarnog mikrofonskog niza prikazanog na slici simetričan je u odnosu na ravan u kojoj je postavljen. To je karakteristična osobina planarnih nizova kod kojih postoji neodređenost manifestovana činjenicom da se pomoću njih ne može odrediti da li se zvučni izvor nalazi ispred ili iza njegove ravni [67]. Samo prostorni mikrofonski niz ne ispoljava neodređenost pravca nailaska zvuka [69], dok je kod linijskog mikrofonskog niza neodređenost potpuna.

Na dijagramu usmerenosti sa Slike 3.5 vidljivi su lokalni maksimumi. Maksimum dijagrama usmerenosti vidljiv na slici predstavlja glavni lob (*main lobe*) mikrofonskog niza. Brojni lokalni maksimumi vidljivi na dijagramu nazivaju se bočni (sporedni) lobovi (*side lobe*) [60]. Dve najvažnije osobine mikrofonskog niza su ugaona širina glavnog loba i veličina bočnih lobova. Širina glavnog loba je relevantna za prostornu rezoluciju koja se dobija s nizom pri određivanju lokacije zvučnih izvora u prostoru. Relativna veličina bočnih lobova u odnosu na glavni lob određuje pojavu lažnih zvučnih izvora (*ghost source*) koji se pojavljuju pri lokalizaciji zvučnih izvora u prostoru [59]. Obe karakteristike, ugaona širina glavnog loba i veličina bočnih lobova, značajne su sa aspekta praktičnih primena niza.

Usmerenost mikrofonskog niza može se grafički prikazati i u ravni kao funkcija azimuta i elevacije. Jedan takav prikaz usmerenosti planarnog niza predstavljen je na Slici 3.6. Radi lakšeg razumevanja na slici su označeni glavni lob i najveći bočni lobovi. Ovakav dijagram usmerenosti ekvivalentan je prikazu sa Slike 3.5. Razlika je u tome što je prikaz u ravni ograničen na prostorne uglove po azimutu ϕ = [0,180] i po elevaciji θ = [0,180]. Ovakav način prikazivanja dijagrama usmerenosti planarnog mikrofonskog niza najčešće je korišćen u literaturi, jer je poznato da je kod planarnog mikrofonskog niza dijagram usmerenosti simetričan za prostorne uglove ϕ=[180 360] i θ=[180 360].



Slika 3.6 Dijagram usmerenosti planarnog mikrofonskog niza

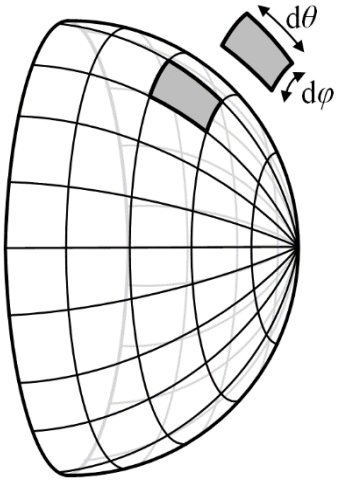
3.4 Prostorno-vremenska obrada signala sa mikrofonskih nizova

Primeri usmerenosti mikrofonskog niza prikazani na prethodnim slikama pokazuju mogućnost fokusiranja njegove osetljivosti u različitim pravcima. To se postiže odgovarajućom prostorno-vremenskom obradom signala iz mikrofona. Ponavljanjem postupka fokusiranja za sve pravce od interesa moguće je odrediti relativni odnos energije koja dolazi do mikrofonskog niza iz raznih pravaca, pa se tako dobija „slika“ zvučnog polja u prostoru.

Zahvaljujući takvoj osobini najširа namena mikrofonskih nizova je u okolnostima kada je potrebno odrediti pravac nailaska zvučnog talasa iz prostora. Pored prikaza osnovnih algoritama koji se koriste za lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru biće prikazani i napredniji algoritmi za prostorno-vremensku

obradu signala pomoću kojih se dobija preciznija lokalizacija i omogućava tačnija analiza zvučnog polja.

Na Slici 3.7 principski je prikazana principijelna podela prostora u kom se određuje nailazeća zvučna energija. Prostor je definisan azimutnim i elevacionim uglom. Veličina prostora i rezolucija slike, to jest rastojanje između susednih tačaka u kojima se računa energija, zavise od okolnosti primene mikrofonskog niza i može se podešavati.



Slika 3.7 Ravan definisana koordinatama azimuta i elevacije u kojoj se određuje „slika“ energije zvučnog polja

Najjednostavniji algoritam za prostorno-vremensku obradu signala iz mikrofonskog niza je označen kao „*delay and sum*“ (*DaS*). Njegova jednostavnost se ogleda u činjenici da je za njegovu primenu potrebno poznavati samo geometriju mikrofonskog niza, uvesti odgovarajuća kašnjenja signala iz njegovih mikrofona i nakon toga izvršiti njihovo sabiranje. Upravo zbog te jednostavnosti algoritam „*delay and sum*“ široko se koristi u brojnim praktičnim aplikacijama za preliminarna merenja, kada preciznost lokalizacije nije primarna. Može se reći da je u komercijalno dostupnim rešenjima mikrofonskih nizova na tržištu to standardni algoritam za prostorno-vremensku obradu signala. Ograničenje ovog algoritma je u tome da rezultat zavisi od karakteristika mikrofonskog niza, to jest od njegove prostorne rezolucije i veličine bočnih lobova. Zbog toga se pomoću ovog algoritma neće uvek dobiti precizan rezultat lokalizacije.

3.4.1. Konvencionalni *beamforming*

Konvencionalni *beamforming* (*CB*) [70] je naziv algoritma za prostorno-vremensku obradu signala iz mikrofonskog niza koji se realizuje u frekvencijskom domenu. On je analogan algoritmu *Delay and sum* (*DaS*) po načinu kako funkcioniše u vremenskom domenu. Razlika između njih je u tome što *CB* algoritam omogućava lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru po frekvencijskim opsezima, dok se pomoću algoritma *DaS* dobija širokopojasan rezultat. Postoje praktične aplikacije u kojim je značajna mogućnost lokalizacije zvučnih izvora samo u određenim frekvencijskim opsezima, na primer gde im je najveća zvučna energija.

Početni korak u konvencionalnom *beamforming* algoritmu je izračunavanje *CSM* (*Cross Spectral Matrix*) [71], [72], odnosno njenih elemenata, na osnovu signala dobijenih iz mikrofona. Oni odslikavaju vremensku promenu zvučnog pritiska na mikrofonima $p_m(t)$, gde je m redni broj mikrofona. Osnov za izračunavanje *CSM* matrice su spektri signala dobijeni korišćenjem Furijeove transformacije $P_m(f,T)$. Ovde je T trajanje vremenskog bloka nad kojim se vrši Furijeova transformacija, a f je frekvencija. Element *CSM* matrice za jedan par mikrofona u nizu, označenih sa m i m', dobija se na osnovu sledećeg izraza:

$$G_{mm'}(f) = \frac{2}{Kw_s T} \sum_{k=1}^{K} \left[P_{mk}^{*}(f,T) \cdot P_{m'k}(f,T) \right]. \quad 3.6$$

U ovom izrazu je:

- K – broj blokova koji se koristi za usrednjavanje prilikom računanja spektra,
- w_s – konstanta za odgovarajuću prozorsku funkciju (ako je prozorska funkcija pravougaona; $w_s = 1$, za ostale prozorske funkcije razlikuje se od 1).

Dužina signala na osnovu koga se računaju spektri za sve signale sa mikrofonskog niza je KT. Element *CSM* matrice $G_{mm'}(f,T)$ predstavlja proizvod spektara sa dva mikrofona, od kojih je jedan konjugovano kompleksan, na diskretnoj frekvenciji f, sa frekvencijskim opsegom Δf koji je definisan izrazom:

$$\Delta f = \frac{1}{T}(\text{Hz}). \quad 3.7$$

CSM matrica za m_0 mikrofona u nizu je po definiciji:

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1m_0} \\ \vdots & G_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ G_{m_0 1} & & & G_{m_0 m_0} \end{bmatrix}, \quad 3.8$$

Ovde su elementi matrice $\boldsymbol{G}$ definisani izrazom (3.9) za $G_{mm'}(f)$.

$$G_{mm'}(f) = \frac{2}{Kw_s T} \sum_{k=1}^{K} \left[P_{mk}^{*}(f,T) \cdot P_{m'k}(f,T) \right]. \quad 3.9$$

Za određivanje energije koja dolazi na niz iz određenog pravca, pored *CSM* matrice potrebno je izračunati i *steering* vektor. On obezbeđuje korekciju amplitudskih i faznih razlika za svaki od mikrofona u mikrofonskom nizu. Za mikrofon m i za izabrani pravac *steering* vektor se izračunava na sledeći način [70]:

$$e_m = \frac{r_m}{r_c} exp(j2\pi f \tau_m), \quad 3.10$$

Ovde je:

- f – frekvencija,
- r_m – rastojanje mikrofona m od ravni skeniranja u kojoj se nalaze zvučni izvori,
- r_c – rastojanje od referentne tačke na mikrofonskom nizu do ravni skeniranja,
- τ_m – vreme prostiranja zvučnog talasa do mikrofona m.

Kao referentna tačka na nizu uzima se njegov centar čije su koordinate u Dekartovom koordinatnom sistemu $(x,y) = (0,0)$. Rastojanje od ravni skeniranja do centra mikrofonskog niza se zadaje, a rastojanja do svakog mikrofona ponaosob dobija se na osnovu poznate geometrije mikrofonskog niza i zadatog rastojanja r_c. Vreme prostiranja τ_m računa se izrazom:

$$\tau_m = \frac{r_m}{c}, \quad 3.11$$

gde je c brzina zvuka u vazduhu. Kada se za svaki mikrofon izračuna *steering* vektor dobija se niz tih vektora. Taj niz ima dužinu jednaku broju mikrofona u mikrofonskom nizu:

$$\hat{e} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \cdots & e_{m_0} \end{bmatrix}. \tag{3.12}$$

Energija iz nekog prostornog ugla definisana je izrazom:

$$\boldsymbol{Y}(\hat{e}) = \frac{\hat{e}^T G \hat{e}}{m_0^2}, \tag{3.13}$$

gde *T* predstavlja operaciju konjugovanog transponovanja matrice. Kada se izračuna matrica ***Y*** za sve prostorne uglove od interesa dobija se "slika" zvučne energije skeniranog dela prostora. Prema tome, koristeći matricu ***Y*** može se izvršiti analiza zvučnog polja, tačnije utvrditi gde se nalaze posmatrani zvučni izvori u prostoru. Rezultat koje daju *CB* i *DaS* algoritmi zavisi od korišćenog mikrofonskog niza i nije uvek stvarna raspodela zvučne energije u prostoru koji se analizira. Ipak, ovaj algoritam ima veliku primenu zbog svoje jednostavnosti i mogućnosti lokalizacije u izabranim frekvencijskim opsezima. Zbog toga *CB* algoritam predstavlja prvi korak i osnov za primenu naprednih algoritama prikazanih u literaturi za preciznije određivanje prostorne raspodele zvučne energije.

3.4.2. Dekonvolucioni algoritmi

CSM matrica dobijena na osnovu signala sa mikrofonskog niza predstavlja osnovu za *CB* algoritam. Ukoliko se pretpostavi da postoji samo jedan zvučni izvor u ravni skeniranja na nekoj svojoj poziciji *n*, *CSM* matrica se može predstaviti kao [70]:

$$\boldsymbol{G}_{n_{\mathrm{mod}}} = \boldsymbol{X}_n \begin{bmatrix} \left(e_1^{-1}\right)^* e_1^{-1} & \left(e_1^{-1}\right)^* e_2^{-1} & \cdots & \left(e_1^{-1}\right)^* e_{m_0}^{-1} \\ \left(e_2^{-1}\right)^* e_1^{-1} & \left(e_2^{-1}\right)^* e_2^{-1} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ \left(e_2^{-1}\right)^* e_1^{-1} & & & \left(e_1^{-1}\right)^* e_{m_0}^{-1} \end{bmatrix}_n, \tag{3.14}$$

gde je $\boldsymbol{X_n}$ energija zvučnog signala na svakom od mikrofona u odabranom frekvencijskom opsegu a *e* je *steering* vektor. Ako se uvede pretpostavka da u ravni skeniranja postoji *N* nezavisnih izvora čiji su signali statistički nezavisni, *CSM* matrica ima sledeći oblik:

$$\boldsymbol{G}_{mod} = \sum_n G_{n_{\mathrm{mod}}}. \tag{3.15}$$

Ako se u jednačinu za izračunavanje matrice ***Y***, što je rezultat lokalizacije, uvrsti prethodna jednačina *CSM* matrice za jedan izvor dobijaju se jednačine:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y}_{n_{\mathrm{mod}}}(\hat{e}) &= \left[\frac{\hat{e}^T G_{\mathrm{mod}} \hat{e}}{m_0^2} \right]_n, \\ \boldsymbol{Y}_{n_{\mathrm{mod}}}(\hat{e}) &= \frac{\hat{e}^T \sum_{n'} X_{n'} \boldsymbol{Z}_{n'} \hat{e}}{m_0^2} = \sum_{n'} \frac{\hat{e}^T \boldsymbol{Z}_{n'} \hat{e}}{m_0^2} X_{n'}, \end{aligned} \tag{3.16}$$

Ovde je sa ***Z*** označena matrica *steering* vektora iz izraza 3.10. Ovo se može napisati kao:

$$\boldsymbol{Y}_{n_{\mathrm{mod}}}(\hat{e}) = \sum_{n'} A_{nn'} X_{n'}, \tag{3.17}$$

U ovom izrazu je:

$$A_{nn'} = \frac{\hat{e}^T \boldsymbol{Z}_{n'} \hat{e}}{m_0^2}. \qquad 3.18$$

Ako se izraz 3.13 zapiše matrično, dobija se izraz:

$$\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{X} = \boldsymbol{Y}, \qquad 3.19$$

U ovom izrazu matrice ***A***, ***X*** i ***Y*** sadrže članove $A_{nn'}$, X_n i Y_n, respektivno.

Izraz 3.19 definiše određivanje stvarne prostorne raspodele zvučne energije u ravni skeniranja. Matrica ***X*** je stvarna raspodela koju treba odrediti, matrica ***A*** predstavlja uticaj mikrofonskog niza, a matrica ***Y*** predstavlja rezultat lokalizacije pomoću *CB* algoritma. Vidi se da u rezultatu lokalizacije pomoću algoritma *CB* pored energija zvučnih izvora postoji i karakteristike mikrofonskog niza. Za tačniji rezultat potrebno je nekako eliminisati uticaj mikrofonskog niza, a to znači da matrica ***Y*** bude jednaka matrici ***X***.

Problem iz izraza 3.19 može se rešiti na više načina i u nastavku je prikazano nekoliko algoritama koji rešavaju ovaj problem. Pošto je izraz 3.19 napisan u frekvencijskom domenu, a matrica ***Y*** se dobija množenjem matrice stvarnih energija izvora i matrice koja sadrži uticaj mikrofonskog niza, množenje u vremenskom domenu odgovaralo bi konvoluciji ove dve matrice. Zbog toga se algoritmi koji rešavaju problem definisan izrazom 3.19 nazivaju dekonvolucioni algoritmi.

3.4.3. DAMAS algoritam

Izraz 3.19 je sistem linearnih jednačina, a pošto je matrica ***A*** kvadratna, problem bi se mogao rešiti na sledeći način [70]:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{A}^{-1} \cdot \boldsymbol{Y}. \qquad 3.20$$

Međutim, pokazalo se da je pri lokalizaciji zvučnih izvora u prostoru matrica ***A*** nesingularna samo za određen broj tačaka u ravni skeniranja i za jednu zonu oko izvora zvuka. Pomoću metodologije za utvrđivanje uslova za matricu ***A*** koja je u literaturi označena kao *Singular Value Decomposition* (SVD) [73] pokazano je da za tipične slučajeve u praksi rang matrice ***A*** ima malu vrednost. Rang matrice ***A*** definiše broj nezavisnih linearnih jednačina u izrazu 3.19. Mala vrednost ranga matrice znači da je broj mogućih rešenja veliki. Zbog toga je nalaženje preciznije prostorne raspodele zvučnog polja u ravni skeniranja teško.

Primenom ostalih tehnika kao što je konjugovani gradijentni metod [74] dobijaju se rezultati koji nemaju smisla, izuzev u okolnostima kada je broj postojećih zvučnih izvora mali. Zvučna energija može imati samo pozitivne vrednosti, pa otuda i stvarni izvori X_n mogu imati samo pozitivne vrednosti. U tom slučaju može se primeniti iterativni postupak da bi se utvrdila stvarna prostorna raspodela zvučne energije u ravni skeniranja. Jedna linearna komponenta matrične jednačine 3.19 može se napisati kao:

$$A_{n1}X_1 + A_{n2}X_2 + \cdots + A_{nn}X_n + \cdots + A_{nN}X_N = Y_n. \qquad 3.21$$

Ako se pretpostavi da je A_{nn}=1, izraz 2.22 može se napisati:

$$X_n = Y_n - \left[\sum_{n'=1}^{n-1} A_{nn'} X_{n'} + \sum_{n'=n+1}^{N} A_{nn'} X_{n'} \right]. \qquad 3.22$$

Jednačine s kojim se dobija raspodela zvučnih izvora X_n za sve tačke n u ravni skeniranja između 1 i N za svaku iteraciju (i) date su izrazima:

$$X_1^{(i)} = Y_1 - \left[0 + \sum_{n'=1+1}^{N} A_{nn'} X_{n'}^{(i-1)} \right],$$
$$X_n^{(i)} = Y_n - \left[\sum_{n'=1}^{n-1} A_{nn'} X_{n'}^{(i)} + \sum_{n'=n+1}^{N} A_{nn'} X_{n'}^{(i-1)} \right], \qquad 3.23$$
$$X_N^{(i)} = Y_N - \left[\sum_{n'=1+1}^{N} A_{nn'} X_{n'}^{(i)} + 0 \right].$$

Za prvu iteraciju (i=1) početne vrednosti za X_n i Y_n mogu biti izabrane proizvoljno, jer to utiče samo na brzinu konvergencije iterativnog postupka, ali ne i na konačan rezultat. Ukoliko se u iterativnom postupku pojave negativne vrednosti X_n, one se menjaju nulama. Jednačine 3.23 definišu algoritam koji se u literaturi naziva DAMAS (*Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Scources*) [70]. Brzina konvergencije algoritma zavisi od izabranog broja tačaka u ravni skeniranja ali i od strukture zvučnog polja i karakteristika korišćenog mikrofonskog niza. U nekim aplikacijama broj zvučnih izvora može biti veliki, pa rešenje zahteva veliki broj iteracija. To povećava računsku i vremensku kompleksnost postupka.

3.4.4. DAMAS2 algoritam

DAMAS algoritam zahteva veliko vreme izvršavanja zbog velikog broja računskih operacija i iteracija koje su potrebne da bi se dobila prostorna raspodela zvučne energije. Matrica $\boldsymbol{A}$, koja predstavlja karakteristike mikrofonskog niza može imati velike dimenzije. U praksi je provereno da u tom slučaju vreme potrebno za pronalaženje konačnog rešenja, to jest za dekonvoluciju, može biti i nekoliko dana ako se radi na PC računarima. Zbog toga su u literaturi prikazani algoritmi bazirani na DAMAS principu, ali čije je vreme izvršavanja značajno smanjeno.

Preko prostornih koordinata problem 3.19 može se zapisati na sledeći način:

$$\boldsymbol{b}(\vec{x}) = \int \boldsymbol{psf}(\vec{x}, \vec{x}') \boldsymbol{q}(\vec{x}') d\vec{x}', \qquad 3.24$$

Ovde je:

- $\boldsymbol{b}$ – rezultat CB algoritma,
- $\boldsymbol{q}$ – stvarna prostorna raspodela zvučnog polja,
- ***psf*** – *Point Spread Function* [75].

Funkcija *psf* predstavlja karakteristiku mikrofonskog niza. Ona se izračunava pomoću geometrije mikrofonskog niza i pozicije izvora koju definiše vektor $\vec{x}'$. U unapređenom DAMAS algoritmu koji je nazvan DAMAS2 koristi se prostorna Furijeova transformacija da bi se ubrzao postupak izračunavanja prostorne raspodele zvučnog polja. Zbog brzine izračunavanja Furijeove transformacije i inverzne Furijeove transformacije inovirani algoritam DAMAS2 značajno brže konvergira [76]. Brzo izvršavanje algoritma DAMAS2 omogućava pretpostavka da je *psf* funkcija prostorno invarijantna. To znači da se može smatrati da *psf* funkcija ne zavisi od pozicije izvora u ravni skeniranja i da je približno istog oblika za sve hipotetičke izvore u toj ravni. Algoritam se zasniva na upotrebi *Weiner* filtra [77] za dekonvoluciju i sadrži sledeće korake [75]:

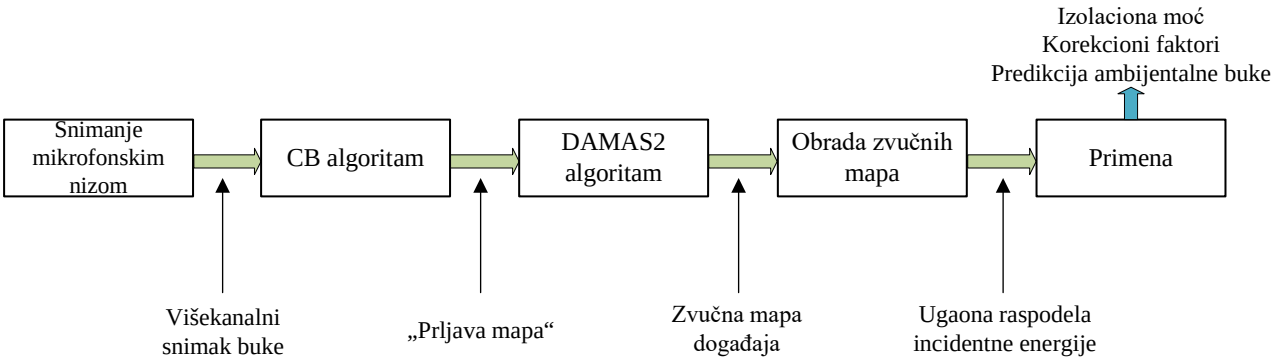
1. Računanje $\tilde{\boldsymbol{p}}(\vec{k}) = \mathrm{FFT}\left[psf(\vec{x}) \right]$, gde je $\vec{k}$ prostorna frekvencija, a FFT prostorna Furijeova transformacija.
2. Računanje parametra $a = \sum_{x,y,z} |psf|$.

3. Postavljanje matrice rešenja za sve tačke u ravni skeniranja na vrednost $\boldsymbol{q}(\vec{x}) = 0.$
4. Iterativno se izvršavaju sledeći koraci:
   a) $\tilde{\boldsymbol{q}}(\vec{k}) = \mathrm{FFT}[\boldsymbol{q}(\vec{x})].$
   b) Za svako $\vec{k}$ vrši se skaliranje $\tilde{\boldsymbol{q}}(\vec{k})$ sa faktorom $\exp\left(-k^2 / \left(2k_c^2\right)\right)$, gde je k_c granična frekvencija iznad koje se vrši eliminacija visokofrekvencijskog šuma koji se može javiti pri računanju.
   c) Izračunava se $\tilde{\boldsymbol{r}}(\vec{k}) = \tilde{\boldsymbol{p}}(\vec{k})\boldsymbol{q}(\vec{k})$, za svako $\vec{k}$.
   d) Izračunava se $\tilde{\boldsymbol{r}}(\vec{x}) = \mathrm{iFFT}\left[\tilde{\boldsymbol{r}}(\vec{k})\right]$, gde je iFFT inverzna prostorna Furijeova transformacija.
   e) Izračunava se $\boldsymbol{q}(\vec{x}) \leftarrow \boldsymbol{q}(\vec{x}) + \left|\tilde{\boldsymbol{b}}(\vec{x}) - \boldsymbol{r}(\vec{x})\right|/a$, za svako $\vec{x}$.
   f) Zamena svih negativnih vrednosti $\boldsymbol{q}(\vec{x})$ sa 0.

Prvi korak u DAMAS2 algoritmu je, kao i kod svih dekonvolucionih algoritama, je *CB* (Konvencionalni *beamforming*). Dobijeni rezultat pomoću CB algoritma u literaturi se naziva "prljava" mapa [76] jer sadrži uticaj mikrofonskog niza. Postupak je iterativni, a broj iteracija određuje se empirijski. Taj broj zavisi od okolnosti primene i mikrofonskog niza koji se pri tome koristi.

4 Metodologija merenja mikrofonskim nizom

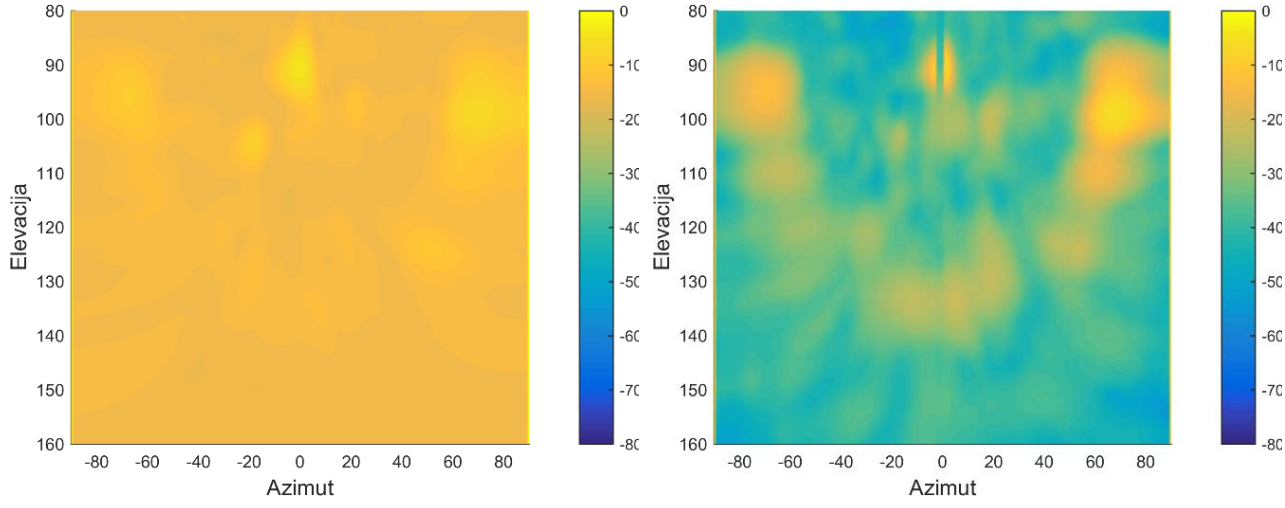
U ovom poglavlju opisana je predložena metodologija primene mikrofonskih nizova i prostorno-vremenske obrade signala za predikciju ambijentalne buke. Metodologija se može opisati blok dijagramom na Slici 4.1.



Slika 4.1 Blok dijagram predložene metodologije.

Najpre se na zadatoj mernog lokaciji postavlja mikrofonski niz paralelno sa fasadom objekta. S obzirom da je osnovni izvor buke buka saobraćaja, korišćen je planarni mikrofonski niz od 24 mikrofona, optimizovan za frekvencijski opseg koji odgovara saobraćajnoj buci [78]. Praktično ovo znači da su pozicije mikrofona u nizu podešene tako da se sa zadatim brojem mikrofona postignu optimalne karakteristike usmerenosti niza u frekvencijskom opsegu od značaja [79]. Vrši se snimanje buke u dovoljnom trajanju kako bi se zabeležili svi karakteristični događaji na lokaciji.

Dobijeni 24-kanalni snimak buke se obrađuje algoritmima prostorno-vremenske obrada signala u cilju dobijanja ugaone raspodele incidentne energije. Nakon izvršavanja *CB* algoritma dobija se takozvana „prljava mapa“, odnosno ugaona raspodela incidencije energije po parovima azimut elevacija (ϕ,θ). Dobijena zvučna mapa predstavlja konvoluciju realne raspodele izvora i uticaja mikrofonskog niza, odnosno njegovog dijagrama usmerenosti. Na Slici 4.2 a) prikazan je primer prljave mape.



a) b)

Slika 4.2 Rezultati obrade prostorno-vremenske obrade signala: a) CB algoritam, b) DAMAS2 algoritam. 1/3 oktavni opseg 1000 Hz.

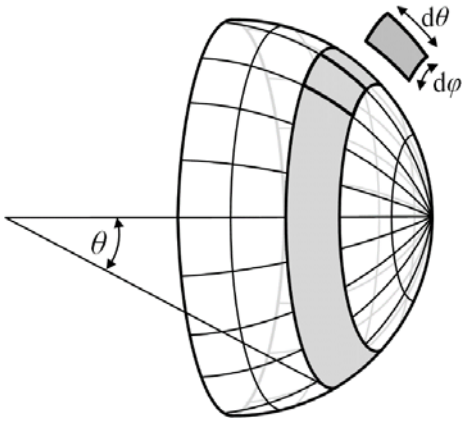
Na Slici 4.2 azimut se nalazi na *x*-osi, elevacija na *y*-osi, a za svaki par azimut-elevacija su bojama kodirane relativne vrednosti nivoa normalizovane maksimalnom vrednošću cele mape. Opseg elevacija je redukovan na uglove od 80 do 160 stepeni, jer se smatra da van tog opsega nema

značajnih zvučnih izvora. Na prljavoj mapi s leve strane (*CB*) mogu se uočiti dominante lokacije izvora, ali je dinamika mala (oko 10 dB), što je određeno karakteristikama niza (širinom glavnog loba i visinom bočnih lobova).

Sledeći korak u analizi je eliminisanje uticaja mikrofonskog niza dekonvolucionim postupkom, odnosno algoritmom DAMAS2. Rezultujuća mapa prikazana je na Slici 4.2 b. Na ovom grafiku se jasnije može uočiti struktura zvučnog polja koje napada fasadu, uticaj niza je umanjen i prikazanu raspodelu možemo smatrati realnom raspodelom energije po uglovima. Na slici se može uočiti zakrivljeni pojas lokalizovanih izvora, koji predstavlja saobraćajnicu. Razlog zakrivljenosti je 2D predstava polusferičnog prostora koji se posmatra. Prikazane mape odgovaraju opsegu 1/3 oktave oko centralne frekvencije 1000 Hz. Analiza se radi u svim frekvencijskim opsezima od interesa.

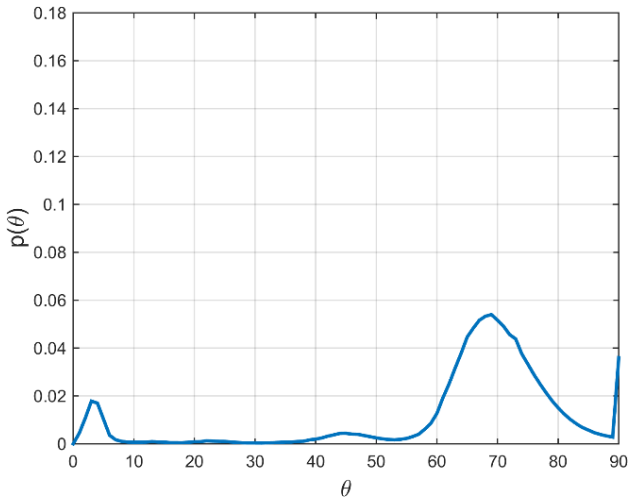
4.1 Ugaona raspodela incidentne energije

Na osnovu zvučnih mapa dobijenih algoritmom DAMAS2 vrši se određivanje gustine raspodele energije $p(f, \theta)$ po prostornom uglu θ, koji se definiše kao ugao u odnosu na pravu upravnu na fasadu objekta.



Slika 4.3 Računanje ugaone raspodele incidentne energije.

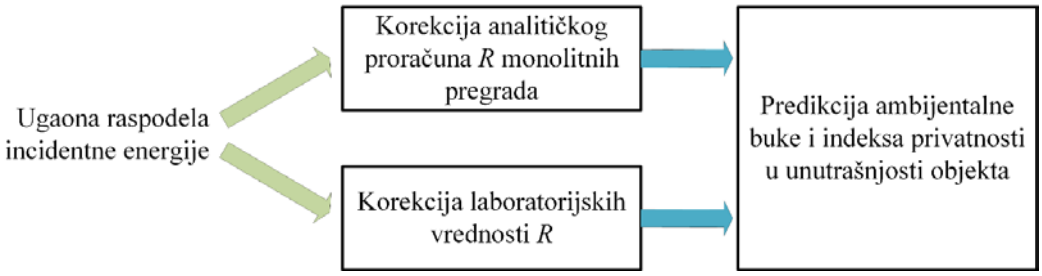
Na Slici 4.3 simbolički je prikazan prostorni ugao θ u odnosu na grid skeniranja. Opseg vrednosti prostornog ugla je od 0º (pravac upravan na ravan fasade) do 90º (pravac paralelan fasadi). Osenčena površina simbolički predstavlja sumiranje zone za dobijanje vrednosti gustine raspodele za prostorni ugao θ označen na slici. Procedura za izračunavanje podrazumeva sabiranje doprinosa energije iz svih parova azimut-elevacija koji odgovaraju prikazanoj osenčenoj površini. Nakon određivanja vrednosti $p(f, \theta)$ za sve prostorne uglove, vrši se normalizacija sumom svih vrednosti, kako bi se dobila gustina verovatnoće. Prikazani proces se izvršava na svim frekvencijskim opsezima od interesa.



Slika 4.4 Izračunata gustina raspodele incidentne energije u frekvencijskom opsegu 1/3 oktave oko 1000 Hz.

Na Slici 4.4 prikazan je rezultat izračunavanja gustine raspodele $p(f, \theta)$ na osnovu mape prikazane na Slici 4.2 b. Iz prikazanog grafika može se uočiti da je gustina raspodele bimodalna sa dva izražena maksimuma oko prostornih uglova 5^0 i 70^0. Prikazana je gustina raspodele izračunata za frekvencijski opseg 1000 Hz. Iz grafika se može videti značajno odstupanje raspodele energije u odnosu na raspodelu u difuznom polju, s kojom se ulazi u proračun teorijskih vrednosti izolacionih moći, i s kojom s vrše laboratorijska merenja izolacione moći. Prikazana gustina raspodele će imati uticaj na ispoljenu izolacionu moć fasadne pregrade, kada se ona ugradi na lokaciji koja ima ovakvu karakteristiku raspodele energije.

Kada se izvrši prikazana analiza u svim frekvencijskim opsezima dobija se celokupna ugaona gustina raspodele incidentne energije $p(f, \theta)$. U ovom radu prikazane su dve metodologije kojima se ovaj rezultat može iskoristiti za predikciju realnog stanja izolacije u novoizgrađenim objektima.



Slika 4.5 Dva metoda primene ugaone raspodele incidentne energije na predikciju stanja privatnosti

Prvi metod zasniva se na korišćenju eksperimentalno dobijenih ugaonih raspodela incidentne energije u proračunu izolacione moći monolitnih pregrada prema analitičkom izrazu. Drugi metod zasniva se na korekciji laboratorijskih izolacionih moći na osnovu proračuna odstupanja incidentne energije od energije u difuznom polju koristeći $p(f, \theta)$. Rezultati oba metoda se dalje mogu koristiti za predikciju stanja buke unutar objekta nakon prolaska kroz pretpostavljene fasadne pregrade i izmerenih nivoa buke na zadatoj lokaciji. Dobijene ugaone raspodele i korekcioni faktori se mogu dodeliti klasifikovanim tipovima urbanih lokacija (kanjon ulica, ulice bez objekata na suprotnoj strani, široke ulice, itd.), i na taj način prilikom projektovanja na zadatoj lokaciji uzeti u obzir uticaj koji će takav tip lokacije imati na sve navedene veličine.

4.2 Korekcija izolacionih moći monolitnih pregrada

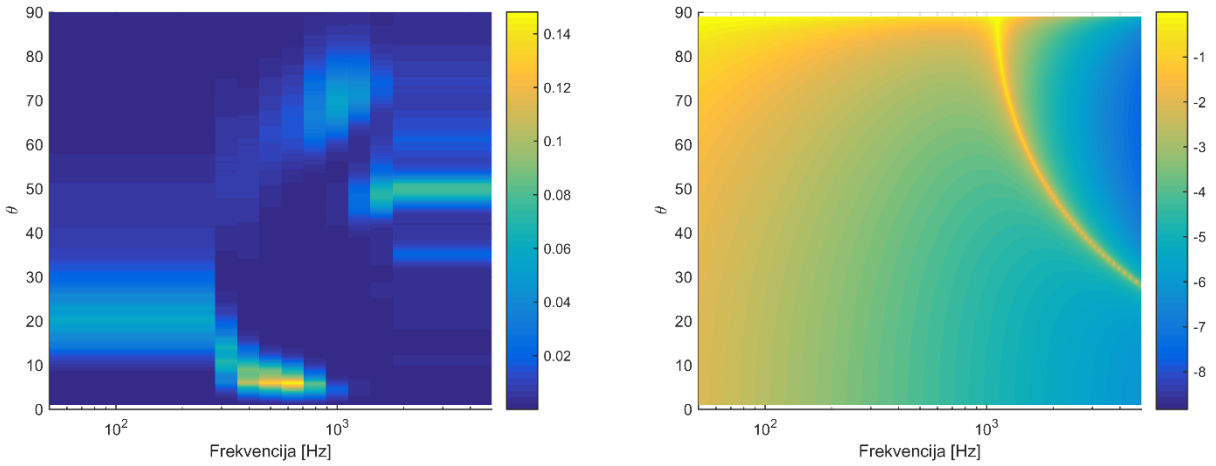
Prilikom proračuna izolacione moći fasadnih pregrada, poznata je zavisnost izolacione moći od incidentnog ugla [80]. Opšti izraz za izračunavanje izolacione moći polazi od koeficijenta transmisije:

$$R = -10\,log\left(\tau\right), \tag{4.1}$$

gde je τ koeficijent transmisije. Koeficijent transmisije je veličina koja je zavisna od frekvencije i ugla incidencije i može se uprošćeno predstaviti kao:

$$\tau\left(f\right) = \sum_{\theta=0}^{\pi/2} \tau\left(f,\theta,\eta,m',f_c\right)\cdot p\left(f,\theta\right), \tag{4.2}$$

gde je f frekvencija, θ incidentni ugao, η faktor unutrašnjih gubitaka, m' površinska masa, f_c frekvencija koincidencije, $p(f,\theta)$ gustina verovatnoće raspodele incidentne energije. Prilikom izračunavanja teorijske vrednosti izolacione moći, podrazumeva se difuzno zvučno polje koje karakteriše ugaona raspodela $p(f,\theta)=\sin(\theta)$, i važi u svim frekvencijskim opsezima. Kada se umesto teorijske raspodele uvede eksperimentalno utvrđena ugaona raspodela dobijena predloženom metodologijom, može se proračunati izolaciona moć koju će zadata pregrada ispoljiti u datom tipu urbane lokacije.

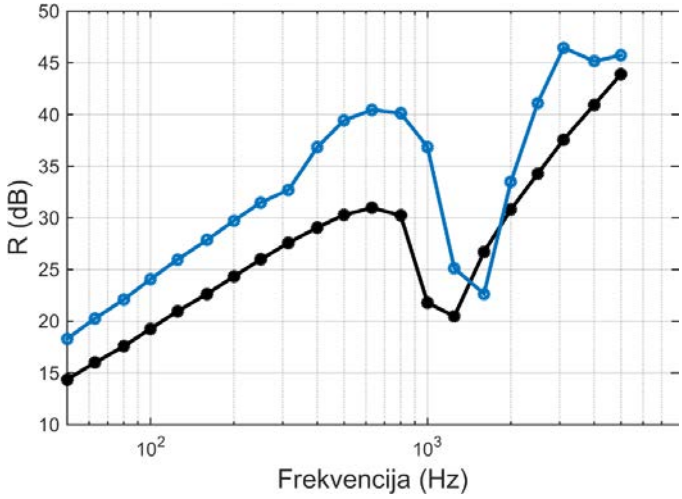


a) b)

Slika 4.6 Eksperimentalno utvrđena ugaona raspodela incidentne energije $p(f,\theta)$ i analitički proračunat koeficijent transmisije $\tau(f,\theta)$.

Na Slici 4.6 ilustrovani su eksperimentalno određena ugaona raspodela incidentne energije i analitički proračunat koeficijent transmisije u zavisnosti od frekvencije i ugla. Pretpostavljeni materijal u analitičkom proračunu $\tau(f,\theta)$ je monolitno staklo debljine 12 mm. Prikazana ugaona raspodela odgovara jednoj od lokacija na kojima su vršena merenja i biće detaljnije diskutovana u narednim poglavljima. Na Slici 4.6 se može uočiti da je ugaona raspodela ista za sve frekvencijske opsege manje 250 Hz i veće od 2 kHz. S obzirom da je niz optimizovan za rad opsegu frekvencija između 250 Hz i 2 kHz, za niže i više frekvencijske opsege preuzete su raspodele na graničnim vrednostima.

Na osnovu faktora prikazanih na Slici 4.6 može se proračunati očekivana izolaciona moć fasadne pregrade kada se nađe na lokaciji koja pripada istoj klasi urbane konfiguracije, kao lokacija na kojoj je izmerena prikazana eksperimentalna gustina raspodele. Rezultati za staklenu pregradu debljine 12 mm prikazani su na Slici 4.7.



Slika 4.7 Izolaciona moć pretpostavljene monolitne pregrade od stakla debljine 12 mm. Teorijska kriva (crna), kriva proračunata na osnovu eksperimentalno utvrđene raspodele energije (plava).

Na Slici 4.7 mogu se uočiti značajne razlike u odnosu na teorijsku vrednost izolacione moći (u pojedinim opsezima i do 10 dB. Jednobrojna vrednost teorijske krive iznosi 29 dB, dok proračunata vrednosti iznosi 33 dB. Dobijene vrednosti izolacione moći se dalje mogu koristiti za predikciju ambijentalne buke unutar zgrade.

4.3 Korekcija laboratorijskih vrednosti izolacione moći složenih pregradnih konstrukcija na bazi ugaone raspodele incidentne energije

U prethodnim poglavljima pokazana je mogućnost upotrebe mikrofonskog niza za dobijanje podataka o ugaonoj raspodeli incidentne zvučne energije koja pogađa fasadne elemente. Izdvojene su 4 različite urbane zone u kojima postoji značajna razlika u izmerenim ugaonim raspodelama incidentne energije. Te razlike su posledica konfiguracije zgrada kao prepreka prostiranju zvuka i njihovog položaja u odnosu na dominantne saobraćajnice. Razlike u frekvencijski i ugaono zavisnim raspodelama incidentne zvučne energije kao posledicu daju razlike u ispoljenim, građevinskim, bolje rečeno urbanim vrednostima zvučne izolacije fasadnih elemenata. U prethodnom potpoglavlju je pokazano da u slučaju homogenih pregrada izolaciona moć koja se izračunava na osnovu izraza (4.1) i (4.2) uzima u obzir ugaono i frekvencijski zavisan koeficijent transmisije i ugaono i frekvencijski zavisnu raspodelu incidentne energije.

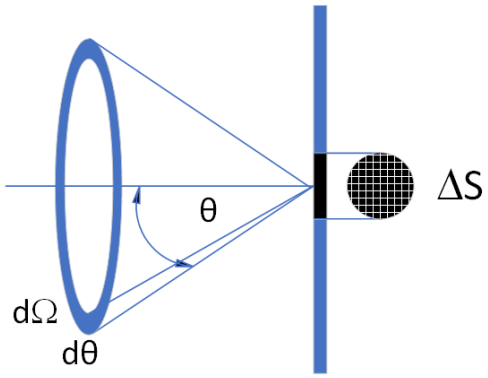
Analitički izraz za zavisnost koeficijenta transmisije od ugla incidencije zvučnih talasa poznata je samo za homogene pregradne elemente. Poznavanjem osnovnih fizičkih parametara građevinskog materijala, Jangovog modula elastičnosti, brzine longitudinalnih talasa i gubitaka u materijalu, kao i ugaone raspodele gustine incidentne energije, moguće je za svaku lokaciju proračunati očekivanu izolacionu moć pregrade. Ta vrednost se razlikuje od vrednosti izolacione moći izmerene u laboratorijskim uslovima, gde je pregrada napadnuta difuznim poljem iz predajne prostorije.

U slučaju kada je pregrada složene strukture i sastavljena od više slojeva istog ili različitih materijala nije moguće analitički izraziti koeficijent transmisije. U tom slučaju procena ostvarene izolacione moći može se izvršiti samo na osnovu ugaone raspodele gustine energije, odnosno, na osnovu ukupne normalne komponente incidentne energije.

4.3.1. Proračun incidentne energije u difuznom i homogenom polju

U okolnostima kada je pregradni zid izložen idealnom difuznom i homogenom zvučnom polju može se analitički izvesti izraz za upadnu incidentnu snagu koja pogađa elementarnu površinu ΔS (Slika 4.8). Tada je gustina energije koja dolazi iz svih pravaca u bilo koju tačku zvučnog polja jednaka. Talasi koji dolaze u neku tačku prostora iz prostornog ugla $d\Omega$ imaju gustinu energije dE.

Talasi koji tu tačku pogađaju iz celokupnog prostornog ugla 4π imaju ukupnu gustinu energije *E*. U homogenom i difuznom polju gustina energije po pravcima je jednaka, pa se može konstatovati da je gustina energije koja dolazi iz prostornog ugla dΩ u odnosu na ukupnu gustinu energije srazmerna odnosu prostornog ugla dΩ i ukupnog prostornog ugla 4π:



Slika 4.8 Ilustracija prostornog ugla pod kojim zvučna energija iz difuznog i homogenog polja pogađa element zapremine zida Δ*S*

$$\frac{\mathrm{d}E}{E} = \frac{\mathrm{d}\Omega}{4\pi} \tag{4.3}$$

Ako se na beskonačnom zidu pretpostavi jedna elementarna površina kružnog oblika Δ*S* kao na Slici 4.8, gustina energije koja pogađa površinu pod uglom θ dolazi iz prostornog ugla dΩ, koji je određen uglom incidencije θ i dθ.

$$\frac{\mathrm{d}E}{E} = \frac{2\pi \sin\theta \mathrm{d}\theta}{4\pi} = \frac{\sin\theta \mathrm{d}\theta}{2} \tag{4.4}$$

Prema tome, gustina energije koja površinu Δ*S* pogađa pod uglom θ može se izraziti i preko upadne snage koja pogađa element površine ΔS:

$$\Delta P_u = \frac{Ec\Delta S}{2}\int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{Ec\Delta S}{4} = \frac{J\Delta S}{4} \tag{4.5}$$

Prethodni izraz se može iskazati i preko intenziteta *J*, jer su se talasi koji pogađaju posmatranu tačku do tada više puta reflektovali, pa se mogu smatrati ravanskim. Ugaona raspodela gustine energije koja pogađa elementarnu površinu pod uglom θ data je izrazom i prikazana na slici 4.9:

$$p(\theta) = \sin(\theta) \tag{4.6}$$

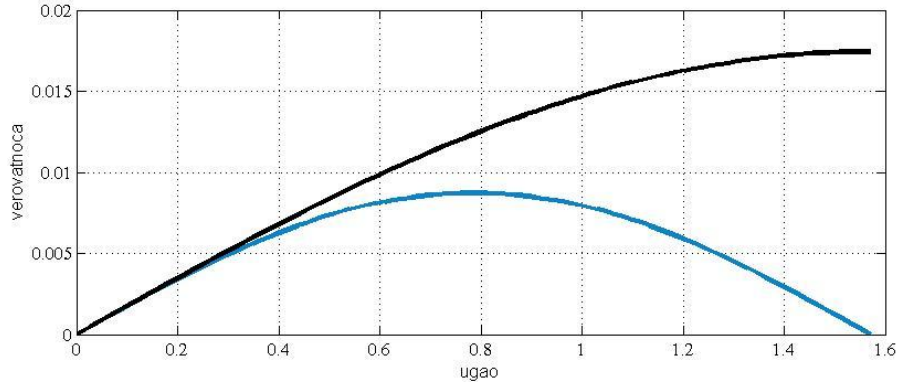
Najčešći pravci pod kojima zvučno polje pogađa elementarnu površinu su klizeći uglovi, a najmanja količina zvučne energije dolazi normalno na površinu. Transmisija zvučne energije kroz pregradu određena je normalnom komponentnom energije koja pogađa njenu površinu. Ukupna normalna komponenta incidentne snage koja na površinu dolazi pod uglom θ i pogađa elementarnu površinu je:

$$d\Delta P_u = dJ\Delta S\cos\theta = \frac{Ec\Delta S}{2}\cos\theta\sin\theta d\theta \tag{4.7}$$

Ukupna upadna snaga za talase koji dolaze pod svim upadnim uglovima od 0 do $\pi/2$ data je izrazom:

$$\Delta P_u = \frac{Ec\Delta S}{2}\int_0^{\pi/2}\cos\theta\sin\theta d\theta = \frac{Ec\Delta S}{4} = \frac{J\Delta S}{4} \qquad 4.8$$

Normalna komponenta upadne energije odgovorna je za proces transmisije kroz površinu koja je pogođena zvučnim poljem. Iz poslednjeg izraza proizilazi da je u difuznom polju ta komponenta energije četiri puta manja od energije koja stiže u bilo koju tačku iz celokupnog prostornog ugla 4π.



Slika 4.9 Raspodela gustine energije u difuznom polju koja pogađa elementarnu površinu pod uglom θ – sin (θ) (crna kriva) i raspodela normalne komponente incidentne energije (plava kriva)

U difuznom polju izolaciona moć pregrade izračunava se na osnovu koeficijenta transmisije za neki materijal i na osnovu ugaone raspodele incidentne energije. Koeficijent transmisije je i frekvencijski zavisna veličina:

$$\tau(\omega) = \frac{\int_0^{2\pi}\tau(\theta,\omega)\sin(\theta)\cos(\theta)d\theta}{\int_0^{2\pi}\sin(\theta)\cos(\theta)d\theta} = 2\int_0^{2\pi}\tau(\theta,\omega)\sin(\theta)\cos(\theta)d\theta \qquad 4.9$$

Primenom mikrofonskog niza moguće je u realnim okolnostima odrediti ugaonu raspodelu gustine incidentne energije na površini fasade u različitim urbanim konfiguracijama. Poznavanje realne ugaone raspodele incidentne energije potrebno je da bi se odredila građevinska izolaciona moć fasadnih elemenata prema obrascu:

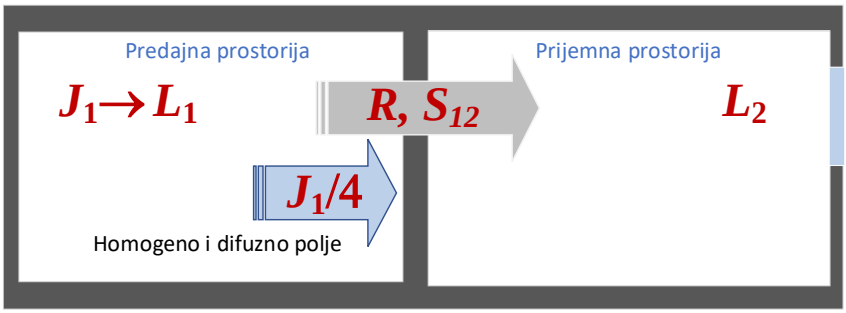
$$\tau(\omega) = \frac{\int_0^{2\pi}\tau(\theta,\omega)\,p(\theta,\omega)\cos(\theta)d\theta}{\int_0^{2\pi}p(\theta,\omega)\cos(\theta)d\theta} \qquad 4.10$$

Ovakav postupak može se primeniti u slučaju homogenih pregrada za koje je poznata analitička zavisnost koeficijenta transmisije u funkciji frekvencije i ugla incidencije.

4.3.2. Izolaciona moć pregrade pri pobudi iz difuznog polja

U okolnostima kada nije poznata analitička zavisnost koeficijenta transmisije za neku pregradu, što je slučaj za sve nehomogene strukture, do podataka o izolacionim svojstvima materijala i konstrukcija može se doći isključivo merenjima u laboratorijskim uslovima. Takvo merenje se bazira na pretpostavci da je pregrada ugrađena između predajne i prijemne prostorije, pri čemu su u predajnoj prostoriji ispunjeni uslovi za uspostavljanje difuznog i homogenog zvučnog polja. U takvim uslovima u predajnoj prostoriji intenzitet J_1, odnosno nivo zvuka L_1 ujednačeni su po čitavoj zapremini, pa

pregradnu konstrukciju površine S_{12} i izolacione moći R pogađa incidentna energija koja je, prema prethodnom izvođenju, srazmerna $J_1/4$. Ovo je šematski ilustrovano na slici 4.10.



Slika 4.10 Prenos vazdušnog zvuka iz predajne u prijemnu prostoriju u slučaju difuznog i homogenog polja

Upadna zvučna snaga koju prima pregrada sa strane predajne prostorije je:

$$P_u = \frac{J_1 S_{12}}{4} \tag{4.11}$$

Deo energije koji pregrada izrači u susednu prostoriju srazmerna je koeficijentu transmisije τ, odnosno njenoj izolacionoj moći R. Izračena snaga u prijemnoj prostoriji je:

$$P_2 = \frac{J_1 S_{12}}{4}\tau \tag{4.12}$$

Ako je ukupna apsorpcija u prijemnoj prostoriji A_2, intenzitet zvuka u njoj je:

$$J = \frac{4P_2}{A_2}. \tag{4.13}$$

Nivo zvuka u prijemnoj prostoriji može se izraziti na sledeći način:

$$L_2 = L_1 + 10\log\frac{S_{12}}{A_2} - R, \tag{4.14}$$

Ovaj izraz pokazuje da se izolaciona svojstva ugrađene pregrade mogu oceniti merenjem nivoa zvuka u predajnoj i prijemnoj prostoriji:

$$R = L_1 - L_2 + 10\log\frac{S_{12}}{A_2} = D + 10\log\frac{S_{12}}{A_2}, \tag{4.15}$$

gde je D zvučna izolovanost definisana kao razlika nivoa u predajnoj i prijemnoj prostoriji.

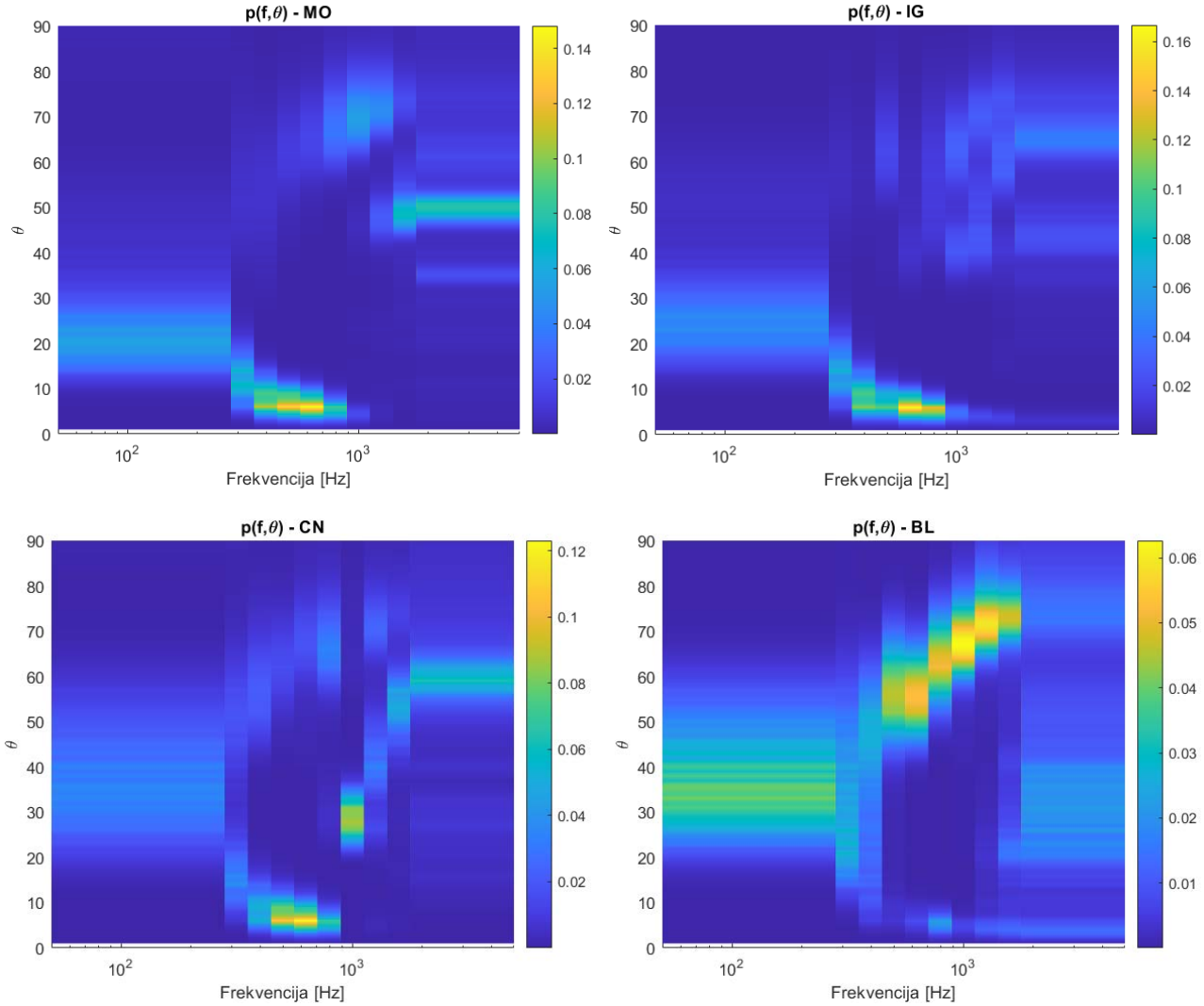
Međutim, u slučaju kada je fasadni element izložen zvučnom polju u realnim uslovima, to jest ambijentalnoj buci iz spoljašnje sredine, incidentna zvučna energija nije difuzna, već ima neku ugaonu raspodelu gustine incidentne energije $p(\theta)$. Koeficijent transmisije $\tau(\theta,\omega)$, kao i ugaona raspodela incidentne energije $p(\theta,\omega)$ funkcije su koje zavise od dve promenljive. Njihova međuzavisnost određuje u kojoj meri promena ugaone raspodele incidentne energije menja građevinska izolaciona svojstva pregrade.

Osnovna karakteristika homogenih pregrada je postojanje manje ili više izražene frekvencije koincidencije. Pojava koincidencije prouzrokuje pad u frekvencijskoj karakteristici njihove izolacione moći u zoni oko te frekvencije. U realnim okolnostima karakterističnim u građevinarstvu, fasadni elementi koji su izloženi ambijentalnoj buci imaju složenu strukturu, sa više slojeva u sebi koji imaju različite fizičke osobine. U tom smislu karakteristična su staklena okna na prozorima i balkonskim vratima koja su po pravilu sastavljena od više stakala različitih debljina između kojih je

vazdušni međuprostor (takozvani „paketi stakla“). U tim paketima široko se koriste i laminirana stakla čija izolaciona svojstva značajno odstupaju od monolitnog stakla. To se ogleda u činjenici da laminirana stakla nemaju izraženu frekvenciju koincidencije u frekvencijskoj karakteristici njihove izolacione moći.

4.3.3. Proračun korekcionog faktora na osnovu raspodele incidentne energije

Za sve takve složene strukture pregradnih elemenata koji se uobičajeno nalaze na fasadama nije poznat analitički izraz za koeficijent transmisije. Zbog toga se proračuni mogu bazirati samo na laboratorijski izmerenim vrednostima izolacione moći, ali je za procenu građevinske vrednosti izolacione moći nekog pregradnog elementa koji se nalazi na fasadi zgrade neophodno na neki način uvesti izvesnu korekciju. Ona je potrebna s obzirom da se realna raspodela incidentne energije kojoj će pregrade biti izložene na lokaciji objekta razlikuje u odnosu na laboratorijske okolnosti difuznog zvučnog polja. Za takvu korekciju potrebno je poznavanje uticaja ugaone zavisnosti raspodele incidentne energije. U laboratorijskim uslovima pretpostavlja se da je pregrada napadnuta difuznim poljem na svim frekvencijama. Analiza spoljašnje buke uz pomoć mikrofonskih nizova pružila je uvid u realne karakteristike ugaone raspodele incidentne energije za različite urbanističke uslove u kojim se nalaze zgrade, kao i za različite uslove saobraćaja oko njih. Za razliku od raspodele kakva je u difuznom polju, u realnim okolnostima ta raspodela značajno varira od karakteristika mikro urbanih lokacija i položaja velikih saobraćajnica u okolini.



Slika 4.11 Frekvencijsko-ugaone zavisnosti raspodele gustine incidentne energije na lokacijama MO, IG, CN i BL

Na Slici 4.11 prikazane su raspodele izmerene na posmatrane četiri lokacije koje su u okviru ovog rada korišćene za snimanje mikrofonskim nizom - ulice Molerova (MO), Ilije Garašanina (IG), Cara Nikolaja (CN) i Bulevar kralja Aleksandra (BL). Na njima se uočavaju bitne razlike u načinu na koji zvučna energije pogađa fasadni element na različitim lokacijama u gradu, to jest u zavisnosti od urbanih uslova.

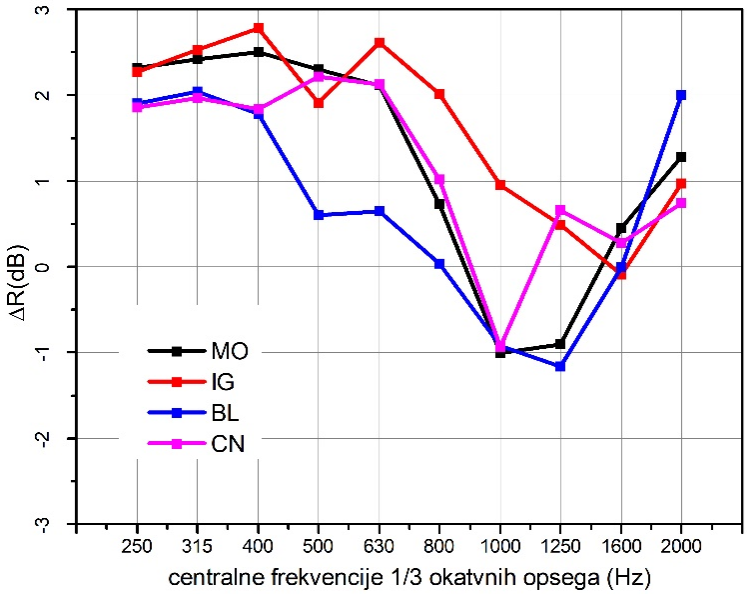
Na osnovu dobijene realne ugaone raspodele incidentne energije predlaže se korekcioni faktor kojim se laboratorijski podaci o izolacionim svojstvima složenih konstrukcija mogu korigovati. Ugaona raspodela je frekvencijski zavisna, pa je za svaki frekvencijski opseg od interesa (oktavni ili 1/3 oktavni) moguće odrediti faktor $k(\omega)$ kojim se koriguju laboratorijske vrednosti prema formuli:

$$\tau(\omega) = \frac{\tau(\omega)_{lab}}{\int_0^{2\pi} p(\theta,\omega)\cos(\theta)d\theta} = \frac{\tau(\omega)_{lab}}{k(\omega)} \qquad 4.16$$

Korekcija izolacione moći u slučaju poznate ugaone raspodele incidentne energije u odnosu na izmerenu laboratorijsku vrednost može se izraziti na sledeći način:

$$\Delta R(\omega) = R_{lab}(\omega) + 10\log\frac{\int_0^{\pi/2} p(\theta,\omega)\cos(\theta)d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin(\theta)\cos(\theta)d\theta} \qquad 4.17$$

Na osnovu izmerenih raspodela gustine incidentne energije na posmatranim lokacijama određeni su, prema gornjem izrazu, frekvencijski zavisni korekcioni faktori za svaku analiziranu urbanu lokaciju. Na slici 4.12 prikazana je izračunata frekvencijska zavisnost korekcionog faktora u odnosu na vrednosti izmerene u laboratorijskim uslovima, to jest u uslovima difuznog poja. Korekcioni faktor se kreće od –0.5 dB do 3 dB. Pozitivne vrednosti korekcionog faktora ukazuju da će građevinska izolaciona moć fasadnog elementa biti veća u realnim okolnostima u odnosu na okolnost kada je pobuđena difuznim poljem.

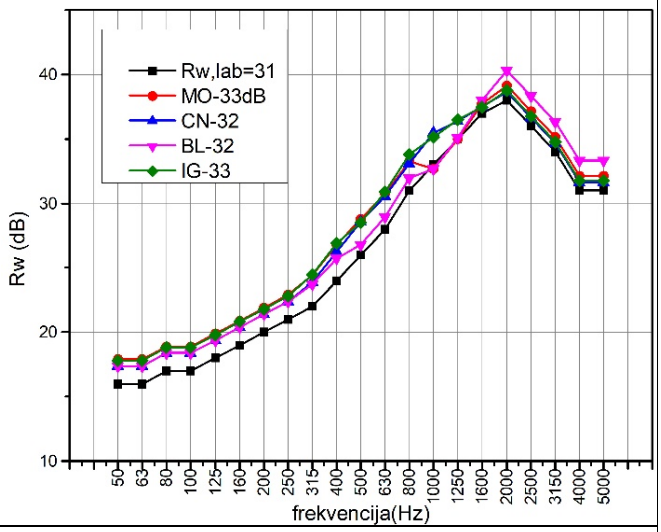
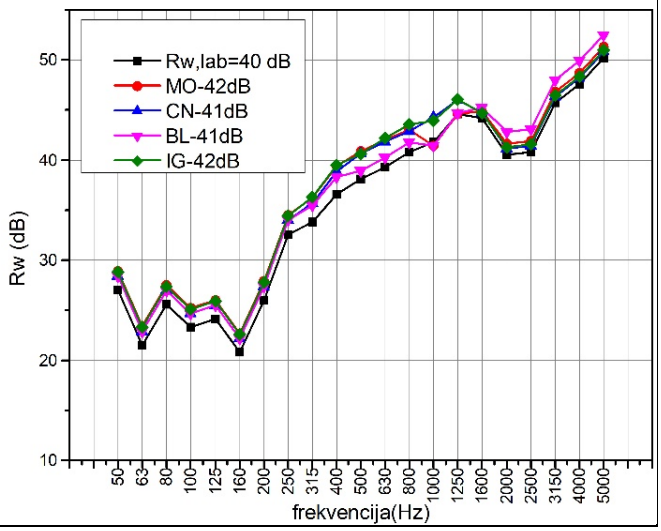


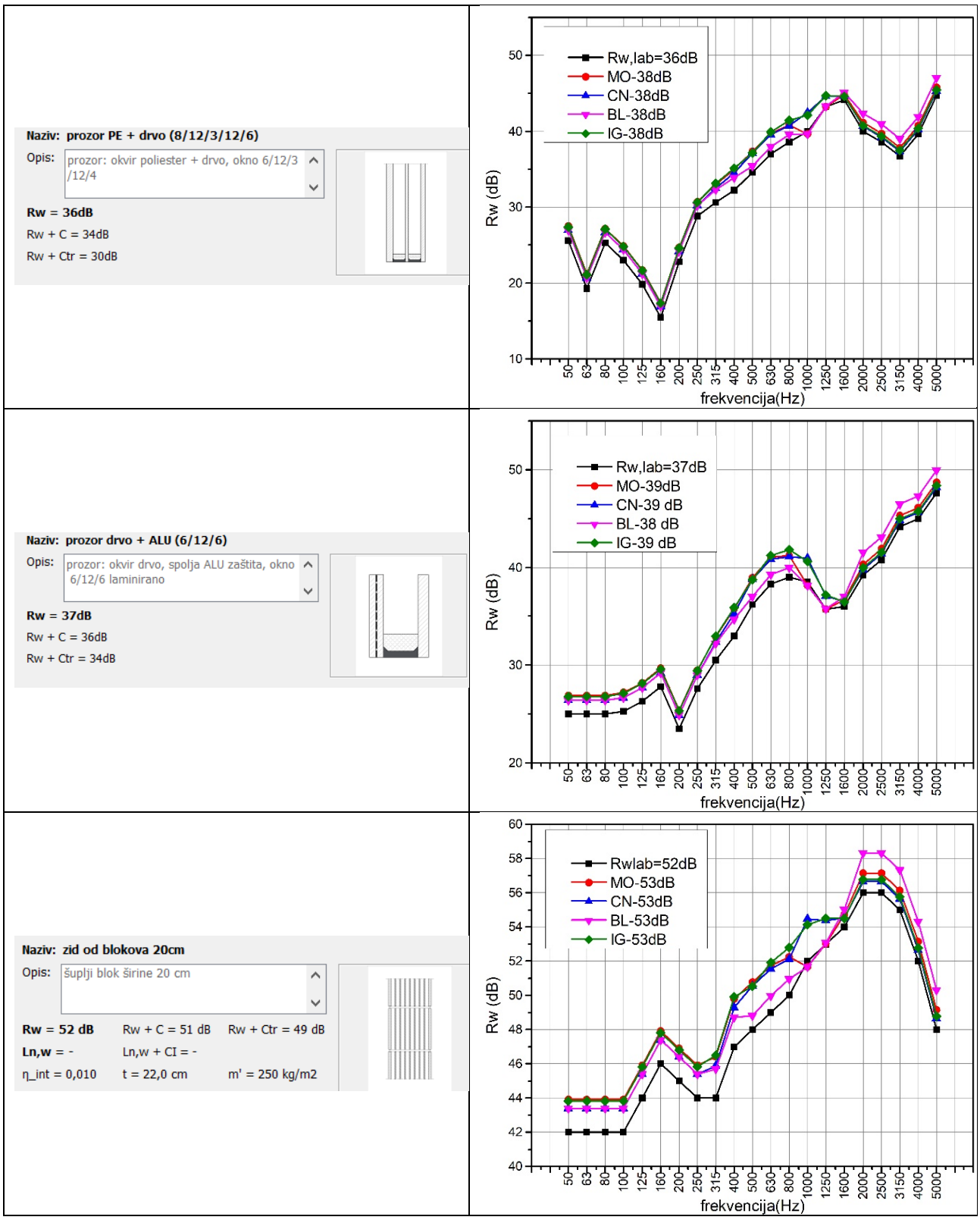
Slika 4.12 Vrednosti frekvencijski zavisnih korekcionih faktora za korigovanje laboratorijskih vrednosti zvučne izolacije za četiri različite urbane celine u gradu

Uvodeći predloženi način korekcije laboratorijskih vrednosti izolacione moći moguće je za složene konstrukcije koje imaju atest iz laboratorije proceniti sa određenom tačnošću kakva će svojstva pokazati kada su ugrađene na fasadama zgrada. Ova metodologija je primenjena na četiri različite

strukture fasadnih prozora i na jednu masivnu pregradu koja se često koristi na fasadama. U Tabeli 4.1 prikazane su njihove strukture i izračunate korigovane krive izolacione moći za četiri korišćene urbane lokacije. Za svaku od njih naznačene su i merodavne jednobrojne vrednosti. Izuzimajući uticaj zavisnosti koeficijenta transmisije od ugla incidencije, predloženom korekcijom vrednuje se samo uticaj raspodele incidentne energije i njeno odstupanje u odnosu na raspodelu u difuznom polju. Prikazani rezultati pokazuju da se na posmatranim lokacijama menjaju vrednosti krive izolacione moći u rasponu od -0.5 dB do 3 dB što u posmatranim slučajevima dovodi do promene u merodavnim jednobojnim vrednostima u rasponu od 2 dB.

Tabela 4.1 Korigovane laboratorijske izolacione moći za različite tipove pregrada

Tip konstrukcije	Korigovane laboratorijske izolacione moći
Naziv: prozor ALU (4/16/4) Opis: prozor: okvir ALU, okno 4/16/4 **Rw = 31dB** Rw + C = 30dB Rw + Ctr = 27dB	
Naziv: prozor drvo + PVC (8 lam/20 argon/6) Opis: prozor: okvir poliester + drvo, okno 8 (lami nirano)/20 (argon)/6 **Rw = 40dB** Rw + C = 38dB Rw + Ctr = 34dB	



4.4 Eksperimentalna postavka

Za potrebe analize napravljena je eksperimentalna postavka koja obuhvata merenja vršena na četiri urbane lokacije u Beogradu. Lokacije su: Molerova ulica (MO), ulica Cara Nikolaja (CN), Bulevar kralja Aleksandra (BL) i ulica Ilije Garašanina (IG). Sve odabrane lokacije pripadaju različitoj klasi urbane konfiguracije terena [80]. Na svim lokacijama je izvršeno merenje prema proceduri opisanoj u ovom poglavlju. Detalji svake od lokacija su date u Prilogu 1. U nastavku su prikazane analize koje su sprovedene na svakoj od lokacija i koje se odnose na optimizaciju parametara algoritama

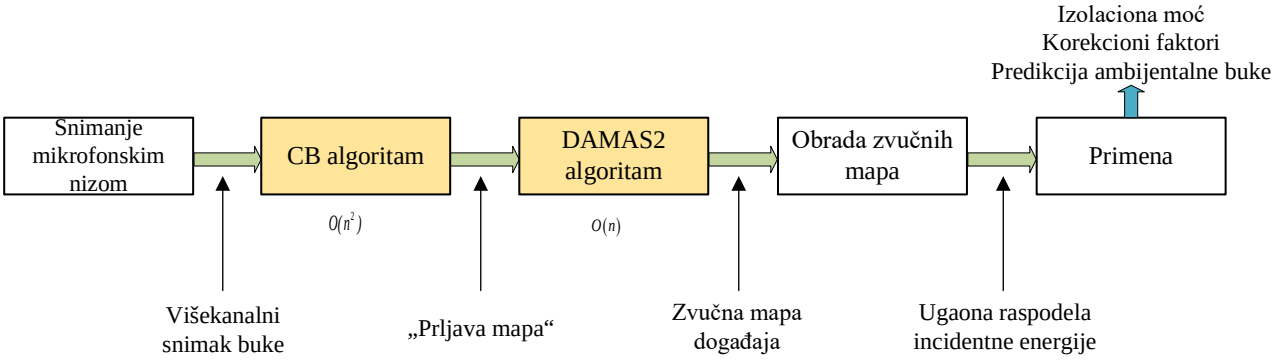
prostorno-vremenske obrade, predikciju ambijentalne buke na lokacijama i naposletku predikciju indeksa privatnosti. Data su poređenja različitih lokacija sa različitim tipovima pretpostavljenih fasadnih pregrada i na osnovu njih izvedeni zaključci o predikciji stanja privatnosti.

5 Povećanje efikasnosti merne metodologije

5.1 Kompleksnost algoritama prostorno-vremenske obrade signala

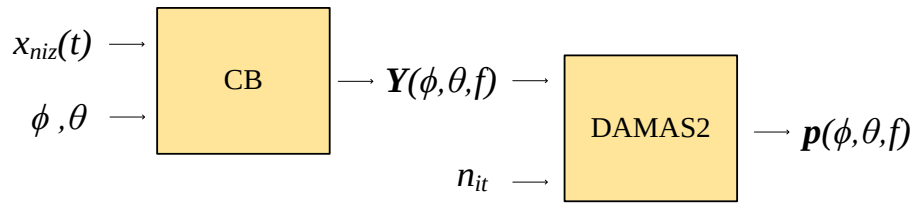
U dosadašnjem istraživanju ukazano je na problem vremenske kompleksnosti procedure obrade rezultata snimanja saobraćajne buke mikrofonskim nizom [80]. Procedura podrazumeva obradu višekanalnih audio zapisa kroz iterativne postupke algoritama prostorno-vremenske obrade signala, što vodi ka relativno velikoj vremenskoj kompleksnosti algoritma. Dugačko vreme izračunavanja ima dve značajne posledice. Prva je da prilikom analize snimaka postaje otežano tumačenje rezultata i eventualna varijacija parametara u cilju istraživanja, s obzirom da je za svaki ulazni signal određenog trajanja potrebno vreme izračunavanja veće za jedan red veličine. U praksi je za obradu višekanalnog snimka buke trajanja jedan minut potreban oko jedan sat računarske obrade na prosečnom savremenom računaru. Druga posledica je u činjenici da veliko vreme izračunavanja predstavlja prepreku primeni predložene metodologije na platformama u realnom vremenu. Dve navedene posledice dugačkog vremena izračunavanja predstavljaju motivaciju za ispitivanje mogućnosti povećanja vremenske efikasnosti procedure. Cilj toga bi bio da ona postane alat za predikciju i da se eventualno razvija ka implementaciji u realnom vremenu.

Dijagram predložene procedure prikazan je na Slici 5.1. Na njemu su naznačena dva bloka u okviru kojih se vrši prostorno-vremenska obrada signala iz mikrofonskog niza. U njima se odvijaju vremenski najzahtevniji procesi u okviru ukupne procedure. Na slici je naznačena vremenska složenost algoritma predstavljena u *O* notaciji. Iz toga se može očitati ponašanje algoritma prilikom promene broja ulaznih podataka [81]. CB algoritam ima kvadratnu složenost, dok algoritam DAMAS2 ima linearnu složenost. Pri tome, broj ulaznih podataka algoritma je opšte označen sa *n* na Slici 5.1 i ima drugačiju interpretaciju za prikazana dva algoritma.



Slika 5.1 Dijagram procedure sa naznačenim kompleksnostima primenjenih algoritama.

Kvadratna vremenska složenost CB algoritma dominantno je utvrđena jednačinom 3.13 za izračunavanje prljave mape koja je realizovana kao dve ugneždene *for* petlje koje obrađuju ulazni signal iz mikrofonskog niza za sve parove azimut-elevacija za svaki frekvencijski bin. Uprošćena predstava značajnih ulaznih i izlaznih podataka oba algoritma prikazana je na Slici 5.2. Pored ulaznih podataka za algoritam CB, a to su ulazni višekanalni snimak $x_{niz}(t)$ i parovi azimut elevacija, postoje i drugi parametri koji utiču na vremensku kompleksnost prostorno-vremenske obrade signala iz mikrofonskog niza. To su frekvencijska rezolucija (*df*) i broj susednih intervala ulaznog signala koji se usrednjava (*K* iz izraza 3.6). Međutim, vrednosti ovih parametara u korišćenom nizu optimizovane su za njegovu primenu u analizi saobraćajne buke [80]. Preuzete su njihove optimalne vrednosti i u ovom radu nisu uzimani u razmatranje. U ovom poglavlju prikazano je istraživanje mogućnosti redukcije količine ulaznih podataka prikazanih na Slici 5.2 kroz: a) redukciju vremenskog intervala merenja i b) povećavanje prostorne rezolucije algoritma, odnosno semplovanje prostora sa većim pomerajem po azimutu i elevaciji.



Slika 5.2 Šematski prikaz značajnih ulaznih i izlaznih podataka u prostorno vremenskoj obradi.

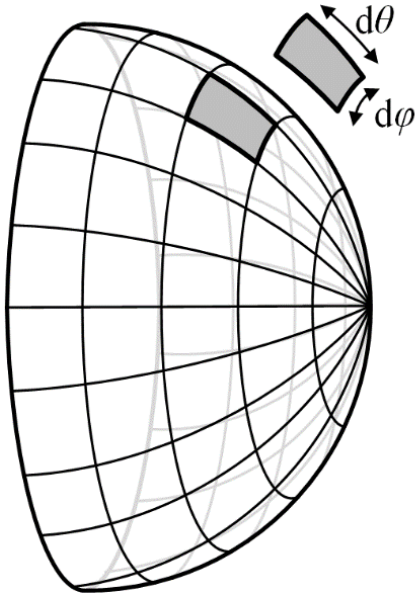
Ako se azimut ϕ i elevacija θ posmatraju kao ulazni podaci, vremenska kompleksnost algoritma CB jeste $O(n^2)$. To znači da se za svako dvostruko smanjivanje broja parova azimut-elevacija za koje se vrši izračunavanje, ostvaruje četvorostruka ušteda u vremenu potrebnom za izvršenje CB algoritma. Ako se posmatra ulazni signal $x_{niz}(t)$ kao ulazni podatak algoritma CB, računska kompleksnost jeste $O(n)$, odnosno vreme izvršavanje zavisi linearno od trajanja ulaznog signala. Obrada signala se radi u spektralnom domenu, a Furijeova transformacija signala iz vremenskog u spektralni domen je vremenski efikasan algoritam zanemarljivog trajanja u celokupnoj proceduri, s obzirom da se izvršava samo jednom za uzorak signala $K*T$ koji se obrađuje. Ipak, imajući u vidu pomenutu činjenicu da je vreme izvršavanja celokupne procedure za red veličine veće od vremena trajanja signala, uštede u vidu redukcije trajanja mogu dati značajne doprinose čak i ako je zavisnost linearna. Na Slici 5.2 prikazani su ulazni podaci algoritma DAMAS2: prljava mapa $Y(\phi,\theta,f)$ i broj iteracija procedure n_{it}. Kao što je prikazano u poglavlju 3.4.4, procedura dekonvolucije realne zvučne mape i uticaja mikrofonskog niza vrši se u domenu dvodimenzionalne Furijeove transformacije u kojoj se iterativnim postupkom iz prljave mape izračunava realna zvučna mapa, to jest raspodela incidentne energije. Ovaj prelazak u transformacioni domen ostvario je značajnu vremensku uštedu i unapređenje u odnosu na klasičnu DAMAS proceduru. I pored toga, dekonvolucija DAMAS2 algoritmom predstavlja značajan faktor u celokupnoj vremenskoj kompleksnosti. Broj iteracija n_{it} dekonvolucione procedure u transformacionom domenu je određen konkretnom primenom obrade signala. U slučaju saobraćajne buke, koja se obrađuje u ovom radu, u prethodnim istraživanjima ustanovljen je optimalan broj iteracija [80] koji iznosi 1000 i u ovom radu nije vršena varijacija tog parametra. Pored broja iteracija, dimenzije prljave mape $Y(\phi,\theta,f)$ nad kojom se vrši obrada, i koja predstavlja drugi značajni ulazni podatak u ovaj blok će dominantno odrediti vreme izvršavanja DAMAS2 algoritma. Prema tome, svako povećavanje prostorne rezolucije, odnosno grublje semplovanje prostora parovima azimut-elevacija, će direktno imati uticaj i na smanjivanje vremena izvršavanja DAMAS2 algoritma.

Na kraju, treba napomenuti da u ukupnom vremenu izvršavanja prostorno-vremenske obrade signala, algoritmi CB i DAMAS2 učestvuju sa 35% i 65% vremena, respektivno. Na kraju poglavlja biće komentarisane moguće uštede u vremenu obrade predloženim metodama povećanja efikasnosti.

5.2 Optimizacija ugaone rezolucije algoritama prostorno-vremenske obrade signala

Kao što je objašnjeno u poglavlju 4, u procesu merenja ugaone raspodele incidentne energije, mere se energetski doprinosi svih tačaka definisanih na mreži skeniranja (*grid*) prikazanoj na Slici 5.3. Svaka tačka mreže određena je parom azimut-elevacija u odnosu na centar mikrofonskog niza. Pomeraj po azimutu i elevaciji između dve susedne tačke na mreži skeniranja naziva se prostorna ili ugaona rezolucija algoritma. Prvi korak prilikom izračunavanja rezultata merenja je konvencionalni *beamformer* algoritam (CB) koji vrši izračunavanje energetskog doprinosa za svaki par azimut-elevacija, u svim frekvencijskim binovima. S obzirom na navedenu kompleksnost algoritma koji ima kvadratnu kompleksnost posmatrano sa aspekta parova azimut-elevacija kao ulaznih podataka, svako povećavanje rezolucije faktorom 2, rezultuje četvorostrukim smanjivanjem broja mernih tačaka za koje se vrši izračunavanje. U ovoj činjenici se nalazi motivacija za optimizaciju vremenske zahtevnosti algoritma θ povećavanjem prostorne rezolucije. U nastavku su data uvodna razmatranja vezana za povećavanje prostorne rezolucije, a u narednom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati optimizacije. Doprinosi vremenskoj efikasnosti obrade nakon povećanja prostorne rezolucije

biće komentarisani sa stanovišta održavanja tačnosti dobijenih rezultata nakon uvedenih modifikacija.



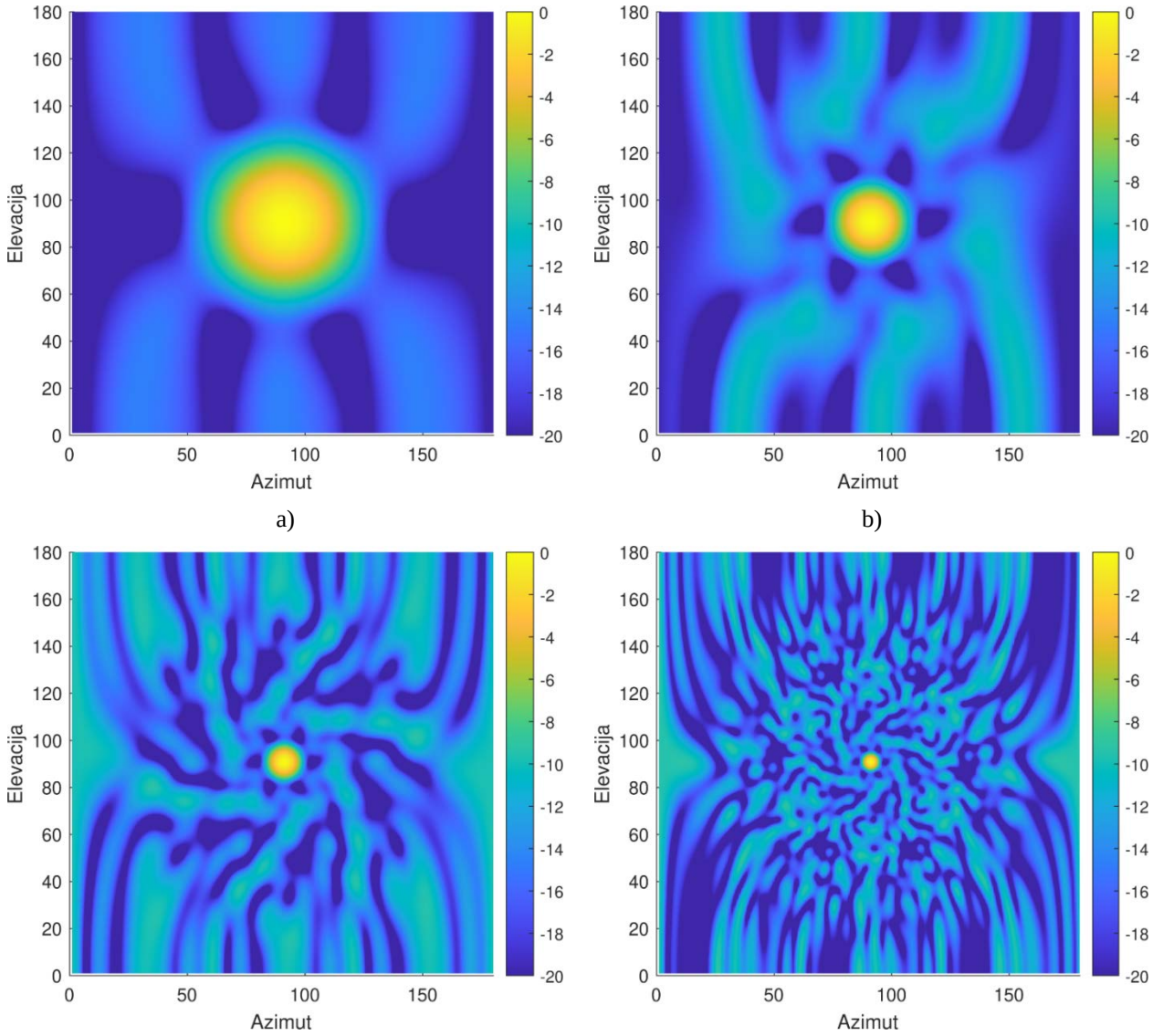
Slika 5.3 Mreža skeniranja – *grid*.

Dosadašnje analize saobraćajne buke mikrofonskim nizom vršene su sa zadatom prostornom rezolucijom od 1^o za koju je utvrđeno da daje dobre rezultate detekcije incidentne energije. Cilj analize prikazane u nastavku je da se ispita varijabilnost konačnih rezultata kada se prostorna rezolucija povećava. Pretpostavka je da se eksperimentalno može utvrditi minimalni potrebni ugaoni pomeraj s kojim se vrši prostorno-vremenska obrada signala, a da se pritom ne naruši tačnost rezultata u odnosu na zadat kriterijum odstupanja. Minimalni potrebni ugaoni pomeraj (azimut-elevacija), uslovljava nekoliko međusobno povezanih faktora vezanih sa procesom merenja mikrofonskim nizom:

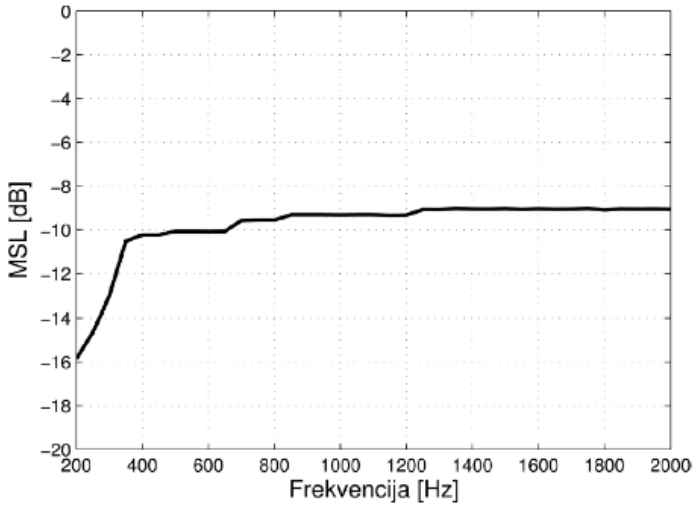
- osobine *beampattern*-a mikrofonskog niza;
- karakteristike lokacije na kojoj se vrše merenja;
- udaljenost ravni skeniranja (*r*);
- frekvencijski opseg u kom se vrše merenja.

Kao što je definisano u uvodnim poglavljima, svaki mikrofonski niz određen je svojim dijagramom usmerenosti - *beampattern*-om. On određuje sposobnost mikrofonskog niza da izvrši prostorno razdvajanje dva izvora zvuka razmaknuta u prostoru. *Beampattern* je određen geometrijskim rasporedom mikrofona u nizu i ima različite oblike u različitim frekvencijskim opsezima [82], [83]. Dva osnovna parametra niza su širina glavnog loba (*beamwidth* – BW) izražena u stepenima, i maksimalna vrednost bočnog loba koju određuje MSL parametar (*Maximum Sidelobe Level*), izražen relativno u dB u odnosu na glavni lob. *Beampattern* mikrofonskog niza primenjenog za merenja u ovom radu karakteriše ujednačenost MSL parametra u frekvencijskom opsegu saobraćajne buke.

Na Slici 5.4 prikazan je dijagram usmerenosti na četiri karakteristična 1/3 oktavna frekvencijska opsega. To je rezultat optimizacije pozicija mikrofona u mikrofonskom nizu [79] za prikazani frekvencijski opseg. Dijagrami pokazuju da se povećavanjem frekvencije širina glavnog loba smanjuje, struktura bočnih lobova usložnjava, dok nivo maksimalnih bočnih lobova ostaje konstantan relativno u odnosu na glavni lob.



Slika 5.4 *Beampattern* mikrofonskog niza korišćenog za snimanje buke: a) 250 Hz, b) 500 Hz, c) 1 kHz i d) 2 kHz.



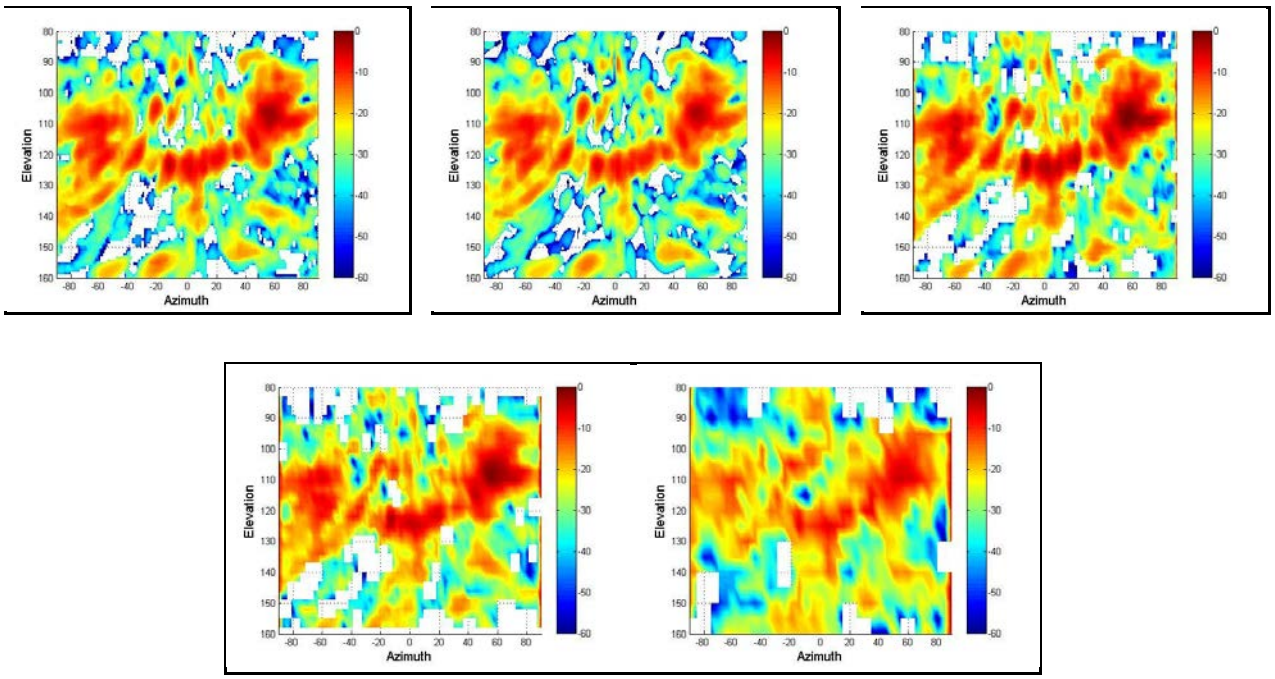
Slika 5.5 Frekvencijska zavisnost parametra MSL [78]

Na Slici 5.5 prikazani su nivoi maksimalnih bočnih lobova po frekvencijama (MSL). Na dijagramu se može uočiti da je nivo maksimalnog bočnog loba konstantan u frekvencijskom opsegu od interesa i u proseku 10 dB niži od nivoa glavnog loba.

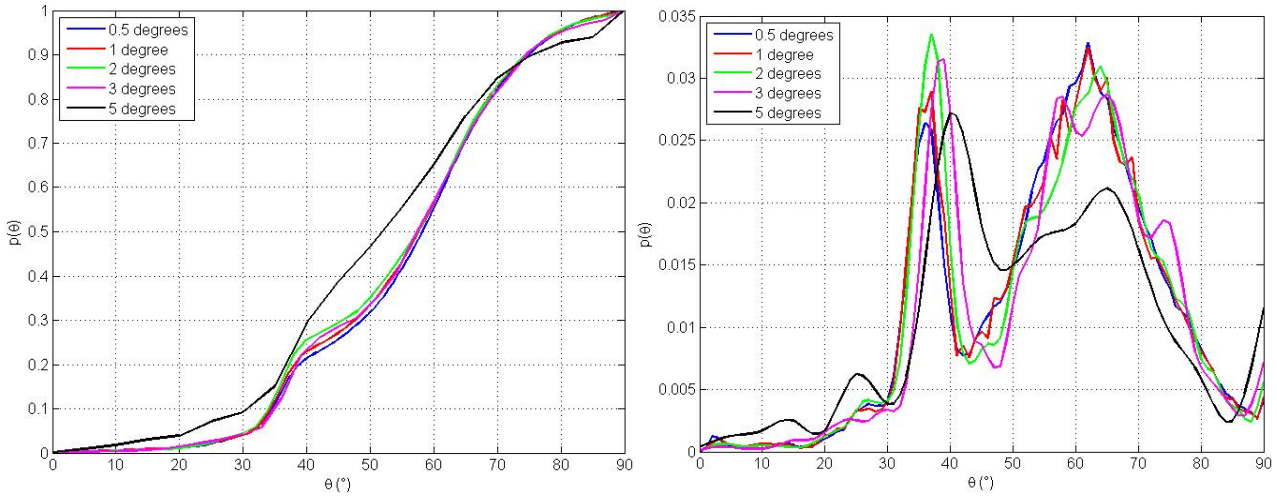
Ukoliko se očitaju vrednosti širine glavnog loba (-3 dB) u četiri prikazana frekvencijska opsega dobijaju se vrednosti: 40º na 250 Hz, 18º na 500 Hz, 10º na 1 kHz i 5º na 2 kHz. Imajući u vidu relativno veliku širinu glavnog loba na niskim frekvencijama, očekivano je da se u nižim frekvencijskim opsezima može vršiti izračunavanje sa većom prostornom rezolucijom, s obzirom da će, na primer, rezolucija od 1º, to jest pomeraj po azimutu i elevaciji od 1º, pri širini glavnog loba od 40º praktično na isti način detektovati posmatranu strukturu incidencije energije.

Još jedan od faktora u određivanju minimalnog potrebnog pomeraja po azimutu-elevaciji mikrofonskog niza je relativna pozicija ravni skeniranja u odnosu na mikrofonski niz. Ona je određena svojom udaljenošću od mikrofonskog niza (r), koje je jedan od parametra u izračunavanju *steering* vektora za svaki pravac. Na zadatoj frekvenciji, širina glavnog loba primenjenog mikrofonskog niza ima različite efekte na lokacijama na kojima je ravan skeniranja na različitoj udaljenosti. Na primer, u opsegu 1/3 oktave oko 500 Hz, širina glavnog loba iznosi 10º. Kako bi se ova veličina stavila u kontekst udaljenosti ravni skeniranja, navedimo kao primer dve realne udaljenosti ravni skeniranja preuzete iz eksperimentalnih scenarija prikazanih u Prilogu 1, $r_1=6$ m i $r_2=19$ m. Površina koju prostorni ugao od 10º iseca na ravni skeniranja u slučaju r_1 je $P_1=0.86$ m^2, dok je u slučaju r_2 površina je $P_2=8.65$ m^2. Ovaj primer, takođe ilustruje da se na lokacijama sa udaljenijom ravni skeniranja, može povećati prostorno rezolucija, jer se malim pomerajem po azimutu i elevaciji dolazi do približno istog rezultata detekcije incidentne energije. Udaljenost ravni skeniranja predstavlja osnovnu karakteristiku merne lokacije sa stanovišta prostorne rezolucije.

Na Slici 5.6 prikazana je raspodela incidentne energije za jedan događaj prolaska vozila na lokaciji na kojoj je $r=6$ m. Na slici su prikazane mape dobijene izračunavanjem sa različitom ugaonom rezolucijom: minimalni pomeraj s kojim je vršen proračun je 0.5º (slika gore levo), maksimalni pomeraj je 5º (slika dole desno). Na osnovu prikazanih mapa generišu se ugaone raspodele za različite ugaone rezolucije. Prikazane su mape u opsegu 1/3 oktave oko 1 kHz. Na Slici 5.7 prikazana je ugaona raspodela incidentne energije u formi kumulativne krive i gustine verovatnoće za opseg 1/3 oktave oko 1 kHz.



Slika 5.6 Prikaz zvučne mape izračunate za događaj prolaska automobila, sa različitim ugaonim rezolucijama (0.5º, 1º, 2º, 3º i 5º) na lokaciji sa r=6 m.



Slika 5.7 Ugaona raspodela incidentne energije na frekvenciji 1 kHz: levo – kumulativna kriva, desno – pdf. [84]

Posmatrajući zvučne mape na Slici 5.6 može se uočiti da je forma raspodele incidentne energije po uglovima održana na svim ugaonim rezolucijama. Do većih odstupanja dolazi tek kada se ugaona rezolucija poveća na 5º. Ovaj rezultat se uočava i u sledećem koraku, odnosno gustini verovatnoće prikazanoj na Slici 5.7. Na obe slike uočava se sličnost krivi za sve ugaone rezolucije od 0.5º do 3º i veće odstupanje nastaje tek kada se rezolucija poveća na ugaoni pomeraj od 5º po azimutu i elevaciji. Iz prikazanih rezultata, u zavisnosti od postavljenog kriterijuma, mogao bi se doneti zaključak kako se za prikazani slučaj ugaona rezolucija može povećati na 3º bez većih odstupanja izračunatih gustina verovatnoća. Kako bi se sagledao značaj ovih odstupanja, ona se moraju posmatrati u kontekstu proračunate zvučne izolacije fasadnih pregrada, što je sprovedeno opširnijom analizom koja je prikazana u narednom poglavlju.

Iz prikazanih činjenica definisane su hipoteze koje su eksperimentalno ispitane i komentarisane u sledećem poglavlju:

- da se na lokacijama sa većom udaljenošću ravni skeniranja od mikrofonskog niza povećava minimalni potrebni ugaoni pomeraj sa kojim se izračunava raspodela incidentne energije po uglovima, i
- da se prilikom analize u nižim frekvencijskim opsezima povećava minimalni potrebni ugaoni pomeraj sa kojim se izračunava raspodela incidentne energije po uglovima.

5.2.1. Eksperimentalna analiza mogućnosti optimizacije ugaone rezolucije u prostorno-vremenskoj obradi signala

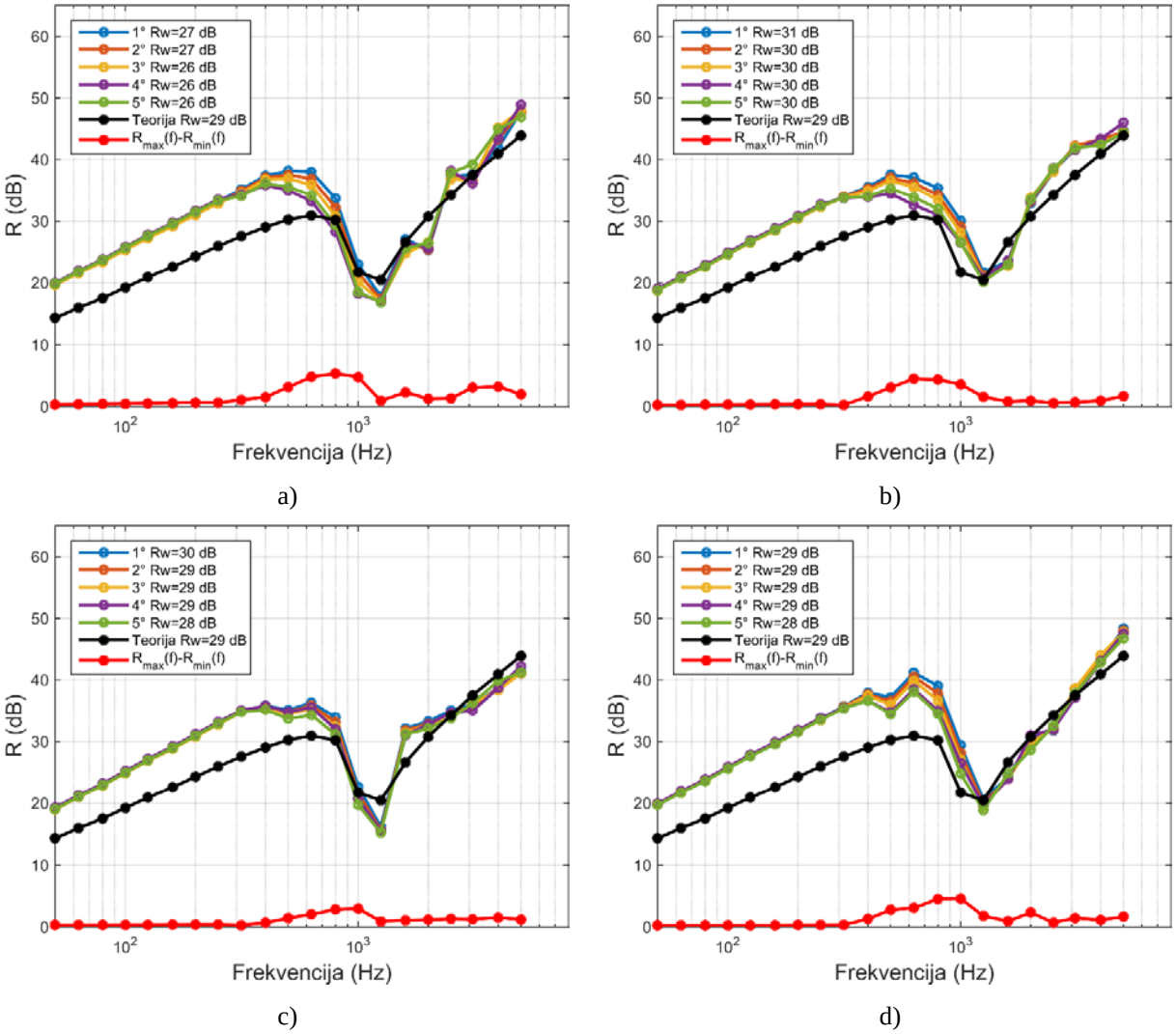
U ovoj tezi uvedena je pretpostavka da je moguće izvesno povećanje prostorne rezolucije u algoritmu za prostorno-vremensku obradu signala bez posledica po tačnost traženih rezultata. Da bi se to potvrdilo izvršena je eksperimentalna provera na uzorku od četiri lokacije na kojim je izvršeno snimanje mikrofonskim nizom na fasadama zgrada. To su: Molerova ulica (MO), ulica Cara Nikolaja (CN), Bulevar Kralja Aleksandra (BL), i ulica Ilije Garašanina (IG). Sve četiri merne lokacije pripadaju različitim mikro konfiguracijama urbanih zona. Ulice Cara Nikolaja i Molerova su relativno uske, sa međusobno sličnom udaljenošću ravni skeniranja od fasade objekta. Molerova ulica je tipičan slučaj takozvane „kanjon ulice“, dok ulica Cara Nikolaja u zoni merne lokacije nema zgrada na suprotnoj strani u odnosu na fasadu na kojoj je postavljen mikrofonski niz. Lokacija Bulevar Kralja Aleksandra spada u kategoriju izrazito širokih ulica, dok lokacija Ilije Garašanina poseduje specifičnost grupisanja izvora na velikoj visini sa suprotne strane od fasade gde se nalazio mikrofonski niz (Tašmajdanski park). Analizirane lokacije nalaze se u Prilogu 1. Za svaku od njih prikazana je mapa grada sa označenim njihovim položajem, fotografije lokacije i skica sa naznačenim relevantnim dimenzijama.

Za sve navedene lokacije izvršena je obrada signala iz mikrofonskog niza sa pet različitih vrednosti ugaone rezolucije dθ (1º, 2º, 3º, 4º i 5º). Prikaz dobijenih ugaonih raspodela incidentne energije predstavljen je u Prilogu 2. Na osnovu gustina verovatnoća ugaone raspodele izvršeni su proračuni izolacionih moći za četiri tipa monolitnih pregrada: beton debljine 16 cm, staklo debljine 6 mm, staklo debljine 12 mm, staklo debljine 24 mm. U tabeli 5.1 prikazane su fizičke karakteristike materijala s kojim se ulazi u proračun izolacione moći.

Tabela 5.1 Vrednosti fizičkih parametara za različite materijalizacije pregrada [85]

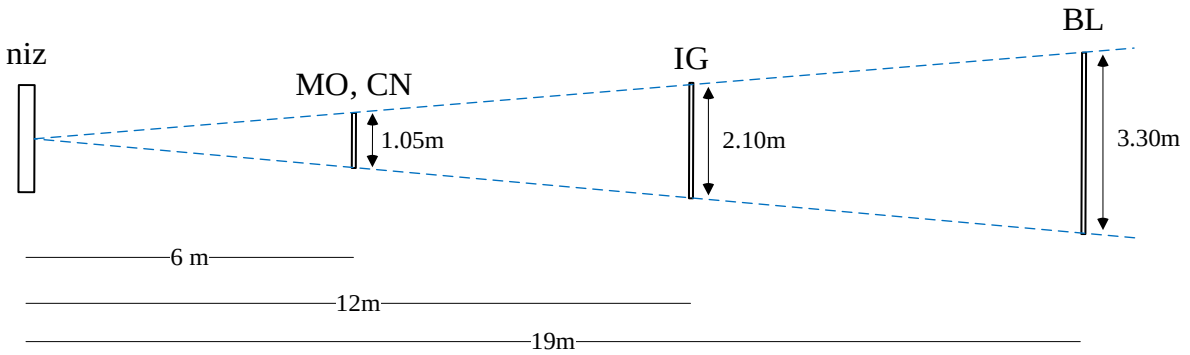
	Beton 16 cm	Staklo 6 mm	Staklo 12 mm	Staklo 24 mm
Debljina pregrade (m)	0.16	0.006	0.012	0.024
Gustina (kg/m^3)	2500	2500	2500	2500
Brzina propagacije longitudinalnih talasa (m/s)	3400	4900	4900	4900
Faktor internih gubitaka (-)	0.006	0.006	0.006	0.006

U nastavku su prikazani dijagrami proračunate izolacione moći i odgovarajuće jednobrojne vrednosti za dve karakteristične pregrade: staklo 12 mm i beton 16 cm. Kompletni rezultati za sve četiri merne lokacije i sva četiri tipa pregrada prikazani su u Prilogu 3.



Slika 5.8 Proračunate vrednosti izolacione moći staklene pregrade debljine 12 mm sa različitim prostornim rezolucijama prostorno-vremenske obrade signala: a) Molerova, b) Cara Nikolaja, c) Bulevar kralja Aleksandra, d) Ilije Garašanina.

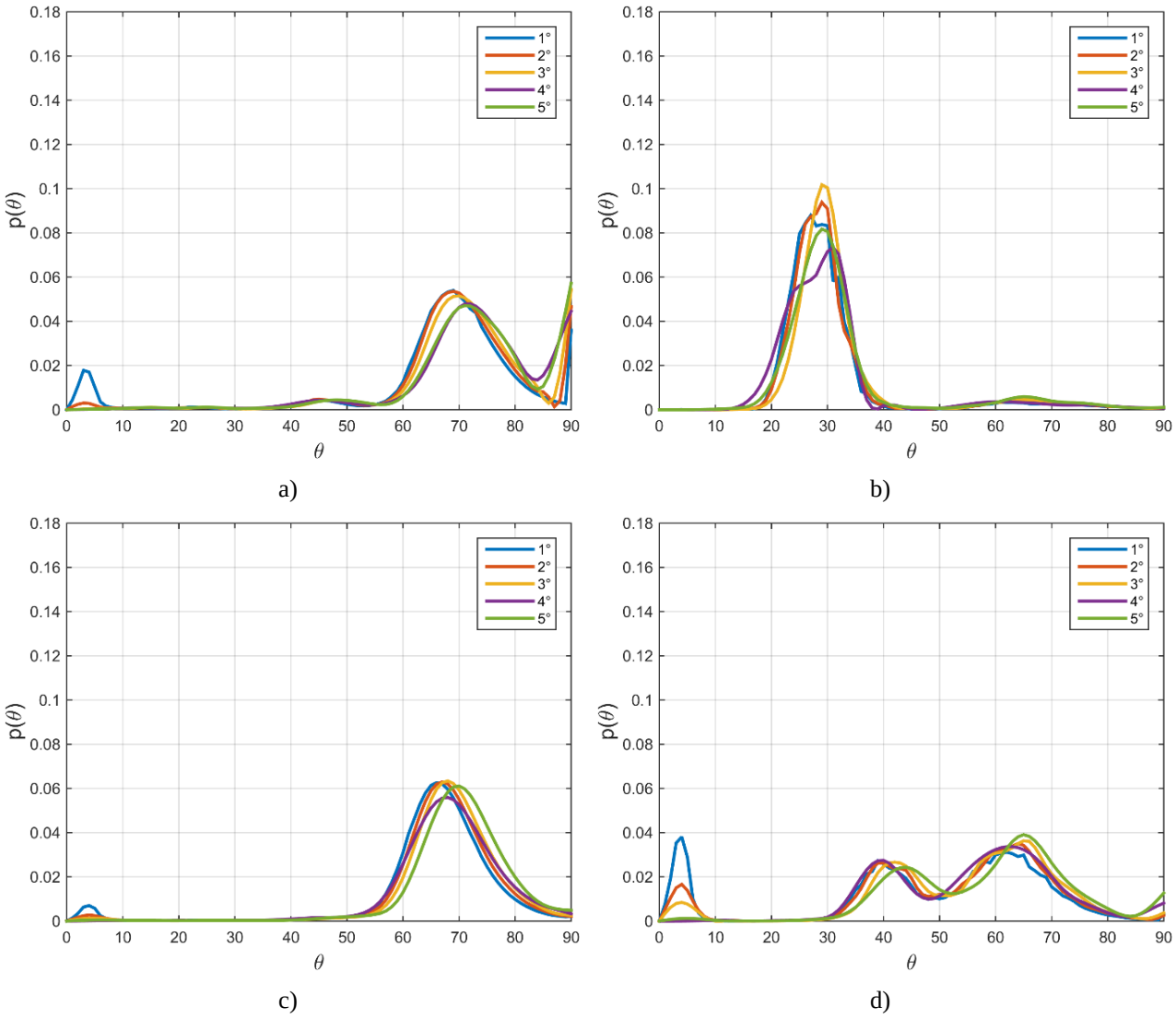
Na Slici 5.8 prikazana je proračunata izolaciona moć staklene pregrade debljine 12 mm za sve četiri navedene lokacije. Vrednosti su predstavljene po opsezima 1/3 oktave. Proračunate odgovarajuće jednobrojne vrednosti date su u legendama dijagrama. Na svakom dijagramu je radi poređenja prikazana i izračunata vrednost izolacione moći za teorijsku raspodelu $sin(\theta)$. Najveće razlike između vrednosti proračunatih izolacionih moći za različite vrednosti prostorne rezolucije uočavaju se u opsegu između 400 Hz i 1 kHz. Frekvencijski opseg u okviru kog se razlike javljaju su konzistentne na svim mernim lokacijama. Takođe, konzistentan je i trend opadanja vrednosti izolacione moći sa povećavanjem rezolucije u ovom opsegu. Ovo se objašnjava činjenicom da se povećavanjem rezolucije zapravo vrši grublje prostorno uzorkovanje zvučnog polja. Ovo ima za posledicu zaobljavanje krivih gustina raspodele, odnosno njihovu težnju ka gustini raspodele koja postoji u difuznom polju. To znači da će proračunate izolacione moći težiti teorijskoj vrednosti u ovom opsegu frekvencija. Relativne promene vrednosti izolacione moći izračunate na osnovu različitih rezolucija raspodele incidentne energije po uglovima razlikuju se na četiri analizirane lokacije. Na graficima su gabariti ovih promena predstavljeni crvenom linijom. Razlike u pojedinačnim opsezima 1/3 oktave najveće su na lokacijama Cara Nikolaja i Molerovoj, do 5 dB, a najmanje su na lokaciji Bulevar Kralja Aleksandra, do 2 dB.



Slika 5.9 Širina glavnog loba (-3 dB) na frekvenciji 1000 Hz u preseku sa ravnima skeniranja za četiri lokacije: Molerova (MO), Cara Nikolaja (CN), Bulevar kralja Aleksandra (BL), i Ilije Garašanina (IG).

Veća varijabilnost za lokacije Cara Nikolaja i Molerova u odnosu na Bulevar i Ilije Garašanina je direktno uslovljena udaljenošću ravni skeniranja od mikrofonskog niza, koja iznosi 6 metara za lokacije Cara Nikolaja i Molerovu ulica, 12 metara za lokaciju Ilije Garašanina, i 19 metara za lokaciju Bulevar kralja Aleksandra.

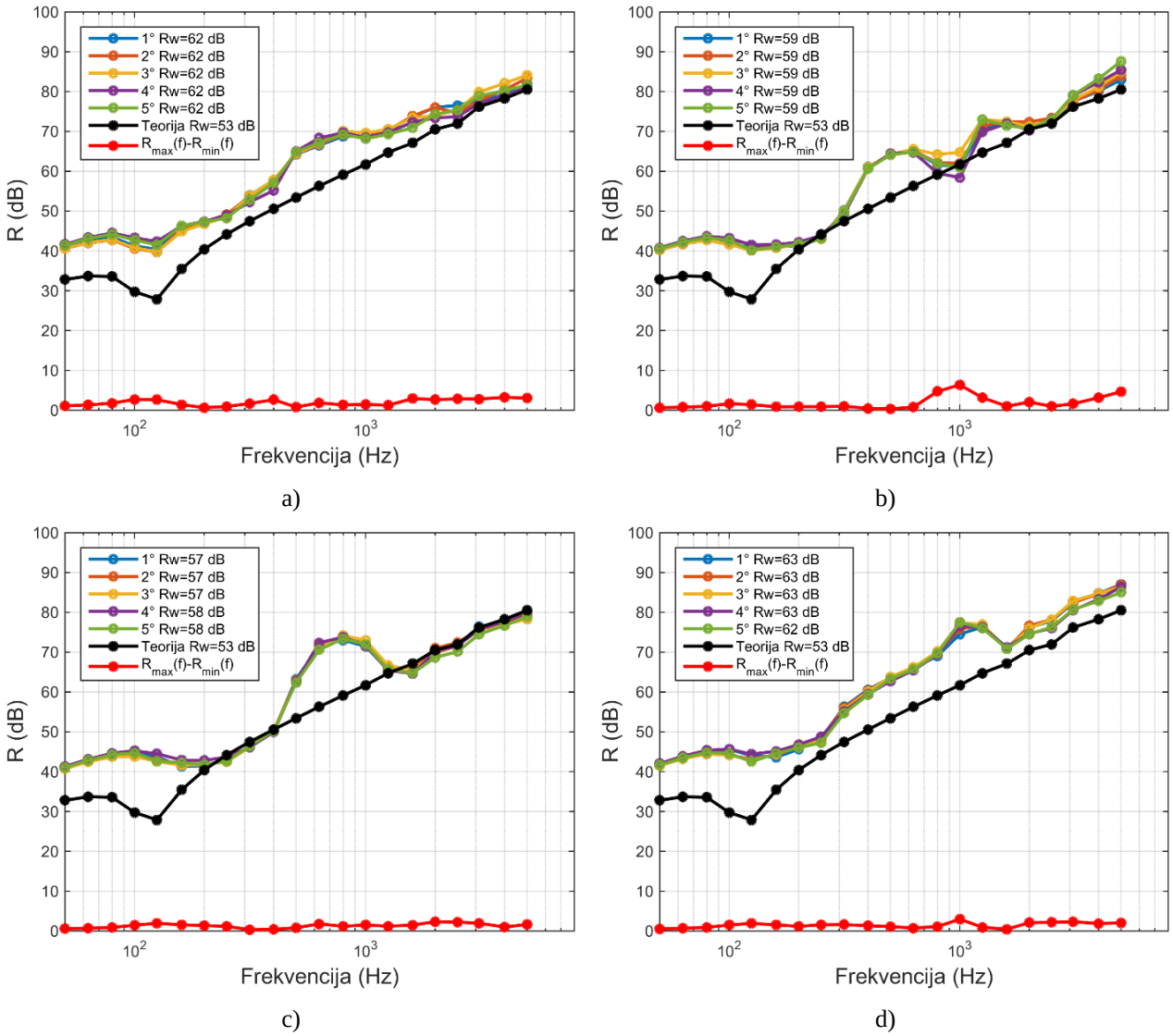
Pri zadatoj frekvenciji, širina glavnog loba iseca veću površinu u ravni skeniranja koja je na većoj udaljenosti. Na Slici 5.9 skiciran je presek ugla koji predstavlja glavni lob dijagrama usmerenosti mikrofonskog niza i ravni skeniranja na četiri lokacije od interesa. Prikazan je glavni lob na frekvenciji od 1000 Hz. Sa slike se može očitati da je kružna površina skeniranja za zadati pravac skeniranja: 0.86 m^2 za lokacije Molerova i Cara Nikolaja, zatim 3.8 m^2 na lokaciji Ilije Garašanina, i 8.6 m^2 za najdalju lokaciju – Bulevar. Ovim redosledom su poređane i relativne razlike između proračunatih izolacionih moći za različite ugaone rezolucije: najveća varijabilnost rezultata postoji kod lokacija MO i CN, zatim je manja za lokaciju IG, i najmanja za lokaciju BL. Uzrok ove pojave je činjenica da na velikim udaljenostima ravni skeniranja, glavni lob je veći i vrši dobro usrednjavanje pristigle zvučne energije po pravcima. Doprinos ovom usrednjavanju prilikom malih pomeraja prostornog ugla je neznatan, pa povećavanje rezolucije takođe nema veliki uticaj na krajnji rezultat.



Slika 5.10 Gustine verovatnoće raspodele u frekvencijskom opsegu 1/3 oktave oko centralne frekvencije 1000 Hz, izračunate za pet rezolucija obrade signala na četiri lokacije: Molerova (MO), Cara Nikolaja (CN), Bulevar kralja Aleksandra (BL) i Ilije Garašanina (IG).

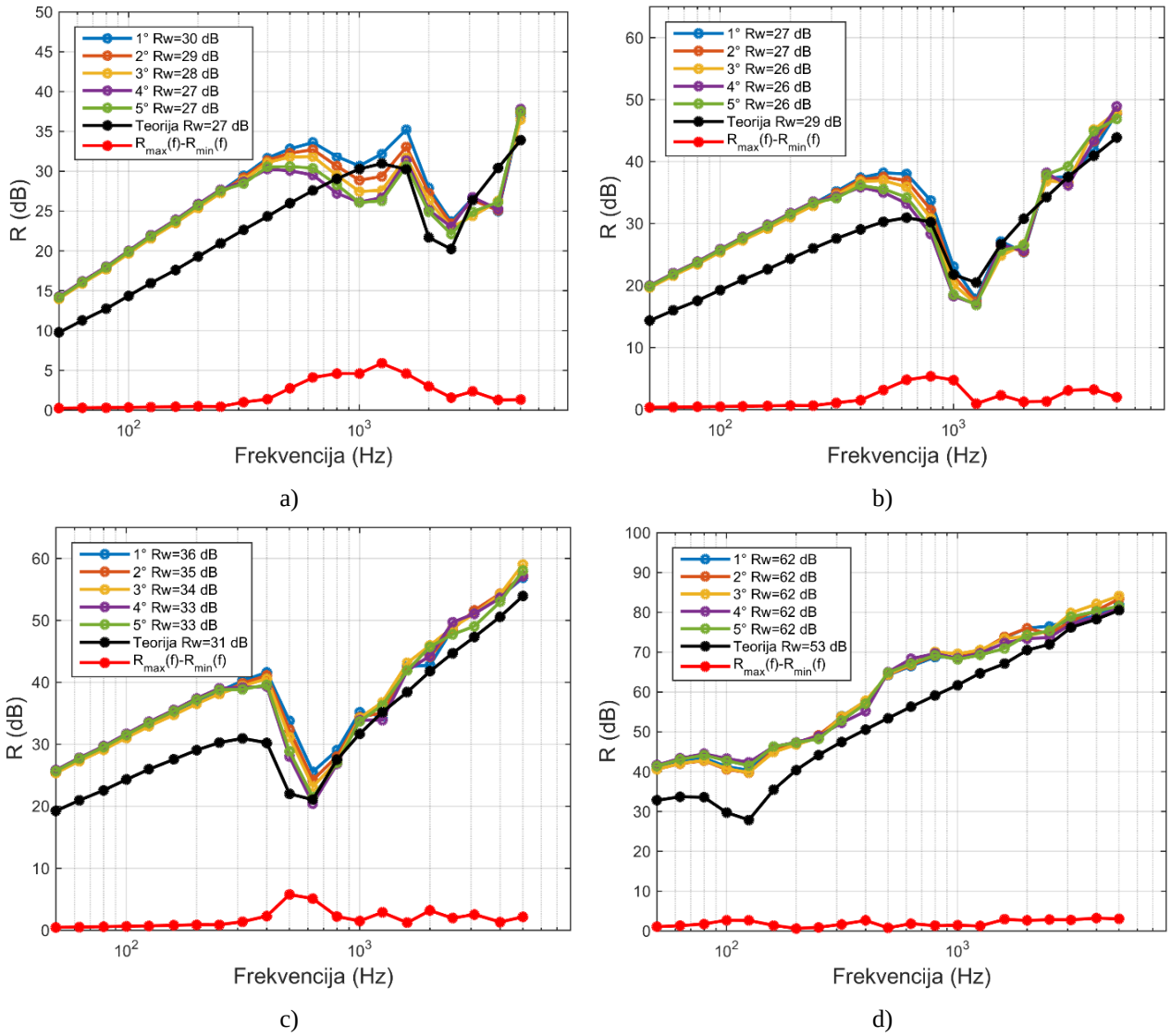
Na Slici 5.10. prikazane su gustine verovatnoće u opsegu 1/3 oktave oko 1000 Hz proračunate sa različitim ugaonim rezolucijama. Grafik ilustruje različitu strukturu zvučnog polja koje napada fasadu na ove četiri lokacije. Na lokaciji Molerova, energija je skoncentrisana oko relativno velikog prostornog ugla oko 70º, sa još jednim dodatnim maksimumom na najvišim prostornim uglovima (90º), dok je kod Cara Nikolaja energija pretežno skoncentrisana oko prostornog ugla 25º. Energija na lokaciji Bulevar je uglavnom skoncentrisana oko prostornog ugla 70º. Raspodela energije na lokaciji Ilije Garašanina se može okarakterisati kao višemodalna, sa tri izražena maksimuma. Sa prikazanih grafika se može videti da se povećavanjem rezolucije zadržava generalni oblik krivi gustina raspodele, ali se u svim zonama maksimuma dešava širenje krive, odnosno povećanje varijanse.

Na Slici 5.11. prikazan je uticaj varijacije ugaone rezolucije na proračunatu izolacionu moć monolitne betonske pregrade debljine 16 cm. Sa grafika se može uočiti da su za ovakav tip pregrade međusobna odstupanja krivih za različite vrednosti ugaone raspodele praktično zanemarljiva.



Slika 5.11 Proračunate vrednosti izolacione moći betonske pregrade debljine 16 cm sa različitim prostornim rezolucijama prostorno-vremenske obrade signala: a) Molerova, b) Cara Nikolaja, c) Bulevar kralja Aleksandra, d) Ilije Garašanina.

Rezultati prikazani na Slikama 5.10 i 5.11 svedoče o činjenici da će varijacija ugaone rezolucije na istoj lokaciji, ali za različite vrste fasadnih pregrada, proizvesti različita odstupanja. Prema tome, od značaja je i razmatranje uticaja koji povećavanje prostorne rezolucije u obradi signala ima na eksperimentalne rezultate kada se posmatra na jednoj lokaciji, ali za različite tipove pregrada, to jest za njihove različite strukture. U nastavku su prikazani rezultati dobijeni na istoj lokaciji za četiri monolitne pregrade: staklo 6 mm, staklo 12 mm, staklo 24 mm i beton 16 cm. Dijagrami sa izračunatim vrednostima za lokaciju u Molerovoj ulici prikazani su na slici 5.12. I ovde je na svakom dijagramu radi poređenja prikazana i izračunata vrednost izolacione moći za teorijsku raspodelu $sin(\theta)$. Rezultati za sve četiri merne lokacije prikazani su u Prilogu 2.



Slika 5.12 Proračunate vrednosti izolacione moći za četiri tipa pregrade na lokaciji Molerova ulica (MO): a) staklo 6 mm, b) staklo 12 mm, c) staklo 24 mm, d) beton 16 cm.

Na Slici 5.12 se može uočiti da je uticaj istih setova eksperimentalno dobijenih gustina raspodela incidentne energije na proračunate izolacione moći pregrada različit za različite tipove pregrada. Izolacione moći prikazane na sve četiri slike dobijene su za iste setove eksperimentalno dobijenih gustina raspodela sa varijacijom rezolucije od 1º do 5º. Uticaj ove varijacije je različit za sva četiri tipa pregrade. Prilikom promene rezolucije, odstupanje je najveće za staklo debljine 6 mm, i u pogledu najveće vrednosti odstupanja (6 dB na 1250 Hz), i u pogledu širine frekvencijskog opsega u kom dolazi do odstupanja (od 315 Hz do 5 kHz). Za pregrade od stakla 12 mm i 24 mm frekvencijski opseg u okviru kog dolazi do značajnijih odstupanja je znatno uži. Uticaj promene rezolucije na proračunate vrednosti izolacione moći u slučaju betonske pregrade je relativno najmanji u odnosu na druge tipove pregrada.

Da bi se objasnila ova pojava, mora se poći od definicije izolacione moći:

$$R = -10\,log\left(\tau\right), \tag{5.1}$$

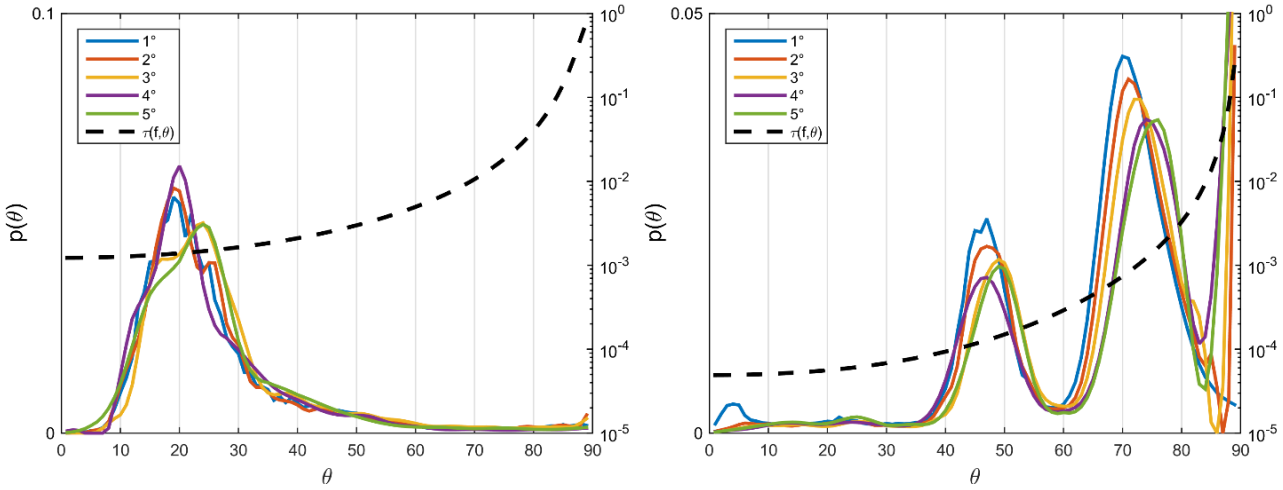
gde je τ, koeficijent transmisije. Koeficijent transmisije zavisi od fizičkih karakteristika materijala (debljine, gustine, faktora unutrašnjih gubitaka i sl.), frekvencije i ugla incidencije talasa koji pogađa pregradu. Za potrebe u ovoj diskusiji, izraz za izračunavanje koeficijenta transmisije u funkciji frekvencije može se uprošćeno posmatrati na sledeći način:

$$\tau(f)=\sum_{\theta=0}^{\pi/2}\tau(f,\theta,\eta,m',f_c)\cdot p(f,\theta), \qquad 5.2$$

gde je f frekvencija, θ incidentni ugao, faktor unutrašnjih gubitaka η, m' površinska masa, f_c frekvencija koincidencije, $p(f,\theta)$ gustina verovatnoće raspodele incidentne energije. Može se smatrati da je $\tau(f,\theta,\eta,m',f_c)$ koeficijent transmisije koji ne zavisi od raspodele incidentne energije, već od zadatih karakteristika materijala, incidentnog ugla i frekvencije. U nastavku će se ovaj koeficijent uprošćeno označavati kao $\tau(f,\theta)$:

$$\tau(f,\theta)=\tau(f,\theta,\eta,m',f_c). \qquad 5.3$$

Kako bi se protumačio uzrok varijacija u proračunatim izolacionim moćima u zavisnosti od varijacije rezolucije, uočavaju se dva karakteristična opsega 1/3 oktave na grafiku sa Slike 5.12 a): opseg 1250 Hz gde je varijacija maksimalna i iznosi 6 dB, i opseg 250 Hz na kom je varijacija praktično zanemarljiva. Tumačenje ovog rezultata se može dobiti istovremenim posmatranjem varijabilnosti oba faktora koji sačinjavaju koeficijent transmisije u zadatim opsezima 1/3 oktave (faktori $\tau(f,\theta)$, i $p(f,\theta)$).

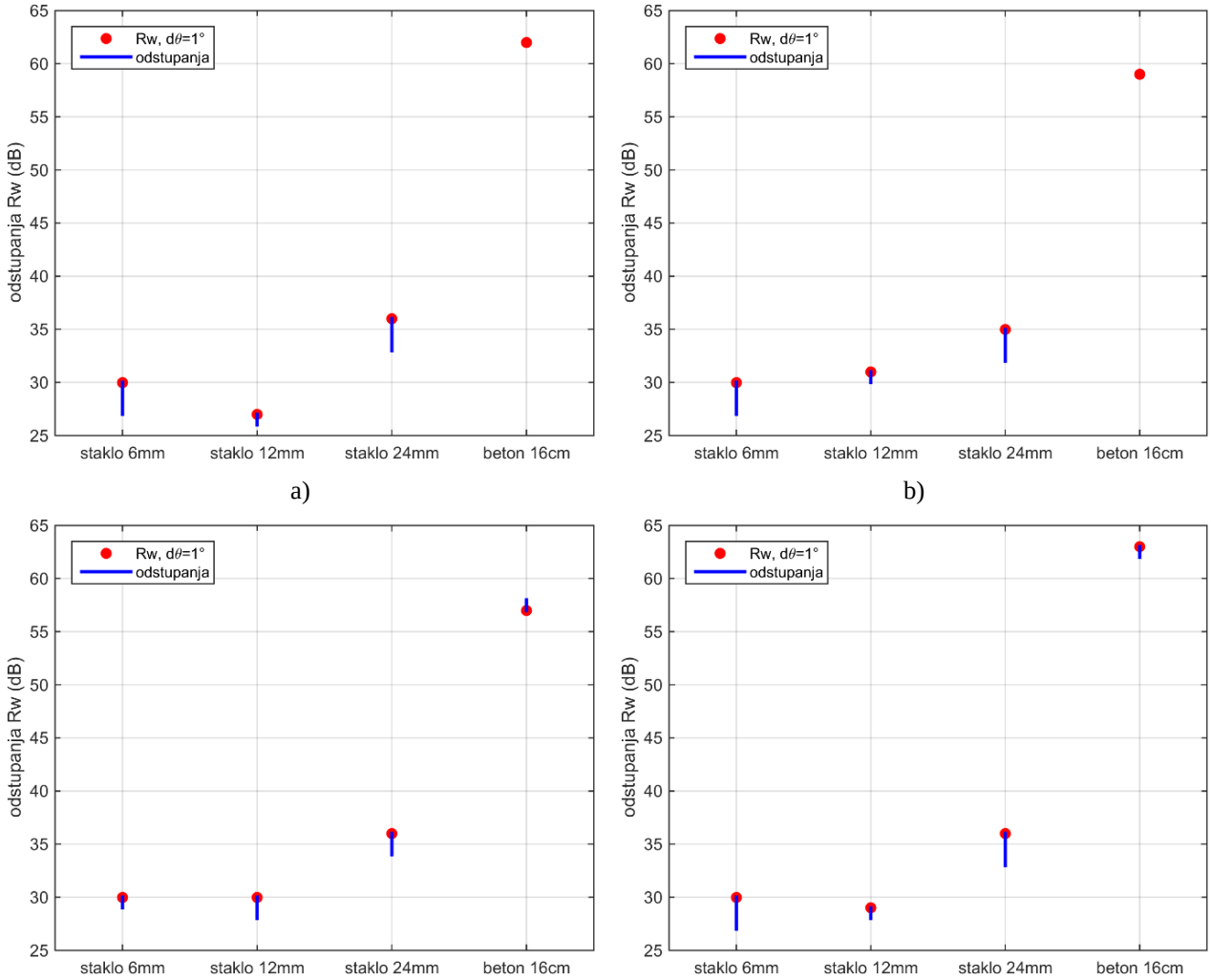


Slika 5.13 Izmerene gustine verovatnoće p(f,θ) na lokaciji Molerova i odgovarajući koeficijent transmisije $\tau(f,\theta)$, na frekvencijama: a) 250 Hz, i b) 1250 Hz.

Na Slici 5.13 a) se može uočiti da u slučaju opsega 1/3 oktave na 250 Hz maksimumi izmerenih gustina verovatnoće se nalaze u opsegu uglova gde je gradijent koeficijenta $\tau(f,\theta)$ mali. Ova činjenica ima za posledicu da promene u gustini verovatnoće koje nastaju povećanjem rezolucije izračunavanja nemaju veliki uticaj na proračunatu vrednost izolacione moći. Nasuprot tome, u slučaju opsega 1/3 oktave na 1250 Hz, maksimalne vrednosti izmerenih gustina verovatnoće se nalaze u opsegu uglova gde je gradijent faktora $\tau(f,\theta)$ najveći, što znači da relativno male promene u izmerenoj gustini prilikom povećanja rezolucije prouzrokuju velike varijacije u proračunatoj vrednosti izolacione moći. Jedan od zaključaka ove analize jeste da je uticaj promene rezolucije prostorne-vremenske obrade signala na proračunate vrednosti izolacione moći zavisan i od lokacije u kojoj se vrši merenje i od tipa pregrade čija se izolaciona moć proračunava.

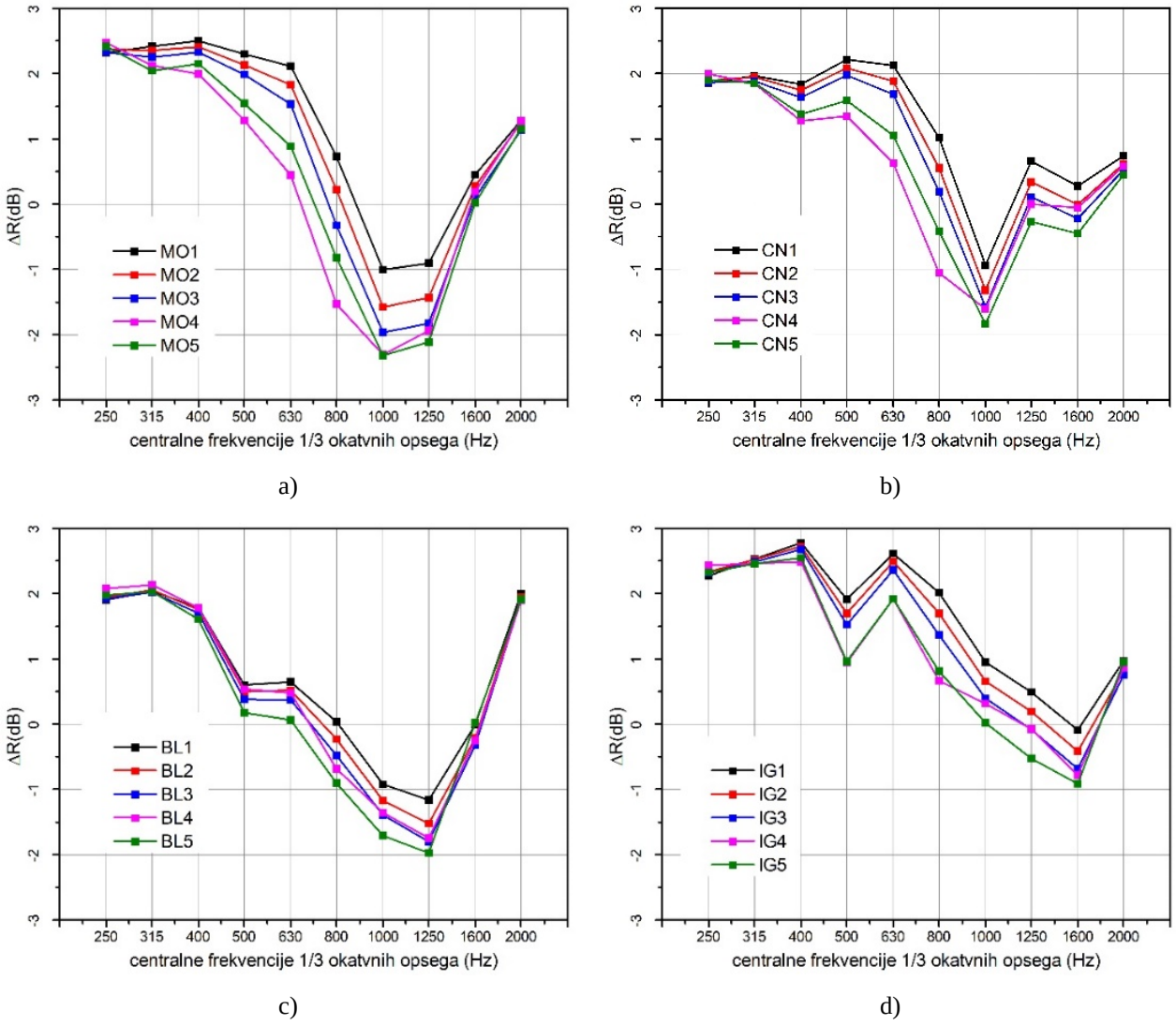
Na Slici 5.14. prikazana su odstupanja jednobrojnih vrednosti izolacionih moći za četiri tipa pregrade na svakoj od lokacija. Na svim lokacijama, najmanja odstupanja su za betonsku pregradu debljine 16 cm, i staklenu pregradu debljine 12 mm, i ulaze u ±(1.5) dB što je zanemarljivo odstupanje. Na svim lokacijama, veće varijabilnosti ±(2-3) dB se ispoljavaju za monolitne staklene pregrade debljina 6 mm i 24 mm. Razlog za ovo je veliki gradijent koeficijenta transmisije koji za ova dva tipa pregrade

koincidira u istom opsegu uglova sa lokacijama maksimalne promene gustine verovatnoće raspodele izračunate za različite ugaone rezolucije.

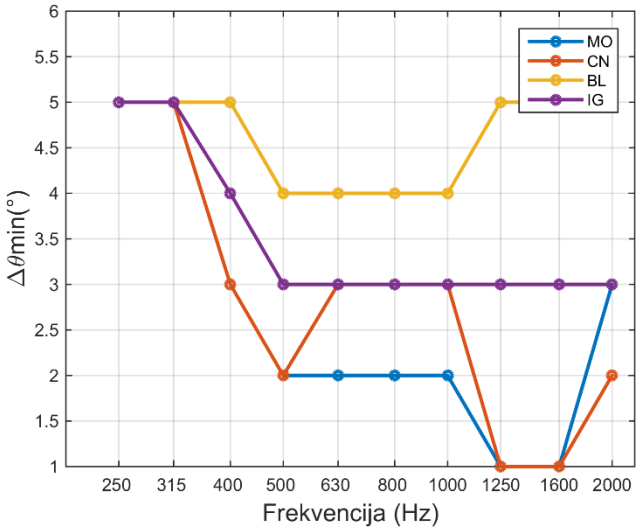


Slika 5.14 Maksimalna odstupanja jednobrojnih vrednosti proračunatih izolacionih moći prilikom povećanja prostorne rezolucije za četiri tipa pregrade na četiri merne lokacije: a) MO, b) CN, c) BL, d) IG.

Od interesa je razmotriti i efekat promene rezolucije na vrednosti korekcionih faktora za korigovanje laboratorijskih vrednosti zvučne izolacije, predloženih u poglavlju 4. Na Slici 5.15 prikazana je promena vrednosti korekcionih faktora po frekvencijama, za četiri merne lokacije. Može se uočiti da se oblik krive održava povećanjem rezolucije, i da se vrednosti korekcionih faktora smanjuju. Kako bi se izveo zaključak o minimalnom potrebnom ugaonom pomeraju, koji se odnosi na date tipove lokacija, postavljen je kriterijum promene krajnjih rezultata u odnosu na rezultate dobijene sa rezolucijom 1º. Prikazana analiza je pokazala da je uticaj promene rezolucije različit u različitim frekvencijskim opsezima. Ovaj zaključak nameće pristup povećanju vremenske efikasnosti primenom različitih rezolucija u različitim frekvencijskim opsezima. U nastavku su data dva tumačenja promene izlaznih rezultata: u prvom je kriterijum postavljen u odnosu na promenu frekvencijski zavisne izolacione moći $R(f)$, a u drugom u odnosu na procentualnu promenu korekcionih faktora, prikazanu na slici 5.15.



Slika 5.15 Promena frekvencijski zavisnih vrednosti korekcionih faktora za korigovanje laboratorijskih vrednosti izolacionih moći pregrada pri promeni ugaone rezolucije za četiri merne lokacije: a) MO, b) CN, c) BL, d) IG.



Slika 5.16 Minimalni potrebni ugaoni pomeraj proračunat prema kriterijumu $R_{rez}(f)$-$R_1(f)$<2 dB za četiri merne lokacije.

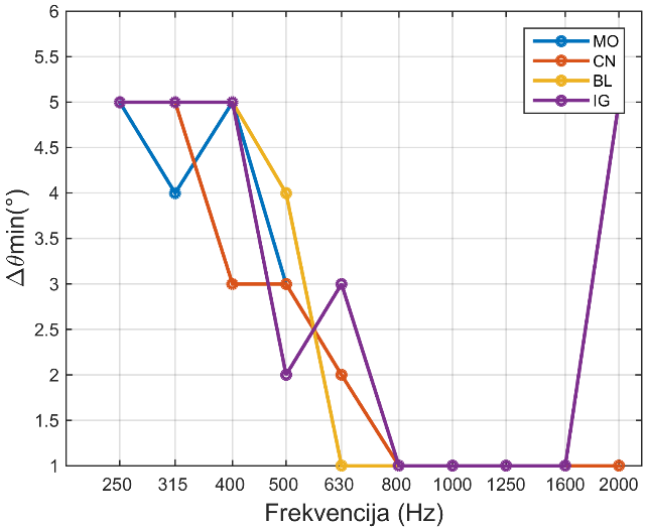
Na Slici 5.16 prikazane su vrednosti minimalnog potrebnog ugaonog pomeraja određene na osnovu kriterijuma da se vrednost proračunate izolacione moći ni u jednom frekvencijskom opsegu ne sme promeniti više od 2 dB u odnosu na vrednost proračunatu na osnovu gustina raspodela sa rezolucijom 1º. Predloženi kriterijum se može opisati izrazom 5.4.:

$$R_{rez}(f) - R_1(f) < 2\ dB, \quad \forall\ f \mid 250\ Hz < f < 2\ kHz, . \tag{5.4.}$$

gde je f posmatrani frekvencijski opseg, R_1 izolaciona moć proračunata sa rezolucijom 1º, a R_{rez} vrednost proračunata sa povećanom rezolucijom. Vrši se povećanje prostorne rezolucije, uz ograničenje zadato izrazom 5.4., dok se ne dođe do vrednosti prostorne rezolucije za koju ograničenje više nije zadovoljeno. Kao što analiza prikazana u ovom poglavlju pokazuje, uticaj promene prostorne rezolucije je različit za različite tipove pregrada i zavisi od odnosa između koeficijenta transmisije monolitnih pregrada i izmerene gustine verovatnoće na zadatoj lokaciji. Iz tog razloga, kriterijum opisan izrazom 5.4., je zadat tako da bude zadovoljen za sve tipove pregrada na datoj lokaciji.

Na Slici 5.17 prikazane su vrednosti minimalnog potrebnog ugaonog pomeraja proračunate na osnovu kriterijuma promene korekcionih faktora ΔR(f). Predloženi kriterijum se može opisati izrazom 5.5:

$$\left(\Delta R_{rez}(f) - \Delta R_1(f)\right) / \left(\Delta R_1(f)\right) < 15\%, \quad \forall\ f \mid 250\ Hz < f < 2\ kHz\ . \tag{5.5.}$$



Slika 5.17 Minimalni potrebni ugaoni pomeraj proračunat prema kriterijumu $\Delta R_{rez}(f)$-$\Delta R_1(f))/\Delta R_1(f)$<15% za četiri merne lokacije

Iz rezultata prikazanih na Slikama 5.16 i 5.17 može se izvesti nekoliko generalnih zaključaka:

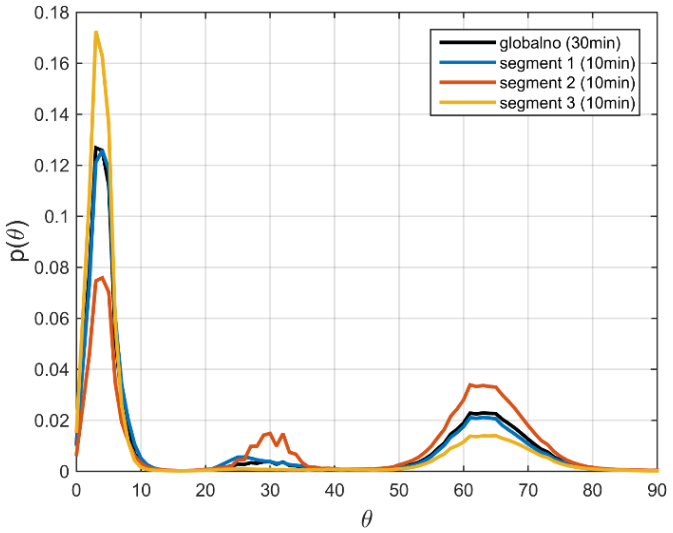
- Da je moguće, uz zadata ograničenja, izvršiti povećanje prostorne rezolucije, bez značajnijeg uticaja na krajnji rezultat procedure;
- Da je osetljivost na promenu rezolucije relativno mala u frekvencijskom opsegu do 500 Hz, u odnosu na više frekvencijske opsege;
- Da se posmatranjem oba navedena kriterijuma, dolazi do istog trenda opadanja vrednosti minimalnog potrebnog ugaonog pomeraja, posmatrano od najnižeg frekvencijskog opsega ka višim opsezima;
- Kriterijum promene vrednosti korekcionih faktora daje rigoroznije zahteve u pogledu povećavanja rezolucije.
- Da se na lokacijama sa većom udaljenošću ravni skeniranja može izvršiti povećanje prostorne rezolucije i do 5 puta u određenim frekvencijskim opsezima.

Kada se vrednosti prikazane na grafiku 5.16 primene u mernoj proceduri, ostvaruju se sledeće uštede u vremenu izvršavanja: Molerova (60%), Cara Nikolaja (63%), Bulevar kralja Aleksandra (86%), Ilije Garašanina (86%).

5.3 Eksperimentalna analiza mogućnosti optimizacije vremenskog intervala merenja

U ovom poglavlju razmotrena je mogućnost optimizacije vremenskog trajanja ulaznog signala, odnosno skraćivanja uzorka koji se obrađuje u cilju povećanja vremenske efikasnosti procedure. U radu Bjelića [80], konstatovano je da je vremenski interval od 30 minuta snimka mikrofonskim nizom na zadatoj lokaciji dovoljno dugačak da se može smatrati kao reprezentativan, odnosno da se prostorne raspodele dobijene na bazi snimka ovog trajanja mogu smatrati globalnim raspodele za datu lokaciju. Ovaj zaključak baziran je na oceni da je trajanje snimka od 30 minuta dovoljno da se zabeleže sve ključne zvučne scene koje se na jednoj lokaciji mogu pojaviti, kao i njihova relativna učestanost pojavljivanja. U ovom poglavlju prikazan je uticaj skraćivanja vremenskog intervala na tačnost konačnih rezultata obrade, gde se kao referentne vrednosti za poređenje uzimaju gustine raspodele dobijene na osnovu globalnih snimaka od 30 minuta. Ispitan je uticaj variranja vremenskog intervala obrade na sve konačne rezultate koje ovaj postupak daje: gustine verovatnoće raspodele, proračunate izolacione moći za različite pregrade, kao i merodavne vrednosti izolacionih moći.

Na Slici 5.18 prikazana je funkcija gustine raspodele izračunata na osnovu globalnog snimka od 30 minuta, i pojedinačnih segmenata od 10 minuta izdvojenih iz globalnog snimka na lokaciji Cara Nikolaja. Prikazana je funkcija gustine verovatnoće u frekvencijskom opsegu 1/3 oktave na 800 Hz. Načelni oblik sve četiri krive je sličan, sa tri izražena maksimuma na prostornim uglovima 5º, 30º i 65º. Takođe, može se uočiti poklapanje globalne krive sa krivom prvog segmenta od 10 minuta u zonama maksimuma. Ovaj rezultat se može pripisati činjenici da je kriva prvog segmenta (plava) bliska usrednjenoj vrednosti krivi proračunatih iz druga dva segmenta.

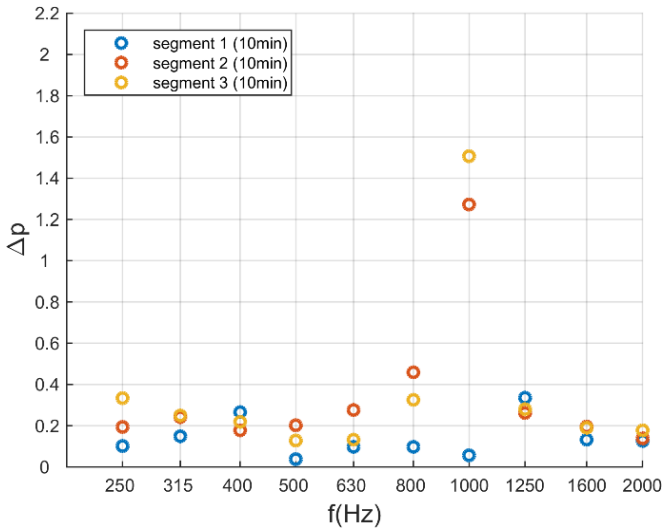


Slika 5.18 Funkcija gustine raspodele u opsegu 800 Hz, na lokaciji Cara Nikolaja pri različitim trajanjima ulaznog signala.

Iz rezultata prikazanih na Slici 5.18 može se zaključiti da prvi segment od 10 minuta dominantno određuje oblik globalne raspodele, ali i da bilo koji od tri prikazana segmenta prikazuje slične rezultate u smislu prostornih uglova sa dominantnom verovatnoćom pojavljivanja incidentne energije. Analiza je sprovedena u svim frekvencijskim opsezima od interesa, a rezultati su prikazani na Slici 5.19. Na grafiku su prikazana odstupanja rezultata dobijenih na osnovu 10-minutnih snimaka u odnosu na globalnu gustinu raspodele dobijenu na osnovu 30 minuta. Odstupanja su računata kao kumulativna suma apsolutnih vrednosti razlika gustine raspodele po prostornim uglovima za svaki frekvencijski opseg pojedinačno:

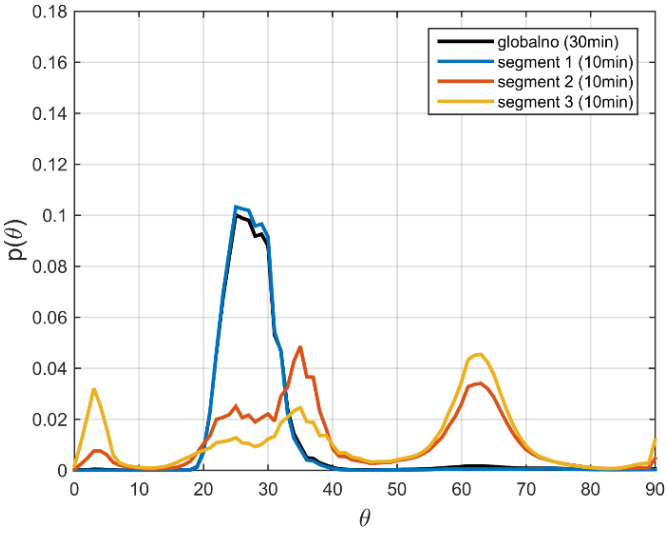
$$\Delta p(f) = \sum_{\theta=0}^{\pi/2} \left| p_{30min}(f) - p_{10min}(f) \right|, \tag{5.4}$$

gde su p_{30min} i p_{10min} raspodele dobijene na osnovu snimaka od 10 i 30 minuta, respektivno.



Slika 5.19 Kumulativne razlike gustina verovatnoća za pojedinačne 10 min segmente relativno u odnosu na globalnu raspodelu.

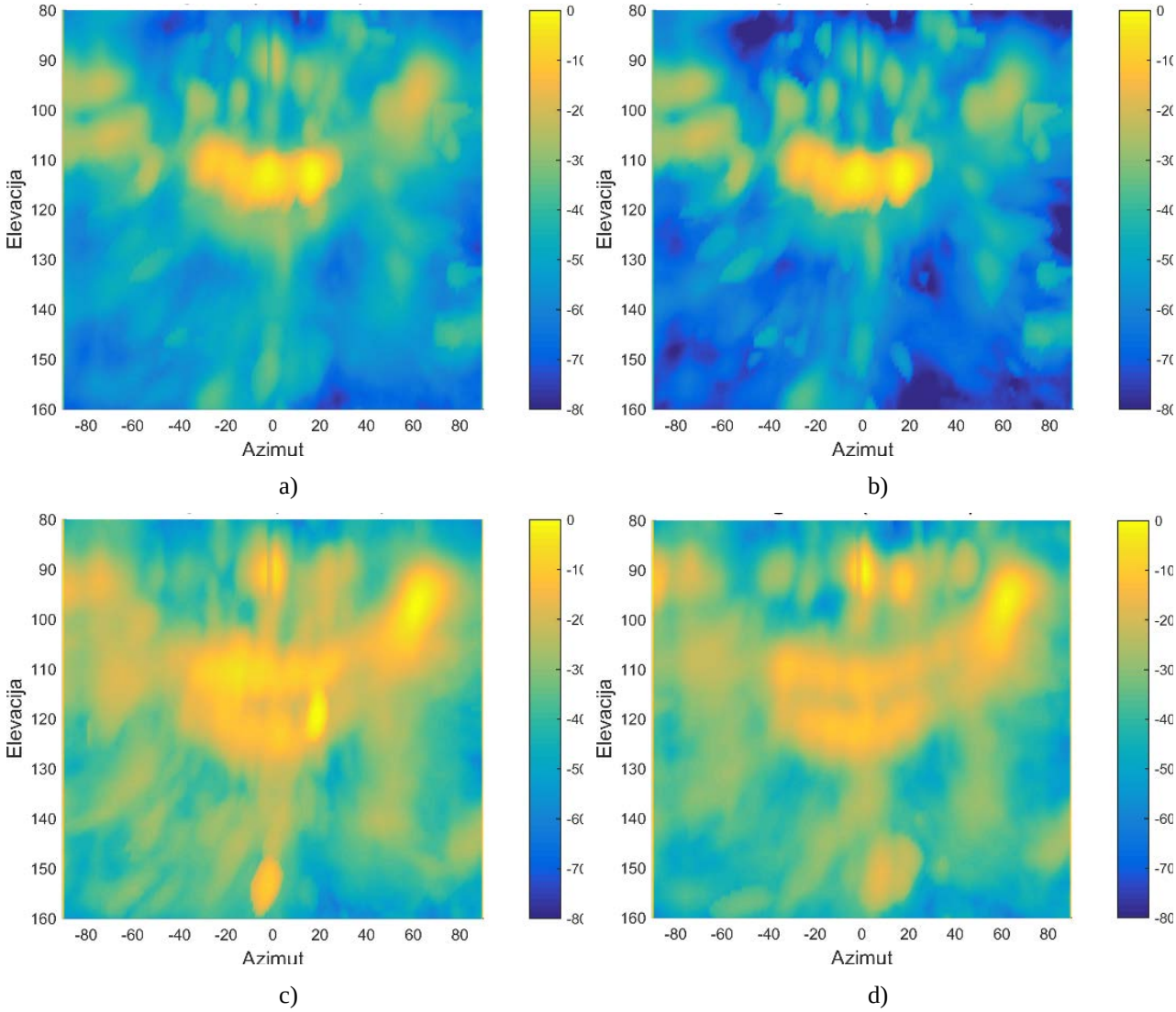
Na Slici 5.19 se može uočiti da su najmanje razlike između pojedinih segmenata u opsezima 400 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz i 2000 Hz. U navedenim opsezima, svaka pojedinačna suma razlika raspodela se nalazi na sličnoj udaljenosti od vrednosti 0 po *y*-osi, što znači da su gustine raspodele slične, i da globalna raspodela predstavlja njihovu srednju vrednost. Odnosno, u svakom od ovih opsega, rezultat dobijen na osnovu 10-minutnog snimka se može smatrati reprezentom globalne raspodele. Takođe, sa grafika se može očitati da je u većini opsega 1/3 oktave rezultat dobijen na bazi prvog segmenta snimka najbliži globalnoj raspodeli. U svakom opsegu u kom je rasturanje vrednosti razlika za različite segmente relativno malo, možemo smatrati da postoji dobro poklapanje između krivih dobijenih na bazi snimaka 10 minuta i na bazi snimka od 30 minuta. Najveća razlika se pojavljuje na frekvenciji 1000 Hz, gde postoji značajno odstupanje gustina dobijenih na bazi segmenata 2 i 3, u odnosu na globalnu raspodelu, dok je gustina raspodele dobijena na bazi segmenta 1 veoma bliska globalnoj raspodeli.



Slika 5.20 Funkcija gustine raspodele u opsegu 1000 Hz, na lokaciji Cara Nikolaja pri različitim trajanjima ulaznog signala.

Kako bi se objasnio ovaj rezultat, na Slici 5.20. prikazana je gustina raspodele za frekvencijski opseg 1/3 oktave na 1000 Hz dobijena iz 30-minutnog i 10-minutnih segmenata. Na slici se može uočiti da postoji značajna razlika između rezultata dobijenih za tri 10-minutna segmenta, odnosno da rezultat za prvi segment značajno odstupa od segmenata 2 i 3. Takođe, može se uočiti i praktično poklapanje globalne gustine verovatnoće sa gustinom dobijenom na bazi prvog 10minutnog segmenta. Ovaj rezultat pokazuje da u prvom segmentu signala postoji izvor sa izraženim sadržajem na 1000 Hz, koji

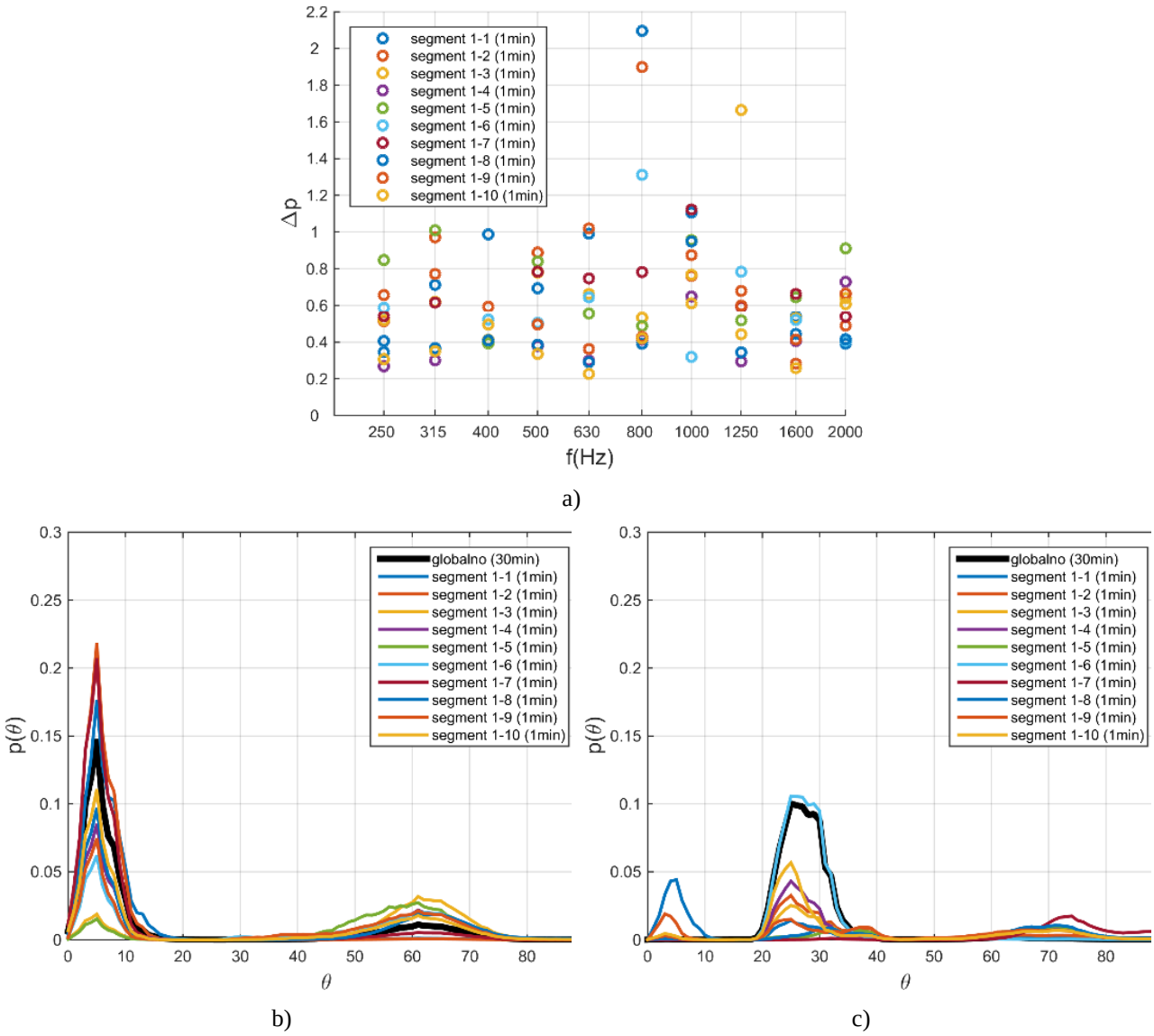
se nalazi pod prostornim uglom oko 25º. Ovaj izvor je po svom nivou dominantan u odnosu na ostatak sadržaja u okviru globalnog snimka od 30 minuta.



Slika 5.21 Mape incidentnih energija u opsegu 1000 Hz, na lokaciji Cara Nikolaja pri različitim trajanjima ulaznog signala: a) snimak 30 min, b) segment 1 (10 min), c). segment 2 (10 min), d) segment 3 (10 min).

Na Slici 5.21 prikazane su mape incidentne energije na lokaciji Cara Nikolaja, u opsegu 1000 Hz, iz kojih su proračunate krive sa prethodne slike. Na slici se može uočiti dominantni izvor na prostornom uglu oko 25º, koji odgovara zoni sa pojačanim intenzitetom oko azimuta 0º i elevacije 110º. Ovaj dominantni izvor postoji samo u prvom segmentu signala trajanja 10 minuta. Na Slici 5.21, svaka prikazana mapa je normalizovana u odnosu maksimalni izvor u datom segmentu signala. Međutim, izvor koji je prisutan u prvom segmentu po svom nivou nadmašuje značajno ostale izvore i prenosi se kao dominantan na globalnu mapu incidencije. Mape dobijene za segmente 2 i 3 prikazuju relativno sličnu strukturu incidentnog zvučnog polja, sa jasnim odvajanjem dve saobraćajne trake. Struktura dve saobraćajne trake se može primetiti i na mapi dobijenoj za segment 1 kao i na globalnoj mapi, ali je delimično maskirana prisustvom pomenutog dominantnog izvora.

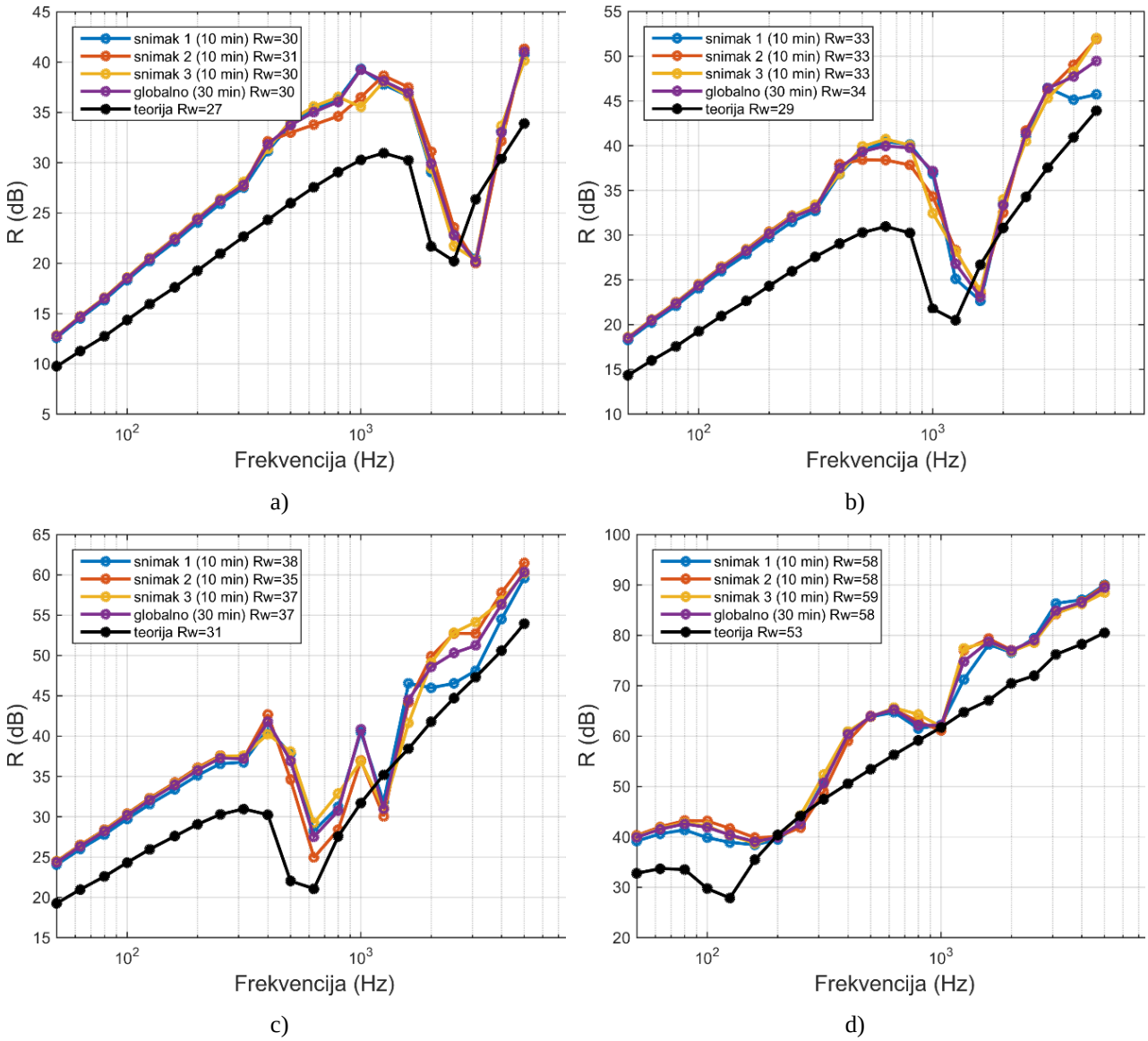
U nastavku su prikazani razlike funkcije gustina verovatnoće izračunate na osnovu intervala trajanja 1 minut koji sačinjavaju prvi segment od 10 minuta. Na slici 5.11. prikazane su kumulativne razlike, kao i krive gustine verovatnoće u opsezima 500 Hz i 1000 Hz.



Slika 5.22 Analiza snimaka trajanja 1 min: a) kumulativne razlike gustina verovatnoća relativno u odnosu na globalnu raspodelu, b) gustine raspodela u frekvencijskom opsegu 500 Hz, c) gustine raspodela u frekvencijskom opsegu 1000 Hz.

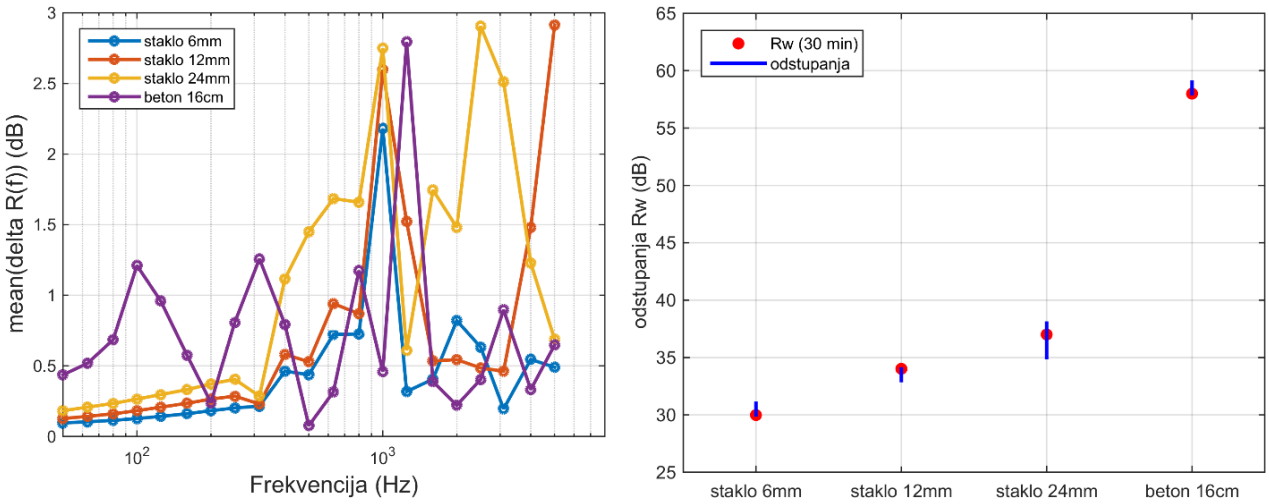
Kada se uporede grafici 5.22 a) i 5.20 zaključuje se da je varijabilnost u odnosu na globalnu raspodelu veća kod raspodela dobijenih za intervale trajanja 1 minut. Ovaj rezultat je očekivan, s obzirom da se smanjivanjem trajanja snimka obrade na 1 minut značajno smanjuje verovatnoća da će se u snimku naći svi zvučni sadržaji koji utvrđuju globalnu raspodelu na lokaciji. Na Slici 5.22 b) se može uočiti da oblici krivih za sve segmente na frekvenciji 500 Hz, prate sličan trend u smislu pozicije maksimuma gustine verovatnoće. Rezultat na Slici 5.22 c) pokazuje da je u jednom od snimaka trajanja 1 minut lociran izvor sa spektralnim sadržajem na 1000 Hz, koji dominantno određuje rezultujuću globalnu raspodelu. Preslušavanjem snimka, dolazi se do zaključka da je pomenuti izvor vozilo, autobus sa defektnim kočnicama koje proizvode jak zvuk škripanja prilikom kočenja.

Iz prikazane analize može se zaključiti da prilikom izbora trajanja snimka za određivanje merodavne gustine raspodele za datu lokaciju se mora voditi računa o tome da se sve ključne komponente koje određuju zvučni ambijent na datoj lokaciji uzmu u obzir. Takođe, prikazani primer sa dominantnim izvorom na 1000 Hz pokazuje da bi prilikom analize trebalo utvrditi algoritam predobrade kojim bi se ovakvi događaji otklonili iz opšte analize globalne gustine raspodele, a zatim tretirali kao specijalni slučajevi za zasebnom interpretacijom.



Slika 5.23 Izolacione moći proračunate za različite dužine trajanja ulaznog signala, na lokaciji Cara Nikolaja (CN), za četiri tipa pregrade: a) staklo 6 mm, b) staklo 12 mm, c) staklo 24 mm, d) beton 16 cm.

Kako bi se došlo do krajnjeg zaključka uticaja skraćivanja trajanja ulaznog signala, moraju se tumačiti razlike koje se javljaju u krajnjim rezultatima predložene procedure, odnosno proračunatoj izolacionoj moći različitih tipova pregrada. Prikazana je analiza dobijenih izolacionih moći koje su proračunate na osnovu gustina raspodela koje su izračunate iz snimaka trajanja 30 minuta, 10 minuta i 1 minut. Na Slici 5.23 prikazani su rezultati za četiri tipa pregrade: staklo 6mm, staklo 12 mm, staklo 24 mm i beton 16 cm. Najveće razlike u izolacionim moćima proračunatim za različite dužine trajanja signala su u frekvencijskom opsegu u kom je mikrofonski niz optimizovan (200 Hz do 2000 Hz). Najizraženije razlike u odnosu na globalnu raspodelu (do 3 dB) utvrđene su za staklenu pregradu debljine 24 mm. Razlog za ovo jeste gradijent parametra $\tau(f,\theta)$, čiji uticaj je opisan u poglavlju 5.2.1, i koji za ovakav tip pregrade ima maksimum u frekvencijskom opsegu (200 Hz do 2000 Hz), i čini da razlike u raspodelama izračunatim iz različitih segmenata signala imaju relativno veliki uticaj na rezultujuću krivu izolacione moći.

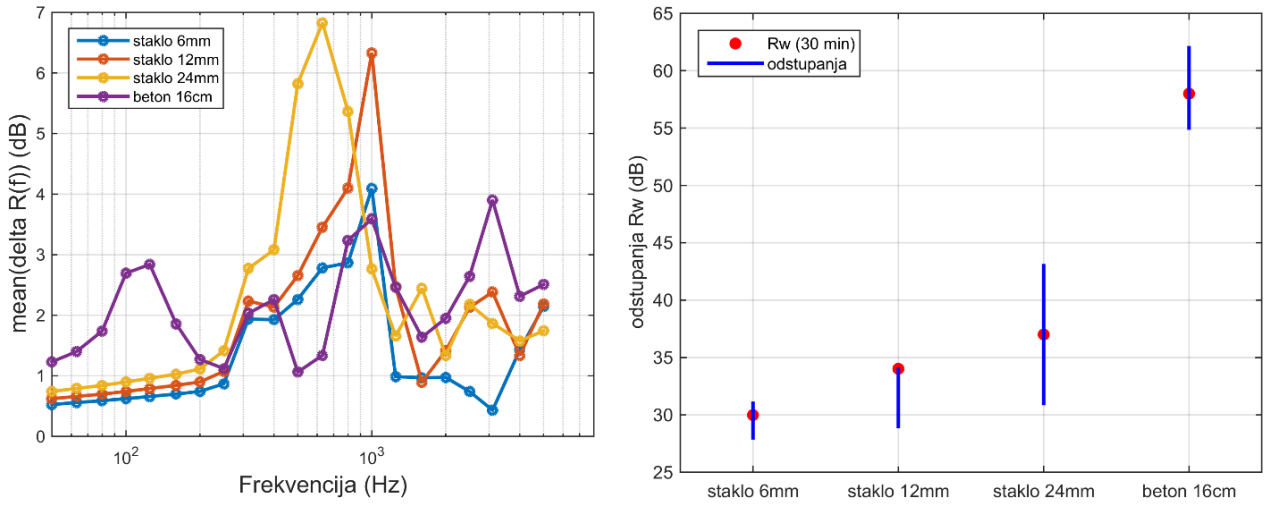


a) b)

Slika 5.24 Varijabilnost izolacione moći proračunate na bazi signala trajanja 10 min, za četiri tipa pregrade na lokaciji Cara Nikolaja (CN): a) srednja vrednost odstupanja *R(f)* od globalne krive, b) odstupanja jednobrojnih vrednosti.

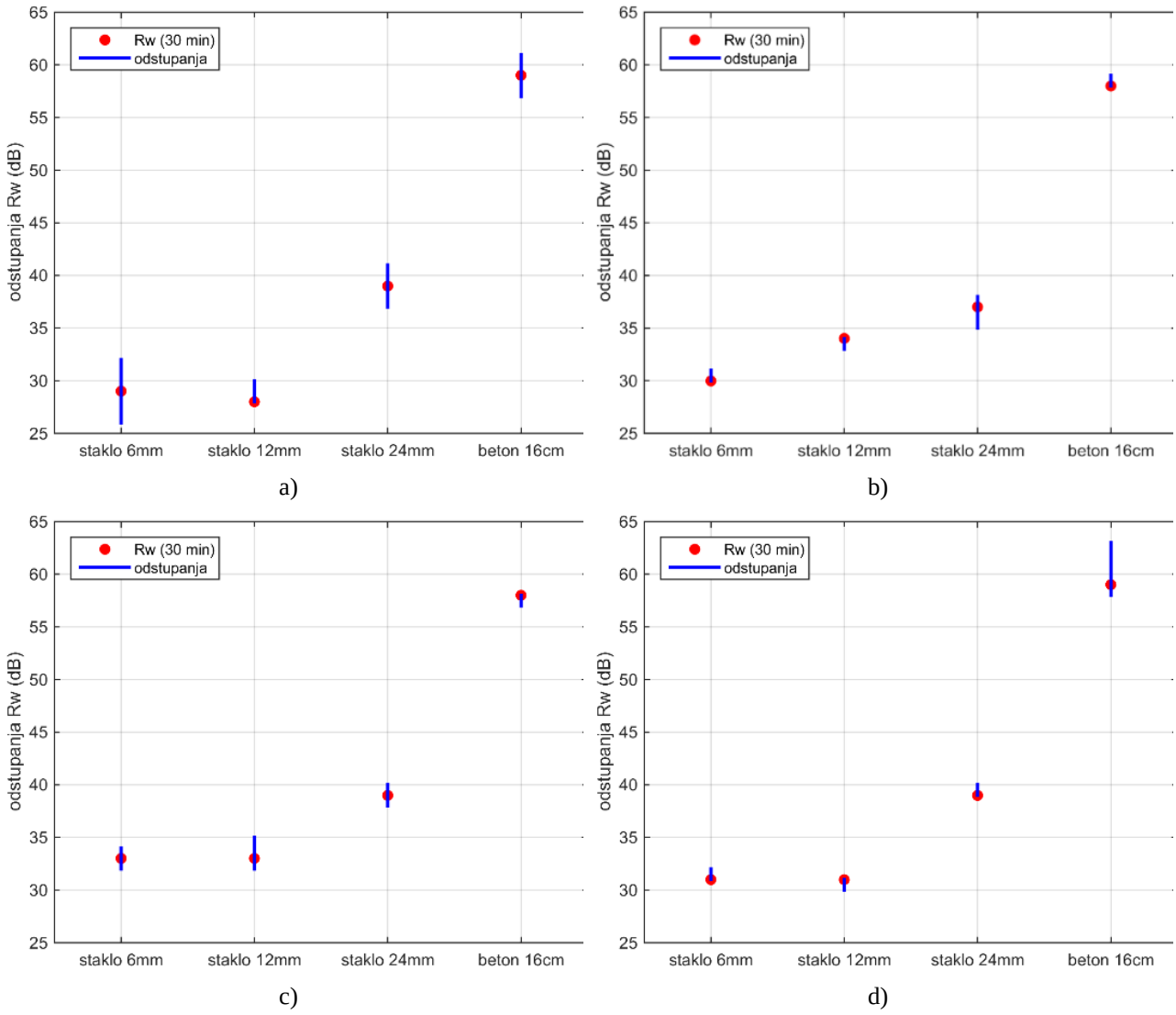
Na Slici 5.24 a) prikazane su srednje vrednosti po frekvencijama odstupanja krivih proračunatih na osnovu signala trajanja 10 minuta u odnosu na globalnu krivu raspodele. Najveća odstupanja su oko 3 dB u zoni oko 1000 Hz. Ukoliko se posmatraju rezultujuće jednobrojne vrednosti izolacione moći (Slika 5.24 b)) vidi se da su za sva četiri tipa pregrade varijacije u odnosu na globalnu proračunatu vrednost izolacione moći oko 2 dB.

Na Slici 5.25 prikazani su rezultati iste analize sprovedene nad signalima trajanja 1 minut. Kao što je i očekivano srednje vrednosti odstupanja po pojedinačnim frekvencijskim opsezima su velike i iznose i do 7 dB, a odstupanja jednobrojnih vrednosti su i do 3-4 dB u odnosu na proračunatu jednobrojnu vrednost na osnovu globalne krive, sa ekstremnim primerom staklene pregrade debljine 24 mm, kod koje se vrednosti jednobrojne izolacione moći za različite segmente razlikuju i do 15 dB. Ovaj rezultat je i očekivan, s obzirom da je vremenski interval od 1 minut nedovoljan da obuhvati sve značajne činioce u zvučnom ambijentu jedne lokacije. Postupak prikazan u ovom poglavlju sproveden je nad rezultatima sa sve četiri merne lokacije koje su obrađene u ovom radu (MO, CN, BL i IG). U nastavku su prikazani samo krajnji rezultati ove analize svedeni na jednobrojne vrednosti izolacione moći, dok su svi međukoraci analize za svaku lokaciju dati u Prilogu 4.



a) b)

Slika 5.25 Varijabilnost izolacione moći proračunate na bazi signala trajanja 1 min, za četiri tipa pregrade: a) srednja vrednost odstupanja R(f) od globalne krive, b) odstupanja jednobrojnih vrednosti.



Slika 5.26 Odstupanja jednobrojnih vrednosti izolacione moći proračunatih na bazi signala trajanja 10 min, za četiri lokacije: a) MO, b) CN, c) BL, d) IG.

Na Slici 5.26 su prikazana odstupanja jednobrojnih vrednosti izolacione moći za svaku lokaciju. Može se zaključiti da se za svaku lokaciju skraćivanje vremenskog uzorka snimka buke sa 30 na 10 minuta uticati na tačnost krajnjeg rezultata za ±(2-3) dB. Na svakoj lokaciji ispoljavaju se različite varijabilnosti jednobrojne vrednosti za različite tipove pregrada, što je prouzrokovano odnosom između faktora $\tau(f,\theta)$ i $p(f,\theta)$ koji učestvuju u analitičkoj formuli za izračunavanje izolacione moći. U situacijama u kojima promenljivost gustine verovatnoće postoji u opsegu frekvencija i uglova u kojima je veliki gradijent faktora $\tau(f,\theta)$, dolazi do relativno velikih promena u proračunatoj izolacionoj moći. Ova činjenica uzrokuje pojavu da je, na primer, proračunata izolaciona moć za betonsku pregradu debljine 16 cm na lokaciji IG veoma osetljiva na promene koje proizilaze iz skraćivanja trajanja vremenskog uzorka, dok za ostale tipove pregrada to nije slučaj.

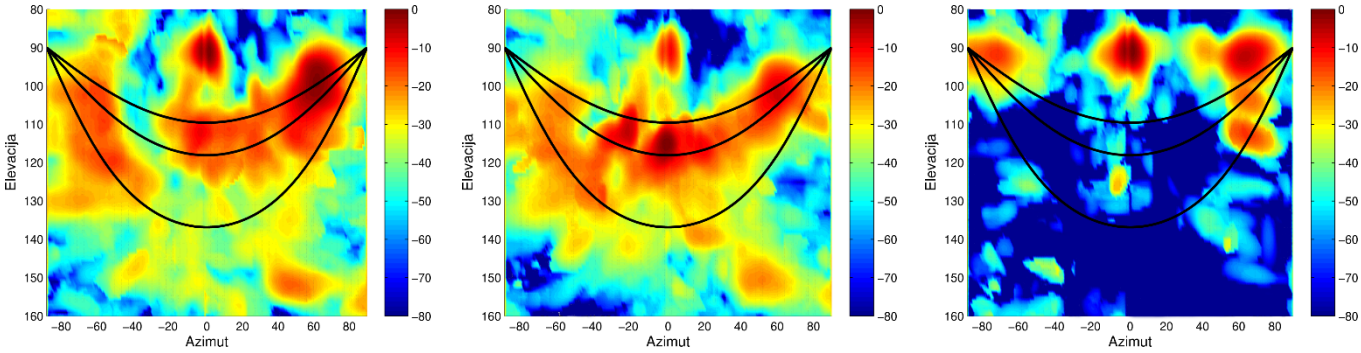
Prikazana analiza je pokazala da je prilikom procedure proračunavanja izolacione moći na bazi raspodela dobijenih mikrofonskim nizom potrebno načiniti snimak buke u okviru kog su zastupljeni svi zvučni događaji koji dominantno definišu stanje buke na nekoj lokaciji. Ovakav zaključak je inherentan samoj prirodi merenja buke bilo kojom metodom.

Ispitan je uticaj skraćivanja vremenskog uzroka na arbitrarno određeno trajanje od 10 minuta, i pokazano je da je ovakav postupak opravdan na svim mernim lokacijama, uz tačnost krajnjeg rezultata koja je komentarisana na Slici 5.26. Prikazano je i da skraćivanje uzorka na trajanje od 1 minut ne daje rezultate zadovoljavajuće tačnosti, što je objašnjeno činjenicom da tako kratak

vremenski interval ne odslikava generalno stanje buke na lokaciji, jer ne uključuje sve značajne događaje. U sledećem poglavlju, ispitana je mogućnost svođenja analize na analizu ključnih događaja [86]. Polazna premisa je da se na zadatoj lokaciji, mogu identifikovati svi značajni događaji koji određuju generalnu raspodelu, izvršiti analiza nad tim skupom događaja i na osnovu njih odrediti globalna raspodela.

5.4 Analiza ključnih događaja u ulicama

Globalna raspodela ugaone energije na određenoj lokaciji predstavlja superpoziciju različitih zvučnih događaja kao što su prolasci automobila i drugih vozila, žamor ljudi, opšti ambijentalni fon. Svi ovi događaji učestvuju u ukupnoj raspodeli sa različitom frekvencijom pojavljivanja, relativnim nivoom i slično. Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, procena globalne ugaone raspodele incidentne energije se mora izvršiti nad snimkom sa lokacije koji je dovoljnog trajanja da obuhvati sve pomenute događaje, i njihovu frekvenciju pojavljivanja. Pri tome, prilikom analize treba detektovati i eliminisati uticaje nekarakterističnih, specifičnih događaja koji po svojoj sadržini značajno odstupaju od opšteg stanja buke na lokaciji i mogu se tretirati kao ekscesni događaji. U nastavku je istraživana mogućnost svođenja analize ugaone raspodele na lokaciji na analizu snimaka karakterističnih događaja, a zatim njihovu superpoziciju za dobijanje ukupne ugaone raspodele. Na ovaj način može se značajno povećati efikasnost predložene metodologije s obzirom da se količina ulaznih podataka za obradu smanjuje višestruko.

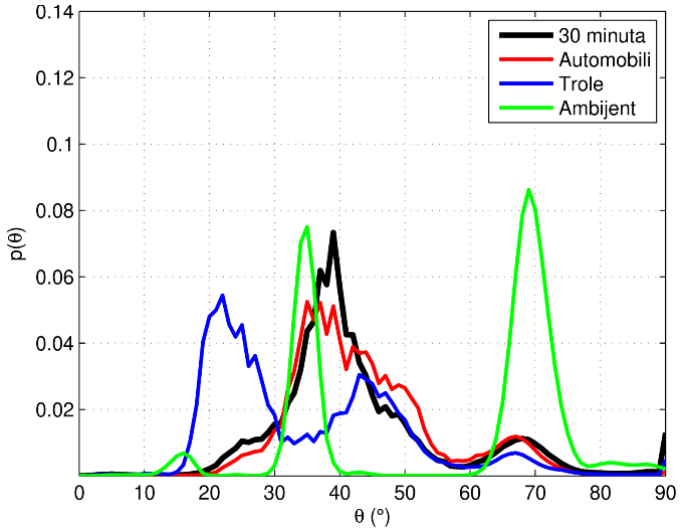


Slika 5.27 Zvučne mape lokacije CN, za opseg 1/3 oktave 800 Hz i izdvojene događaje: a) automobili, b) trolejbusi, c) ambijent.

Na Slici 5.27 prikazane su zvučne mape u ulici Cara Nikolaja (CN) za različite karakteristične tipove događaja koji se mogu registrovati na ovoj lokaciji: prolazak automobila, prolazak trolejbusa i ambijent. Pod pojmom ambijenta smatramo opšti fon ulice u kome se ne mogu razaznati nezavisni događaji. Na grafiku su prikazane zvučne mape na frekvenciji 800 Hz. Crnom linijom označene su granice dve saobraćajne trake, i na graficima koji prikazuju zvučnu mapu prolaska vozila jasno se može videti skupljanje energije u zoni saobraćajnih traka. U slučaju ambijenta postoje dve dominantne komponente. Prva je energija koja dolazi iz prostornih uglova koji odgovaraju krajevima ulice, odnosno upravnim ulicama koje seku posmatranu ulicu. Druga komponenta je ambijentalna buka udaljenih izvora koja prelazi relativno veliki put i detektuje se na prostornim uglovima koji su upravni na ravan fasade. Dominantni udaljeni izvor u slučaju lokacije Cara Nikolaja je autoput. Analizirano je šest prolazaka automobila, četiri prolaska trolejbusa i četiri segmenta ambijentalne buke. Snimci pojedinačnih događaja su izdvojeni iz ukupnog snimka trajanja 30 minuta, i s obzirom da je ulica dvosmerna, vođeno je računa da budu ravnopravno zastupljeni prolasci vozila u oba smera. Ukupno trajanje prolazaka automobila je 35 sekundi, prolazaka trolejbusa 26 sekundi, a ambijentalne buke 20 sekundi.

Kada se za prikazane primere događaja izračunaju gustine raspodele incidentne energije, dobijaju se rezultati koji su prikazani na Slici 5.28. Na slici je takođe prikazana i globalna gustina raspodele na ovoj lokaciji. Može se uočiti da sva tri tipa događaja odlikuje različita ugaona raspodela, i da globalna raspodela proračunata na bazi uzorka od 30 minuta ima najpribližnije karakteristike raspodeli

događaja prolaska automobila u ovom frekvencijskom opsegu. Na Slici 5.28 je prikazan rezultat za opseg 1/3 oktave 1250 Hz. Ovo je očekivan rezultat, s obzirom da je prolazak automobila na ovoj lokaciji događaj sa najvećom frekvencijom pojavljivanja. Takođe, ispoljeni nivoi zvučnog pritiska ovog tipa događaja u odnosu na ambijent su viši za red veličine pa je njihov doprinos u ukupnoj raspodeli veći.



Slika 5.28 Gustine raspodele CN, za opseg 1/3 oktave 1250 Hz i izdvojene događaje: a) automobili, b) trolejbusi, c) ambijent.

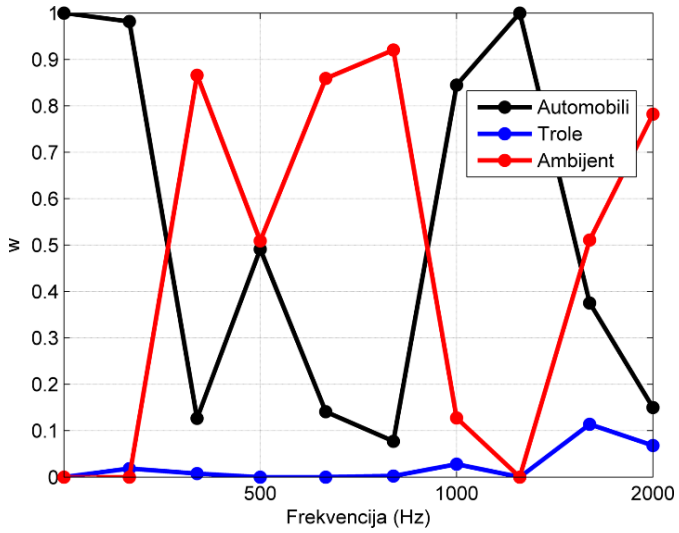
Polazna premisa ove analize jeste da se mogu pronaći težinski koeficijenti w_k takvi da bude zadovoljena jednačina:

$$A_{30minuta} = A_{ukupno} = w_1 * A_{automobili} + w_2 * A_{trole} + w_3 * A_{ambijent}, \quad 5.5$$

gde je A_{30min}, globalna zvučna mapa proračunata na osnovu uzorka od 30 minuta, A_{ukupno}, težinovana superpozicija zvučnih mapa pojedinačnih događaja, $A_{automobili}$, A_{trole}, $A_{ambijent}$, raspodele dobijene na osnovu analize ključnih događaja na lokaciji, a w_1, w_2, w_3 težinski koeficijenti koji odgovaraju ključnim događajima. Kako bi se izračunali težinski koeficijenti, na poznatoj lokaciji se vrši minimizacija razlike između globalne zvučne mape A_{ukupno} i težinovanog zbira zvučnih mapa za pojedinačne događaje. Ovaj optimizacioni problem može se opisati jednačinom 5.6.

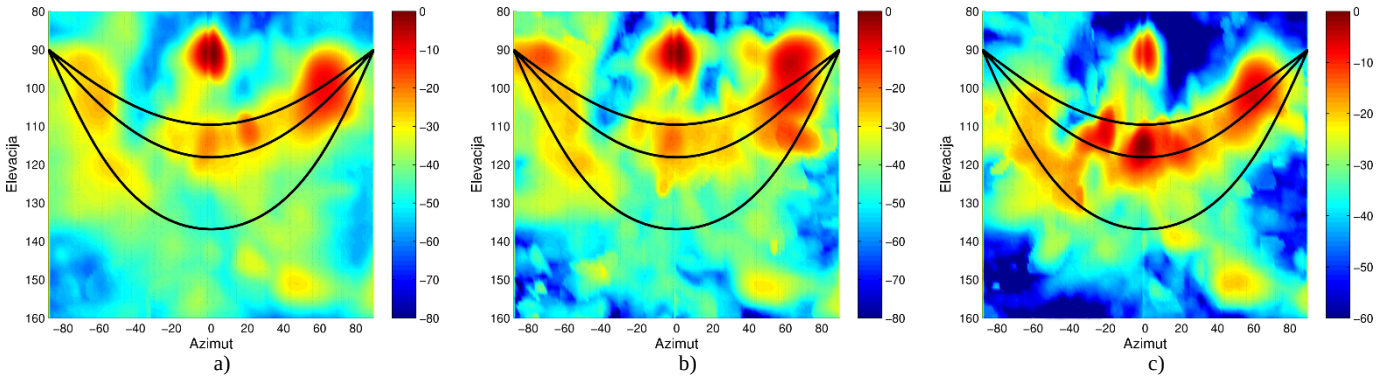
$$\min_{w_1, w_2, w_3} \left(\sum A_{30min} - A_{ukupno} \right). \quad 5.6$$

Kao metod optimizacije izabran je metod pronalaska minimuma funkcije sa ograničenjima [87]. Optimizacioni problem postavljen u 5.6 se mora rešiti nezavisno za svaki frekvencijski opseg. Na Slici 5.29 date su dobijene vrednosti težinskih koeficijenata za analiziranu lokaciju. Najmanje vrednosti težinskih koeficijenata za događaje prolaska trolejbusa su minimalne u svim opsezima. Takav rezultat je logičan jer ovakav tip događaja ima najmanju frekvenciju ponavljanja. Vrednosti težinskih koeficijenta za događaje prolazaka automobila i ambijent su velike što je pokazatelj velike zastupljenosti ovih događaja u ukupnoj zvučnoj mapi. U određenim frekvencijskim opsezima težinski koeficijent za događaj prolaska automobila ima vrednost blisku 1, što znači da on dominantno određuje raspodelu u tim opsezima. Ovakav je primer opsega 1/3 oktave na 1250 Hz, koji je prikazan na prethodnoj slici. Bitno je napomenuti da je ambijentalna buka prisutna u svim tipovima događaja, međutim zbog svog relativno niskog nivoa u odnosu na prolaske vozila, smatra se da se može zanemariti njen uticaj kada je prisutan događaj prolaska vozila.



Slika 5.29 Vrednosti težinskih koeficijenata za različite tipove događaja i sve frekvencijske opsege od interesa. Lokacija CN.

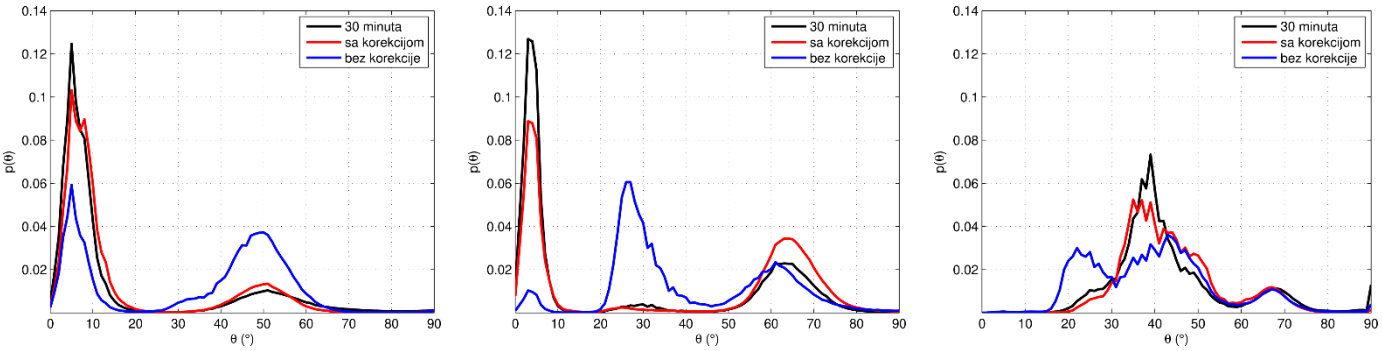
Na Slici 5.30 prikazane su zvučne mape proračunate za vremenski segment od 30 minuta, zatim za superpoziciju zvučnih mapa pojedinačnih događaja sa uvedenom korekcijom w_k i na kraju, za prostu superpoziciju zvučnih mapa ključnih događaja bez korekcije. Prikazani su rezultati u opsegu 1/3 oktave 800 Hz.



a) b) c)

Slika 5.30 Zvučne mape u opsegu 1/3 oktave 800 Hz, za: a) snimak od 30 min, b) zbir pojedinačnih događaja sa korekcijom, i c) zbir pojedinačnih događaja bez korekcije.

Na slici se može uočiti da težinovanje doprinosa pojedinačnih događaja poboljšava aproksimaciju globalne zvučne mape. Ovo se može videti u očuvanju relativnih odnosa različitih izvora na mapi, kada se uporede Slike 5.30 a i 5.30 b.

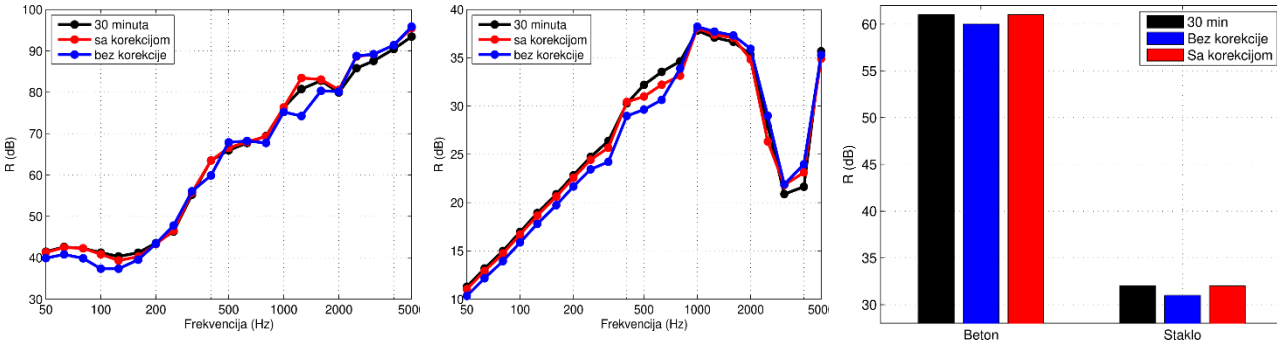


a) b) c)

Slika 5.31 Poređenje funkcija gustine raspodele u opsezima 1/3 oktave: a) 400 Hz, b) 800 Hz i c) 1250 Hz.

Na Slici 5.31 prikazano je poređenje rezultujućih gustina raspodela za tri karakteristična frekvencijska opsega. Sa slike se može uočiti različit nivo sličnosti između aproksimirane i globalne krive u različitim opsezima (crvena i crna kriva). Kako bi se procenila verodostojnost aproksimacije,

potrebno je proračunati izolacione moći na bazi dobijenih funkcija gustine raspodele. Na Slici 5.32 prikazane su proračunate vrednosti za dva tipa monolitnih pregrada: betonska pregrada debljine 20 cm, i staklena pregrada debljine 5 mm. Crnom bojom označena je izolaciona moć proračunata na osnovu globalnog snimka buke od 30 minuta, i ona se uzima kao referentna vrednost. Crvenom i plavom bojom označene su izolacione moći proračunate na bazi zbira doprinosa pojedinačnih događaja sa i bez korekcije težinskim koeficijentima.



a) b) c)

Slika 5.32 Odstupanja proračunatih aproksimiranih izolacionih moći od globalne krive za dva tipa pregrade: a) beton 20 cm, b) staklo 5 mm, c) Odstupanja jednobrojnih vrednosti izolacionih moći.

Sa grafika se može uočiti da izolaciona moć proračunata na osnovu težinovane superpozicije pojedinačnih događaja dobro aproksimira globalnu krivu izolacione moći za oba tipa pregrade. Razlike u pojedinačnim frekvencijskim opsezima su praktično zanemarljive za oba tipa pregrade: za betonsku pregradu debljine 20 cm razlike su manje od 1 dB, dok su za staklenu pregradu, u uskom opsegu frekvencija razlike do 2 dB. Predloženim postupkom dobija se istovetna jednobrojna vrednost izolacione moći za oba tipa pregrade.

Proračunati koeficijenti w_k se dalje mogu koristiti za procenu ugaonih raspodela buke na novim lokacijama koje imaju iste osobine kao lokacija CN, odnosno pripadaju istoj klasi urbane mikrokonfiguracije. Polazna istraživanja na temu klasifikacije urbanih zona prema profilu ugaone raspodele [80] su pokazala da je na osnovu rasporeda objekata i konfiguracije saobraćaja, moguće napraviti klasifikaciju. Pri tome, prilikom primene težinskih koeficijenata na novoj lokaciji, mora se uzeti u obzir gustina saobraćaja, i tim podatkom ponderisati težinski koeficijenti.

6 Istraživanje stanja ambijentalne buke u stanovima

U prethodnim poglavljima ove disertacije pokazano je da nivo privatnosti, osim prepoznatljivih zvukova koji dospevaju iz okruženja i od kojih se boravišne prostorije štite zvučnom izolacijom, određuje i postojeća ambijentalna buka u njima. Zbog toga svaka analiza privatnosti u zgradama zahteva poznavanje stanja buke u njihovim prostorijama. Pregledom relevantne literature konstatovano je da o tome nema dovoljno adekvatnih podataka, posebno kada se radi o stambenim zgradama. Da bi se za potrebe ove disertacije utvrdile realne informacije o stanju ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova organizovano je ciljano istraživanje. Ono je imalo dve faze. U prvoj fazi zadatak je bio da se utvrdi realno stanje ambijentalne buke u boravišnim prostorijama različitih zgrada u okolnostima značajnim za privatnost. To su pre svega periodi kada u prostorijama vlada tišina, što znači bez neposredno prisutnih izvora zvuka u prostorijama gde borave ljudi („stanje tišine“). U drugom delu ovog istraživanja zadatak je bio da se utvrdi procedura kojom je moguće izvršiti predikciju stanja ambijentalne buke u boravišnim prostorijama unutar zgrade koristeći predloženu metodologiju upotrebe mikrofonskih nizova. Pri tome se relevantni ulazni podaci za takvu proceduru prikupljaju eksperimentalnim putem i preuzimanjem iz tehničkih karakteristika fasadnih pregrada.

6.1 Postupak analize postojećeg stanja ambijentalne buke u prostorijama

Istraživanje postojećeg stanja ambijentalne buke organizovano za potrebe ove teze imalo je dva pravca rada. Prvi je bio traganje za postojećim podacima o nivou buke koji se generišu kao prateće informacije. Takvi podaci postoje u sklopu rezultata merenja zvučne izolacije u zgradama. Prilikom merenja zvučne izolacije u zgradama čini se napor da u prostorijama obuhvaćenim procedurom merenja bude isključen uticaj svih drugih zvučnih izvora kako ne bi ugrozili tačnost rezultata [45]. Zbog toga su takvi podaci potencijalno relevantni za istraživanje stanja ambijentalne buke u prostorijama. Drugi pravac je obuhvatio namenska merenja u stanovima, organizovana za potrebe ove disertacije, pre svega u novoizgrađenim zgradama.

Procedura merenja zvučne izolacije podrazumeva, između ostalog, i uzimanje mernih podataka o stanju ambijentalne buke u prijemnoj prostoriji kada je merni signal isključen. U arhivi Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu godinama su prikupljani rezultati takvih merenja. Sva merenja su izvršena u Beogradu. Za potrebe ovog istraživanja iz prikupljenih datoteka preuzeti su podaci o zabeleženom nivou ambijentalne buke u prijemnim prostorijama. Oni su dobijeni merenjima po relevantnom standardu i definišu izmerene nivoe buke po opsezima 1/3 oktave od 50 Hz do 5000 Hz.

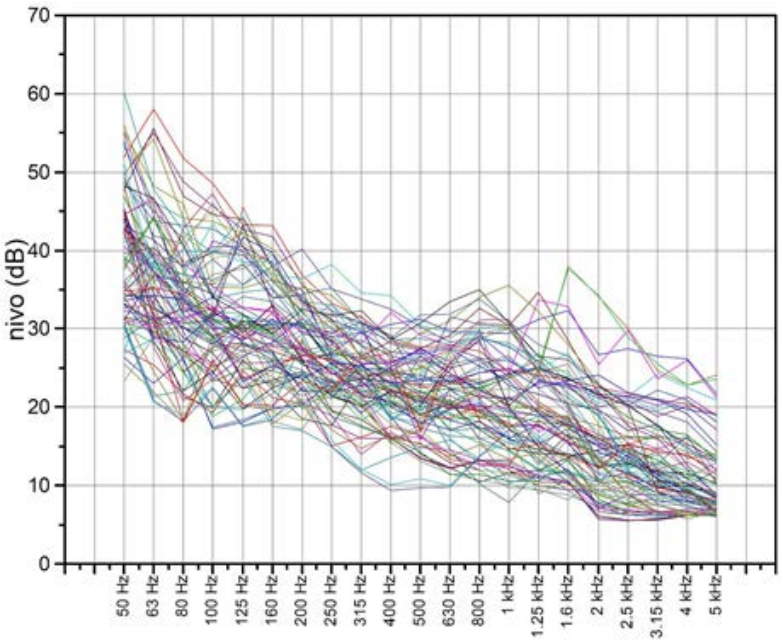
Sva merenja zvučne izolacije čiji su rezultati bili na raspolaganju rađena su u novim zgradama nakon završetka gradnje, ili eventualno u prvih par godina njihove eksploatacije. To je rađeno po posebnim zahtevima korisnika koji su se žalili na neadekvatan zvučni komfor, pre svega kada je postojala sumnja u postignute vrednost izolacione moći pregradnih sklopova. Sva merenja buke izvršena su u sredini prostorije, pri zatvorenim prozorima i vratima, i sa isključenim izvorima zvuka čija je kontrola bila dostupna u testiranim stanovima.

Podaci o stanju ambijentalne buke dobijeni iz rezultata merenja zvučne izolacije ne obuhvataju sve okolnosti značajne za ocenu stanja privatnosti. Takva ispitivanja u zgradama vrše se isključivo u periodu dana, najčešće tokom prepodneva. Osim toga, postupak merenja zvučne izolacije ima do izvesne mere imunitet u odnosu na ometajuće zvukove iz zgrade zahvaljujući visokom nivou mernog signala koji se reprodukuje. Zbog toga je moguće da neki od zapisa ambijentalne buke načinjenih tom prilikom ne odražavaju na pravi način stanje relevantno za ocenu privatnosti. To je bio motiv da se za potrebe ovog istraživanja organizuju namenska merenja ambijentalne buke u dostupnim stanovima. Merenja su sprovedena u svemu prema standardu koji reguliše takav postupak [46]. Njihov cilj je bio da se dopuni baza podacima koji će obezbediti statističku regularnost, a takođe da

se obuhvate i sve okolnosti značajne za ocenu privatnosti uz poštovanje svih specifičnosti merenja u useljenim zgradama [88], [89]. Zbog toga su merenje izvršena pre svega u periodu večeri i noći. Tada je osetljivost ljudi na nedostatke zvučnog komfora najveća, a takođe i koncentracija ljudi u stambenim zgradama je najveća. To su periodi dana kada stanari najlakše uočavaju propuste postignutog zvučnog komfora i prijavljuju nedostatke.

6.2 Rezultati analize

Svi rezultati merenja nivoa buke u boravišnim prostorijama stanova prikupljeni u okviru ovog rada prikazani su zbirno na slici 6.1. Prikazani su izmereni spektri po opsezima 1/3 oktave u proširenom opsegu frekvencija od 50 Hz do 5 kHz. Za analizu je ukupno prikupljeno 112 rezultata merenja ambijentalne buke i svi su prikazani na dijagramu.



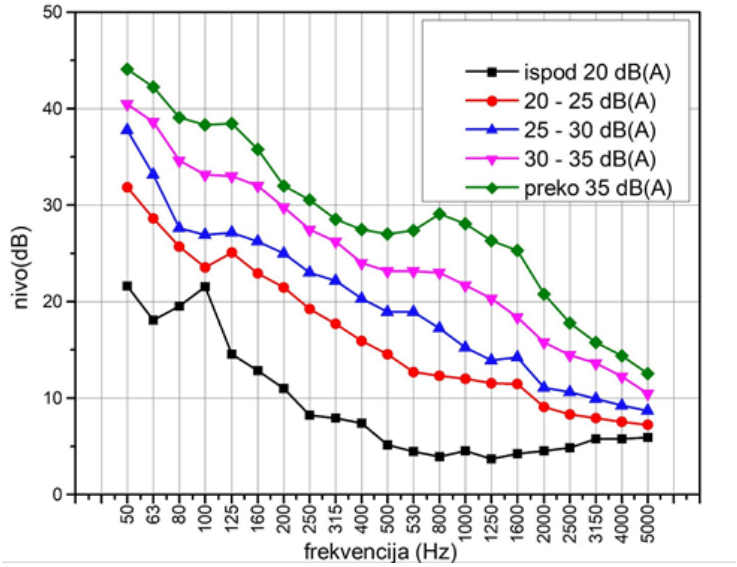
Slika 6.1 Prikaz spektara svih izmerenih stanja nivoa ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova, predstavljenih po opsezima 1/3 oktave.

Krive sa slike 6.1 pokazuju opseg vrednosti u kome se kreću pojedinačni rezultati merenja. U svim rezultatima vidljiv je opšti trend opadanja nivoa sa frekvencijom, što je očekivana karakteristika ambijentalne buke s obzirom da je to odlika slabljenja pri prolasku zvuka kroz građevinske pregrade na fasadi, a takođe je to i odlika uticaja disipacije na zvuk dalekih izvora. Na srednjim frekvencijama pojedinačni rezultati merenja nalaze se u rasponu od približno 20 dB, dok je na najnižim frekvencijama, u prvih nekoliko opsega počevši od 50 Hz, taj raspon nešto veći, do 30 dB.

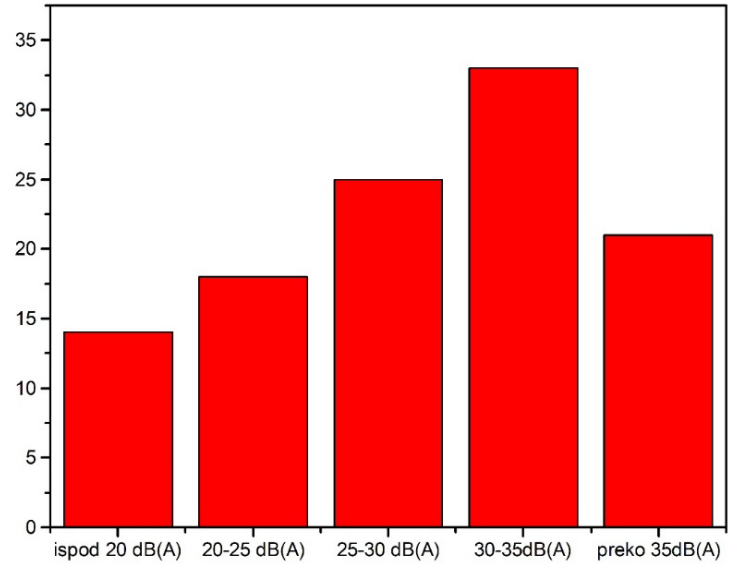
Na skupu svih prikazanih rezultata moguće je uvesti izvesnu klasifikaciju i uvođenje kategorija po nivoima zvuka. Svaka takva klasifikacija neminovno sadrži element proizvoljnosti, odnosno bazira se na nekom stavu istraživača koji to realizuje jer se sa slike 6.1 vidi da ne postoje jasno prepoznatljive grupe i uočljive prirodne granice između njihovih vrednosti. U takvim okolnostima je za potrebe ovog rada uvedeno grupisanje rezultata na osnovu jednobrojnih vrednosti $L_{A,eq}$ podeljenih po opsezima širine 5 dB. Podela je realizovana u rasponu vrednosti nivoa od 20 dB(A) do 35 dB(A). Posebno su izdvojene grupe u kojim su rezultati sa vrednostima manjim od 20 dB(A), odnosno iznad 35 dB(A).

Nakon takve podele po grupama, za svaku grupu izračunate su srednje vrednosti po opsezima 1/3 oktave. Rezultat je prikazan na slici 6.2. Dijagram koji pokazuje broj merenja, to jest broj testiranih prostorija, po apriorno definisanim grupama širine 5 dB prikazan je na slici 6.3. Vidi se da su u 32 slučaja merenja ambijentalne buke (oko 28%) izmerene vrednosti ispod 25 dB(A), a čak 14 rezultata (oko 12%) je pokazalo da je nivo ambijentalne buke ispod 20 dB(A). Najniža izmerena

vrednost u sobi nekog stana bila je oko 15 dB(A). To je ekstremno niska vrednost koja otvara čitav niz problema sa aspekta zvučnog komfora i zaštite privatnosti.



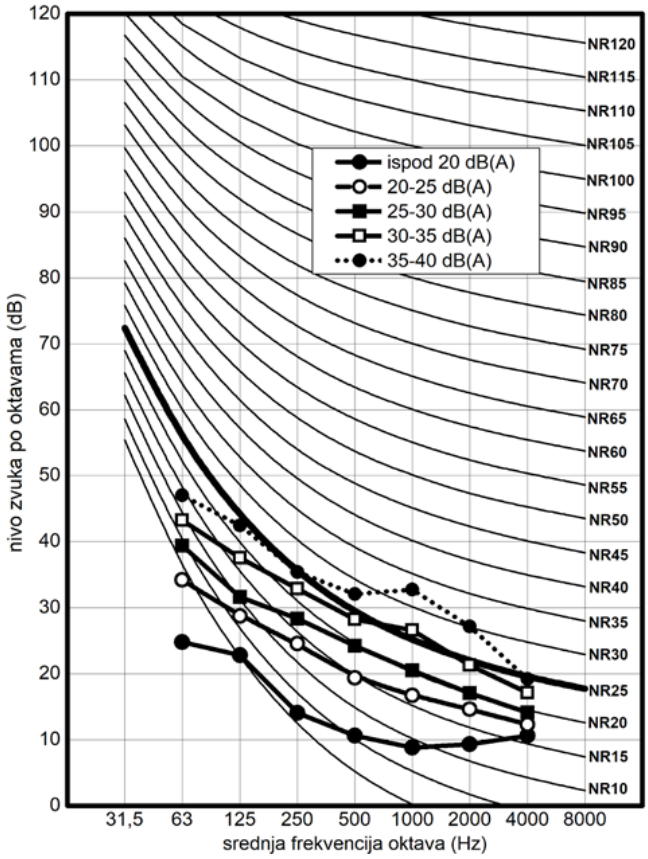
Slika 6.2 Srednja vrednost spektara ambijentalne buke u stanovima podeljenih po uvedenim kategorijama.



Slika 6.3 Prikaz broja merenja, to jest broja testiranih soba u stanovima, po apriorno definisanim opsezima izmerenog ekvivalentnog nivoa u širini od 5 dB

U rezultatima prikazanim na slici 6.2 može se prepoznati postojanje nekih odstupanja od očekivanog monotono opadajućeg toka spektralne krive. To se može objasniti činjenicom da su u trenucima merenja na analiziranim lokacijama postojali neki zvukovi iz okruženja koji su uneli odstupanje od monotonosti u užim opsezima frekvencija. Takav je slučaj u kategoriji izmerenih vrednosti ispod 20 dB(A), gde postoji porast u opsegu 1/3 oktave na 100 Hz. Pojava se možda može objasniti brujanjem nekih uređaja koji se napajaju iz elektroenergetske mreže, a koji zbog svog izuzetno niskog nivoa nisu mogli biti detektovani čulom sluha prilikom obavljanja merenja buke. Merenje tako niskih vrednosti nivoa zvuka je inače bremenito raznim uticajima koje treba pratiti i po mogućnosti eliminisati. Dovoljno je navesti činjenicu da pri merenju nivoa zvuka ispod 20 dB(A) operater koji sprovodi merenja mora da zaustavi disanje jer je zvuk koji pri tome nastaje ima viši nivo od merene ambijentalne buke. Porast spektralnog nivoa postoji i u kategoriji preko 35 dB(A), gde se javlja izraženi porast na srednjim frekvencijama (od 800 Hz do 1600 Hz).

Usrednjeni spektri po kategorijama sa slike 6.2, i koji su predstavljeni po opsezima 1/3 oktave, preračunati su u oktavne spektre da bi se mogli porediti sa uobičajenim kriterijumima za ocenu stanja buke u životnoj sredini. Rezultat je prikazan na slici 6.4. Spektri su ucrtani u standardni dijagram NR kriterijuma [90]. Posebno je debljom linijom označen kriterijum NR25 koji predstavlja najvišu dopuštenu vrednost nivoa ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova u periodu noći. Vidi se da su čak tri definisane kategorije izmerenog spektra ambijentalne buke za više od 5 dB ispod ovog kriterijuma. Svi rezultati koji premašuju kriterijum NR25 potiču od rezultata merenja zvučne izolacije, što znači da su zabeleženi tokom dana.



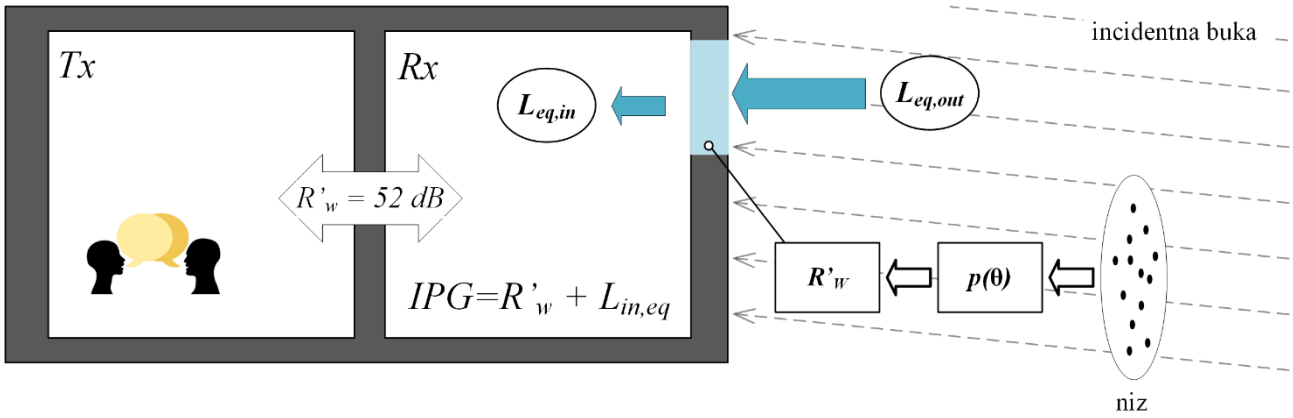
Slika 6.4 Oktavni prikaz usrednjenih spektara ambijentalne buke po kategorijama, ucrtanih na dijagramu NR kriterijuma; debljom linijom je označena kriva NR25 koja predstavlja maksimalno dopuštenu vrednost nivoa buke u boravišnim prostorijama stanova tokom perioda noći

6.3 Procena ambijentalne buke u prostorijama primenom mikrofonskog niza

Rezultati prikazani na prethodni dijagramima odražavaju realno stanje ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova neposredno utvrđeno merenjem. Takvi podaci omogućavaju da se na pravi način razume problem privatnosti u stanovima i usmeri inženjerski rad na projektovanju novih zgrada. U poglavlju 3 ove disertacije opisana je metodologija primene mikrofonskih nizova i prostorno-vremenske obrade signala kojom se u zadatim urbanističkim uslovima omogućava predikcija stanja ambijentalne buke u prostorijama, a time i procena vrednost indeksa privatnosti govora. Mogućnost predikcije je posebno značajna u eventualnim sanacijama, to jest kada je u postojećim zgradama konstatovana nedovoljna privatnost i zbog toga postoji reakcija stanara. Primena mikrofonskih nizova u rešavanju takvih zadataka omogućava dobijanje potrebnih podataka kojim se karakteriše zadati urbanistički ambijent, i na osnovu kojih se može sprovoditi predikcija stanja za razne varijante fasadnih i unutrašnjih pregrada, sve sa ciljem da se pronađe optimalni način sanacije problema privatnosti.

Metodologija koja koristi mikrofonski niz i prostorno-vremensku obradu signala za procenu ambijentalne buke u prostorijama šematski je prikazana na Slici 6.5. Na njoj su naznačeni svi

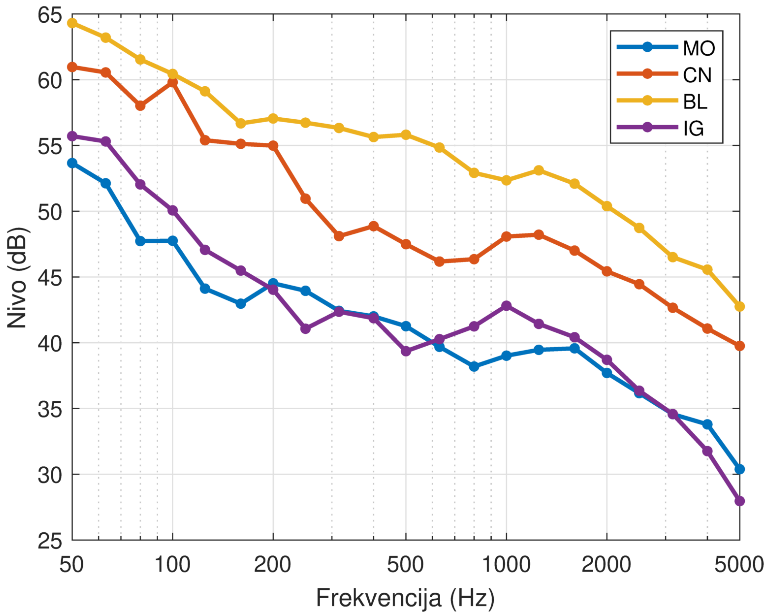
relevantni elementi i veličine od značaja. Predajna i prijemna prostorija označene su sa T_x i R_x, respektivno. U ovom slučaju predajna prostorija je izvor zvukova koji ugrožavaju privatnost, a prijemna prostorija je zona u kojoj se želi postići privatnost. Njih razdvaja pregradni zid koji se definiše merodavne vrednošću građevinske izolacione moći. Sa desne strane slike naznačeno je postojanje ambijentalne buke u okruženju zgrade čiji je ekvivalentni nivo $L_{eq,out}$. Taj podatak se može dobiti merenjem u blizini fasade [46]. Predikcija stanja podrazumeva proračun nivoa buke u unutrašnjosti prijemne prostorije $L_{eq,in}$ koja nastaje prodorom zvuka iz spoljašnje sredine kroz fasadnu pregradu. Mikrofonskim nizom na fasadi zgrade i prostorno-vremenskom obradom signala iz mikrofona detektuju se položaji izvora buke u okruženju, određuju zvučne mape i na osnovu njih proračunavaju ugaone raspodele incidentne energije $p(\theta)$ koja pogađa fasadu. Proračun se obavlja za sve frekvencijske opsege od interesa. Na osnovu tako dobijenih ugaonih raspodela vrši se proračun vrednosti izolacione moći R'_w koju će u zadatim uslovima incidencije zvuka realno ispoljavati fasadne pregrade. To se može uraditi na jedan od dva načina predložena u prethodnim poglavljima disertacije: u slučaju monolitnih pregrada u proračun se ulazi analitičkom formulom za koeficijent transmisije u kojoj figuriše $p(\theta)$, dok se u slučaju kompleksnih pregrada za koje ne postoji analitičko rešenje u ovoj disertaciji predlaže primena korekcionih faktora za korekciju laboratorijski izmerenih vrednosti izolacione moći. Detaljan prikaz koncepta primene korekcionih faktora za modifikaciju laboratorijskih vrednosti izolacione moći nalazi se u poglavlju 4 ove disertacije.



Slika 6.5 Šematski prikaz predikcije ambijentalne buke i indeksa privatnosti.

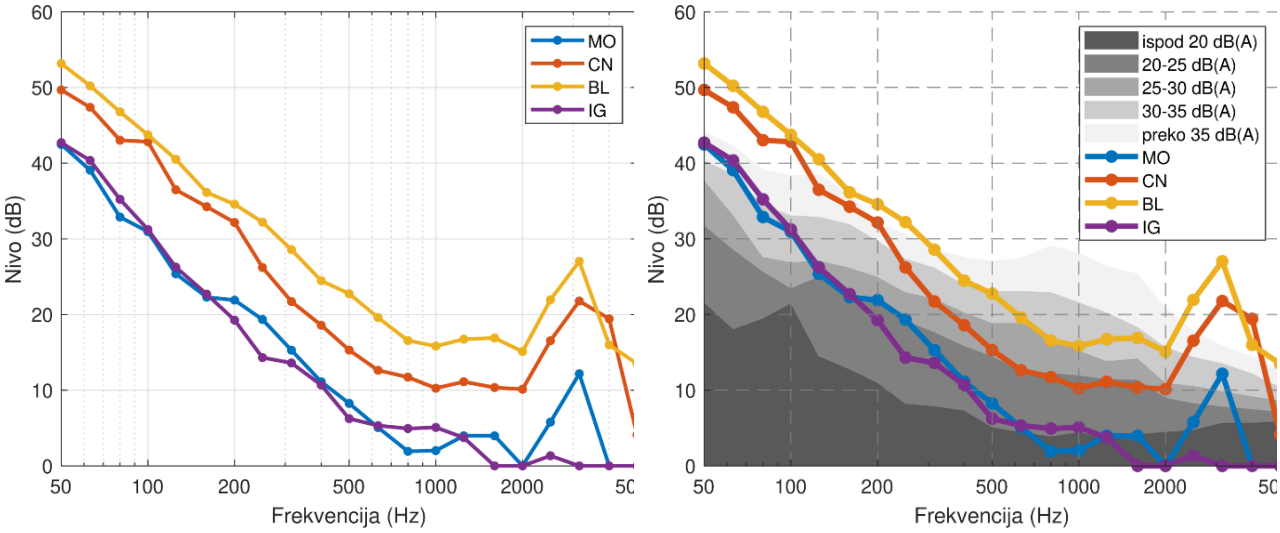
U nastavku analize vršen je proračun izolacionih moći pretpostavljenih struktura fasadne pregrade koje su sačinjene od monolitnih materijala. Ekvivalentni nivo buke u unutrašnjosti prostorije $L_{eq,in}$ izračunava se na osnovu izmerenog nivoa spoljašnje buke $L_{eq,out}$ i proračunatih vrednosti izolacionih moći fasadnih pregrada. Sa poznavanjem $L_{eq,in}$ može se izvršiti predikcija vrednosti indeksa privatnosti govora (IPG) koristeći ranije prikazani izraz 2.5.

Na Slici 6.6 prikazani su spektri ambijentalne buke izmereni na četiri ranije opisane merne lokacije od interesa (MO, CN, BL, IG). Detaljniji opis merne lokacije prikazan je u Prilogu 1. Izmereni spektri ambijentalne buke prikazani su u opsezima 1/3 oktave od 50 Hz do 5 kHz. Najviši nivo ambijentalne buke izmeren je na lokaciji Bulevar kralja Aleksandra (BL). Sledeći po nivou je rezultat izmeren u ulici Cara Nikolaja (CN), dok su nivoi izmereni na preostale dve lokacije niži. Takav rezultat je očekivan, s obzirom da je na lokaciji (BL) najviša frekvencija saobraćaja i najveća raznovrsnost izvora saobraćajne buke. Sa prikazanih dijagrama može se uočiti da postoji opšti trend opadanja spektralnog nivoa sa porastom frekvencije. Takav trend je sličan onom koji je konstatovan merenjima ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova, čiji su rezultati prikazani na Slici 6.1.



Slika 6.6 Spektri spoljašnje buke na četiri merne lokacije; MO, CN, BL, IG.

Mogućnosti predikcije stanja unutrašnje ambijentalne buke $L_{eq,in}$ na bazi oba predložena metoda prikazane su u nastavku. Proračuni prikazani u nastavku realizovani su sa površinom fasadne pregrade od 10 m^2 i apsorpcijom u prostoriji od 10 m^2. U prvom primeru pretpostavljeno je na fasadi stakleno okno debljine 6 mm. To je monolitna pregrada za koju se može koristiti analitički izraz za koeficijent transmisije. Na osnovu izmerene gustine raspodele proračunava se realno ispoljena izolaciona moć takvog staklenog okna. Kada se spoljašnja saobraćajna buka sa slike 6.6 prenese kroz pretpostavljenu fasadnu pregradu proračunate izolacione moći, dobija se buka u prostoriji. Izračunati spektri su prikazani na Slici 6.7. Oni su monotono opadajući, uz odstupanje u opsegu frekvencija između 2 kHz i 5 kHz. Porast spektralnog nivoa u tom opsegu posledica je uticaja frekvencije koincidencije pretpostavljenog staklenog okna koja smanjuje vrednost izolacione moći.



Slika 6.7 Spektri unutrašnje buke na četiri merne lokacije (MO, CN, BL i IG), proračunati na osnovu metoda korekcije izolacione moći monolitnih pregrada.

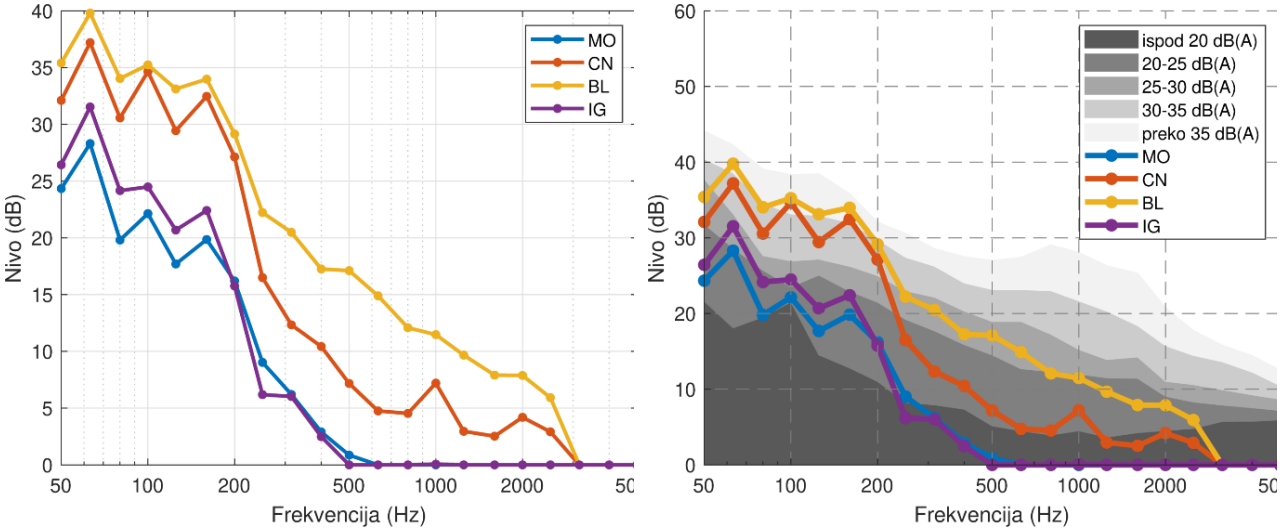
Kada se dobijeni spektri buke u prijemnoj prostoriji uporede sa definisanim klasama izmerenih izolacionih moći u stanovima dobija se grafik koji je prikazan na Slici 6.7 b. Sa slike se primećuje da osim maksimuma koji se pojavljuju usled efekta koincidencije, postoje i izvesne razlike u nagibu proračunatih krivih u odnosu na izmerene. Ova razlika se može objasniti činjenicom da su merenja na osnovu kojih je urađena klasifikacija ambijentalne buke obavljena u novoizgrađenim objektima u

kojima fasadne pregrade uglavnom nemaju monolitne staklene elemente, već složene pakete stakla koje nameće energetska efikasnost.

Ukoliko se umesto monolitne pregrade na fasadi pretpostavi neka složena struktura za koju ne postoji analitički obrazac, za predikciju ambijentalne buke u prostorijama može se primeniti drugi metod za određivanje ispoljene izolacione moći. On podrazumeva primenu korekcionih faktora za izmerene laboratorijske vrednosti izolacione moći. Korekcioni faktori za svaku lokaciju proračunati su na osnovu izmerene ugaone raspodele incidentne energije uz pomoć mikrofonskog niza i odgovarajućom prostorno-vremenskom obradom registrovanih signala. Za ilustraciju ove metode pretpostavljen je fasadni prozor prikazan u poglavlju 4 (drugi red u tabeli 4.1). On ima stakleno okno ukupne debljine 34 mm sa sledećom strukturom:

- staklo 8 mm (laminirano)
- međuprostor 20 mm punjen argonom
- staklo 6 mm.

Rezultati proračuna nivoa buke u prijemnoj prostoriji za usvojenu fasadnu pregradu na četiri odabrane urbanističke lokacije prikazani su na Slici 6.8 a. Upoređujući rezultate sa slika 6.7 a i 6.8 a vidi se da su sa pretpostavljenim prozorom nivoi unutrašnje buke u određenim frekvencijskim opsezima niži i do 20 dB u odnosu na monolitno stakleno okno iz prethodnog primera. Ovo je očekivan rezultat s obzirom da prozor usvojen u primeru ima merodavnu vrednost laboratorijske izolacione moći 40 dB.



a) b)

Slika 6.8 Spektri unutrašnje buke na četiri merne lokacije MO, CN, BL i IG, proračunati na osnovu metoda korekcije izolacione moći laboratorijskih vrednosti kompleksni pregrada.

Poređenje dobijenih rezultata sa izmerenim stanjem buke u stanovima prikazano je na Slici 6.8 b. Na ovom grafiku se može uočiti da nivoi ambijentalne buke dobijeni predikcijom približnije odgovaraju definisanim klasama. Na osnovu toga bi se mogao izvesti zaključak da se na analiziranim lokacijama u gradu, u unutrašnjosti nekog novoizgrađenog objekta sa pretpostavljenom strukturom prozora može očekivati nivo ambijentalne buke koji pripadaju sledećim klasama: Lokacije MO i IG – klasa „20-25 dB(A)“, lokacija CN – klasa „25-30 dB(A)“, lokacija BL – klasa „30-35 dB(A)“.

6.4 Diskusija

Iz prikazanih rezultata proizilazi nekoliko zaključaka značajnih za temu privatnosti u stanovima.

1. Nivo ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova niži je od maksimalno dozvoljene vrednosti koja je za period noći 30 dB(A), što je propisano za period noći [16]. Rezultati u 27% merenja su ispod 25 dB(A), a čak u 12% merenja dobijena je vrednost ispod 20 dB(A), što se može smatrati „ekstremnom tišinom".

2. Uslovi „ekstremne tišine" sa nivoom ambijentalne buke ispod 20 dB(A) otkrivani su u novim zgradama. U njima je zbog zahteva energetske efikasnosti kao prateći efekat postignuta izuzetno dobra zvučna izolovanost od spoljašnje sredine. Dvoslojni i troslojni paketi stakla na fasadnim otvorima (prozori, balkonska vrata) imaju često u zbiru više od 2 cm stakla, čime je postignuta takva izolovanost.

3. Dobijeni rezultati merenja nivoa buke nameću potrebu preispitivanja važećih kriterijuma za građevinsku izolacionu moć pregradnih konstrukcija između stanova. Propisana minimalna vrednost građevinske izolacione moći pregrade između dva stana u mnogim državama je 52 dB [26]. Pri toj vrednosti i sa nivoom ambijentalne buke u boravišnim prostorijama ispod 20 dB(A) indeks privatnosti govora je najviše 70 dB.

4. Prema klasifikaciji iz literature prikazanoj u Tabeli 2.1 okolnosti u kojim je $IPG \leq 70$ dB ukazuju na dobru čujnost komšijskih aktivnosti: „zvuk govora često čujan, kratke izgovorene fraze su ređe razumljive" [40]. To pokazuje da minimalno zahtevana vrednost izolacione moći pregrada između susednih stanova i između stanova i zajedničkih prostora od 52 dB, što se danas usvaja u najvećem broju projekata kao kriterijum u projektovanju, nije dovoljna da se obezbedi privatnost.

5. Dobijeni rezultati merenja ambijentalne buke u stanovima otvaraju više tema za istraživanje. To su na primer:

- analiza putanja prolaska zvuka iz spoljašnje sredine u boravišne prostorije da bi se u fazi projektovanja omogućila predikcija stanja buke,
- predikcija nivoa ambijentalne buke u boravišnim prostorijama stanova u zavisnosti od zadate lokacije projektovane zgrade,
- analiza mogućnosti primene elektroakustičkih sredstava za popravljanje uslova privatnosti kada se to ne može postići građevinskim sredstvima.

6. Rezultati predikcije ambijentalne buke na osnovu ugaonih raspodela izmerenih mikrofonskim nizom pokazuju dobro poklapanje sa realnim izmerenim nivoima ambijentalne buke kada se razmatraju fasadne pregrade zastupljene u savremenoj izgradnji. Metoda predikcije zasnovana na primeni korekcionih faktora pokazala je dobro slaganje sa izmerenim vrednostima.

7 Analiza stanja privatnosti u boravišnim prostorijama

Zakonska regulativa u svim državama, pa i u Srbiji, prepoznaje problem zaštite od buke u zgradama propisujući maksimalno dopuštene vrednosti ekvivalentnog nivoa ambijentalne buke u prostorijama, smatrajući da će time biti obezbeđen zvučni komfor. Međutim, u praksi se pokazalo da ekstremno niski nivoi ambijentalne buke u prostorijama, u nekim čak daleko ispod propisane maksimalne granice, takođe mogu stvoriti uslove za degradaciju zvučnog komfora, pre svega za narušavanje privatnosti kao njegove najvažnije dimenzije. Takve okolnosti uglavnom nastaju kao posledica dva uzroka: savremenih promena u načinu gradnje zahvaljujući stalnim tehnološkim inovacijama i zahteva energetske efikasnosti zgrada.

U takvim okolnostima prepoznat je jedan akustički paradoks u kome destrukcija zvučnog komfora može nastati premašenjem maksimalno dopuštenih vrednosti nivoa ambijentalne buke u prostorijama, ali takođe i preterivanjem u njenom potiskivanju značajno ispod utvrđenog maksimuma, kao što je to slikovito ilustrovano opisanim primerom u poglavlju 2. Može se reći da nedovoljna, ali i prekomerna tišina stvaraju uslove za narušavanje zvučnog komfora. Taj paradoks šematski je ilustrovan na slici 7.1. Slikovito je naznačena mogućnost ugrožavanja zvučnog komfora pri suviše visokim, ali i pri ekstremno niskim nivoima buke u prostorijama. Ilustracija na slici pokazuje da postoje gornja i donja granica nivoa ambijentalne buke u okviru kojih se može postići zvučni komfor primenjujući standardna, rutinska rešenja zvučne izolacije.



Slika 7.1 Šematska ilustracija problema sa prekomerno niskim i prekomerno visokim nivoom ambijentalne buke u prostorijama i principi njihovog prevazilaženja

Normativi koji propisuju minimalno zahtevane vrednosti izolacione moći pregrada u zgradi polaze od dve pretpostavke: o pretpostavljenim nivoima buke u susednim prostorijama iz kojih dolazi takozvana „buka suseda“, što je zvuk koji određuje stanje privatnosti, i o očekivanim vrednostima nivoa ambijentalne buke koji je su skladu, preciznije rečeno blizak sa maksimalno dozvoljenim vrednostima. Pretpostavka je da zadovoljenje te dve pretpostavke pruža adekvatan nivo zvučnog komfora.

Zvuk u stanovima, osim govorne komunikacije, nastaje odvijanjem različitih uobičajenih aktivnosti: radom kućnih uređaja, glasanjem kućnih ljubimaca, dečijom igrom, a moguće je i da se u kućnim uslovima vežba sviranje muzičkih instrumenata. Takođe promene u načinu života kao što su pomeranje granica između noćnih i dnevnih aktivnosti, *online* rad u noćnim časovima, široka dostupnost i korišćenje multimedijalnih sistema, upotreba relativno moćnih sistema za reprodukciju zvuk i slično učinili su da polazna pretpostavka o mogućem nivou zvuka kod „suseda“ nije ispunjena. Najzad, sve češće se prave zgrade u kojim se prepliću raznorodni sadržaji, stambeni, poslovni, hotelski, ugostiteljski i slično, pa sve češće sastavni deo stambenih zgrada postaju razni ugostiteljski sadržaji. Neka ranija istraživanja su pokazala da je u prostorima „suseda“ moguća pojava visokih nivoa zvuka. Sve to doprinosi da se realni nivoi zvuka u zgradama razlikuju od polazne pretpostavke koja je važila pri izradi građevinskih normativa. Tada se otvaraju novi problemi zvučnog komfora koji se moraju rešavati uvođenjem nekih dodatnih uslova.

Da bi se bolje definisali dodatni uslovi, osim analize postojećih i predikcije očekivanih nivoa ambijentalne buke u stambenim zgradama, u ovoj disertaciji su sprovedena istraživanja čiji je cilj bio sagledavanje:

- realnog nivoa zvuka u prostorijama pri različitim ljudskim aktivnostima u stanovima,
- nivoa zvuka u prostorima raznih drugih sadržaja koji se mogu graničiti sa stambenim ili poslovnim prostorima,
- spektralnih i intenzitetnih svojstava zvuka govora pri različitom intenzitetu izgovaranja (od tihog do vikanja).

U ovom poglavlju prikazani su rezultati takvih istraživanja.

Važeći normativi propisuju minimalnu vrednost građevinske izolacione moći pregrada između prostora različitih korisnika $R'_w \geq 52$dB, U ovoj disertaciji je analiziran je stepen primetnosti zvukova koji dopiru iz neke susedne prostorije koja je odvojena zidom izolacione moći 52 dB, a pri različitim nivoima ambijentalne buke na mestu slušanja. Kao osnov za analizu primetnosti usvojene su granice preporučene u nemačkom standardu VDI 4100 [91].

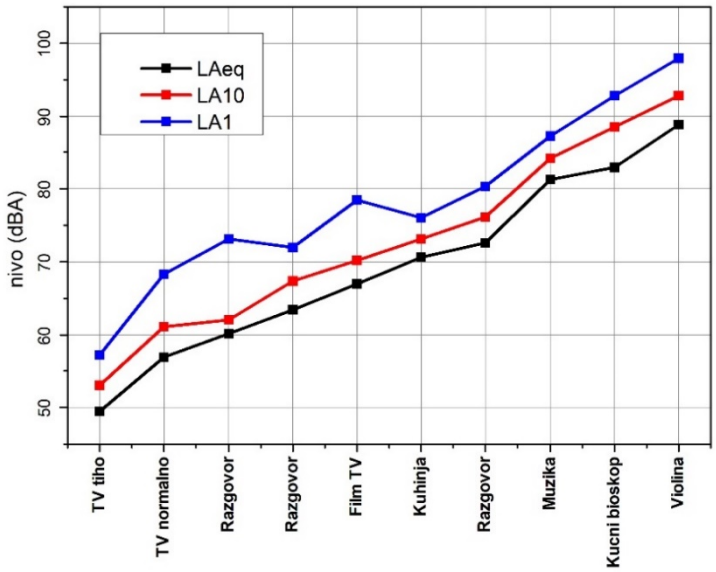
7.1 Očekivani nivoi buke u prostorijama – „buka suseda“

Prema rezultatima istraživanja sprovedenim u više zemalja Evropske unije [92], [15] buka suseda predstavlja drugi po važnosti izvor uznemiravanja ljudi, posle saobraćajne buke koja potiče is spoljašnje sredine. U kontekstu očuvanja privatnosti i odsustva uznemiravanja bukom ove dve vrste buke imaju suprotne uloge u zaštiti privatnosti. Prisustvo spoljašnje buke unutar boravišnih prostorija doprinosi maskiranju „buke suseda“, sve dok njen nivo ne prevaziđe vrednost koje ometaju normalne aktivnosti čoveka.

U okviru aktivnosti Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu u dužem vremenskom periodu vršeno je kalibrisano snimanje buke koja nastaje u boravišnim ili drugim prostorima unutar zgrada. Snimljeni signali nose informacije o karakteru i mogućim nivoima „buke suseda“ i poslužili su za ciljana istraživanja u okviru ove disertacije. Interesovanje za ovu temu proisteklo je iz problema koji su se javili u inženjerskoj praksi projektovanja zgrada, a posebno na osnovu prigovora koji su dolazili na adresu nadležnih organa zaduženih za zaštitu od buke. Zahvaljujući tome napravljena je velika baza snimaka od kojih su neki iskorišćeni ovde za analizu.

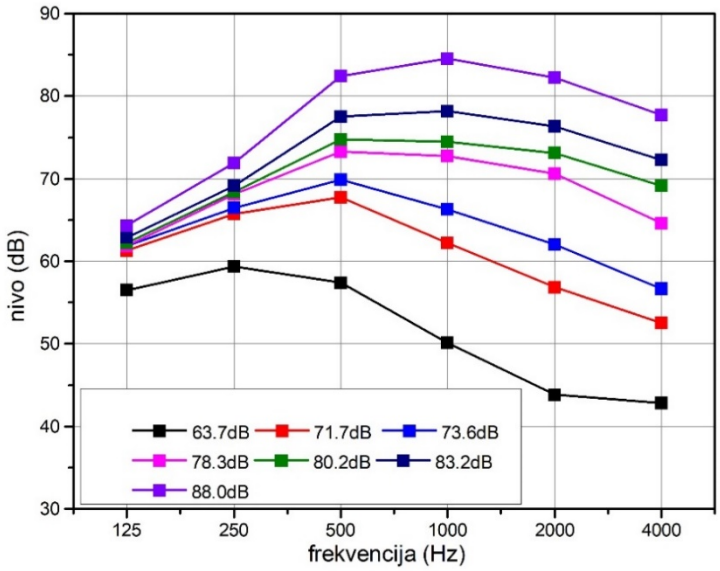
Kada se govori o zaštiti privatnosti i buci suseda kao glavni izvor buke javlja se međuljudska govorna komunikacija i svi događaji u prostorijama koji uključuju taj vid komunikacije. Kao što je objašnjeno u uvodnim poglavljima disertacije, govorni signal nosi lako detektabilan i prepoznatljiv informacioni sadržaj koji skreće pažnju, omogućava čulu sluha da se na njega skoncentriše i da ga prepozna, čime se automatski narušava koncept privatnosti. Drugi izvori buke u susedstvu mogu biti razne aktivnosti unutar domaćinstava koji uključuju aktivnosti u kuhinji, igranje dece, slušanje muzike i TV-a,

sviranje instrumenata i slično [34], [35]. Najzad, treću grupu značajnih izvora buke u stambenim zgradama koja može da dospeva u boravišne prostorije čini buka ugostiteljskih objekata.



Slika 7.2 Nivoi zvuka pri standardnim aktivnostima u stanu izražene preko ekvivalentnog nivoa u LA_{eq}, LA_{10} i LA

Iz baze kalibrisanih snimaka koji su prikupljeni u Laboratoriji za akustiku za potrebe ove analize izdvojeni su signali snimljeni tokom nekih karakterističnih aktivnosti u stanovima. Rezultati su prikazani na Slici 7.2. Aktivnosti su predstavljene svojom ekvivalentnom vrednošću nivoa buke u prostoriji gde se to odvija L_{Aeq}, kao i parametrima L_{A10}, L_{A1}.(vrednosti premašene u 1%, odnosno 10 % vremena trajanja zvučnog događaja). Regulativa koja utvrđuje minimalna izolaciona svojstva pregrada u zgradama definisana je u odnosu na očekivane nivoe zvuka u prostorijama koji ne premašuju 75 dB(A). Iz rezultata analize prikazane na slici 7.2 uočljivo je da postoje aktivnosti u stanovima koje po nivou zvuka koji stvaraju premašuju te vrednosti.

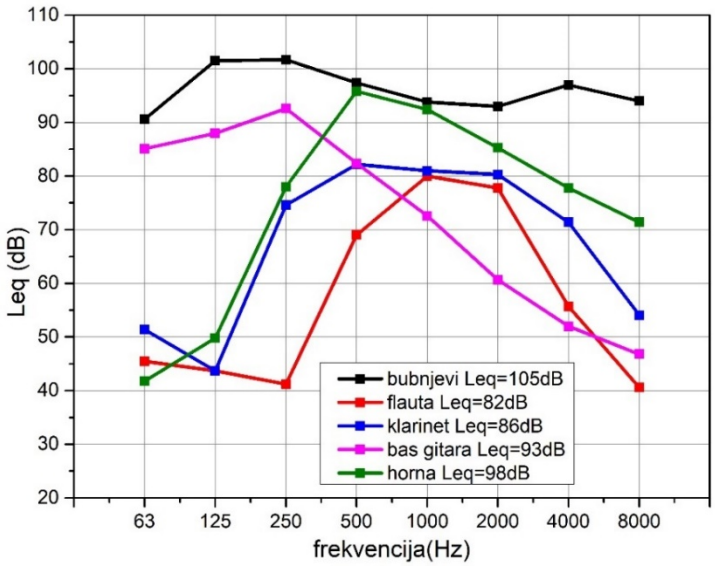


Slika 7.3 Nivoi govornog signala pri različitim nivoima glasnosti

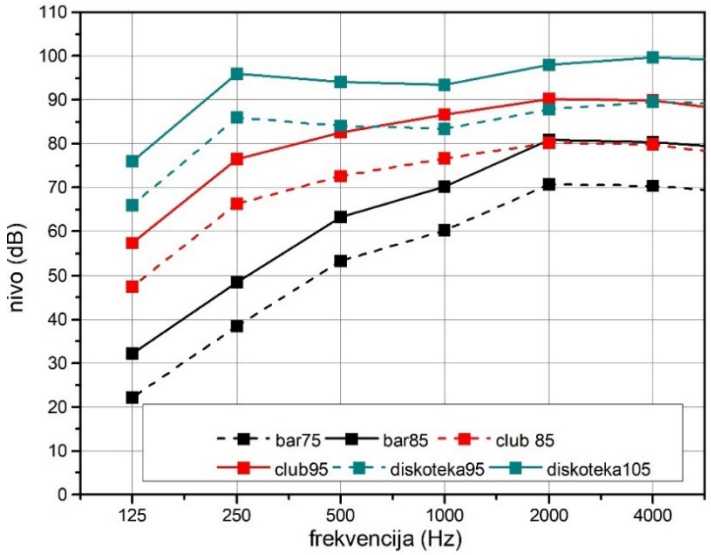
U razmatranju privatnosti specifičan problem su govorne komunikacije suseda jer njihov prepoznatljiv informacioni sadržaj nameće prinudnu koncentraciju na taj zvuk. Na slici 7.3 prikazani su oktavni spektri govornog signala kada se izgovara sa različitom glasnoćom [93]. Eksperiment je podrazumevao da jedna ženska osoba čita isti tekst sa različitom jačinom. Sa dijagrama se vidi da je ekvivalentni nivo glasa pri tome varirao u rasponu od 64 dB do 88 dB. Dijagram takođe pokazuje da

se s promenom jačine govora menja i njegov spektralni sastav i dolazi do relativnog povećanja nivoa na višim frekvencijama.

Česta je pojava u stambenim zgradama da neko u okviru kućnih aktivnosti vežba sviranje nekog muzičkog instrumenta, kao na primer deca koja pohađaju muzičku školu. Činjenica je da savremeni muzički instrumenti mogu da proizvedu veliku zvučnu snagu, što ih svrstava u jače izvore zvuka koji se mogu naći u zgradama. Na slici 7.4 prikazani su oktavni spektri zvuka koji nastaje prilikom sviranja različitih muzičkih instrumenata.



Slika 7.4 Nivoi zvuka pri sviranju različitih instrumenata

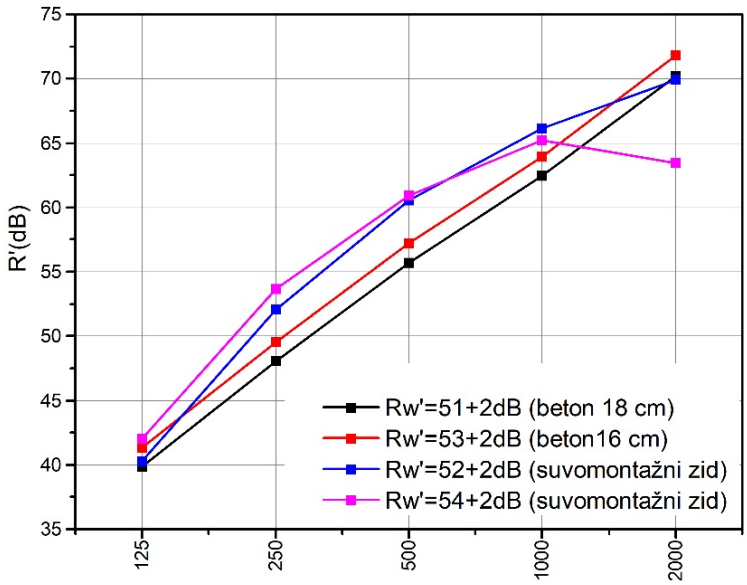


Slika 7.5 Oktavni spektri zvuka snimljenog u ugostiteljskim objektima različitih namena

Praksa u savremenoj izgradnji i urbanizmu uvela je pojavu da se u stambenim i poslovnim zgradama često pojavljuju različiti ugostiteljski sadržaji koji se graniče sa prostorima drugih namena, pa i sa stanovima. Na slici 7.5 prikazani su oktavni spektri zvuka koji su izmereni u ugostiteljskim objektima različitog tipa [94].

7.2 Stanje privatnosti pri standardnim vrednostima izolacione moći pregradih konstrukcija

Prema postojećoj zakonskoj regulativi minimalna izolaciona moć od vazdušnog zvuka između različitih korisnika bilo da se radi o stambenim ili poslovnim objektima definisana je merodavnom građevinskom izolacionom moći R'_w=52 dB. U standardnoj građevinskoj praksi kao pregradne konstrukcije javljaju se armiranobetonski zidovi, zidovi od različitih opekarskih blokova i suvomontažni zidovi. Na slici 7.6 prikazana je građevinska izolaciona moć za nekoliko tipičnih pregrada.



Slika 7.6 Izolacione moći standardnih pregradnih konstrukcija koje zadovoljavaju minimalne merodavne vrednosti građevinske izolacione moći.

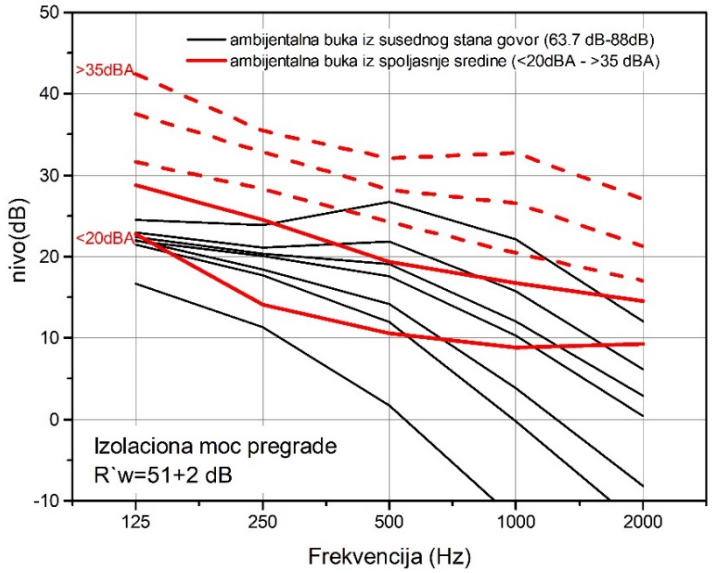
Za standardnu konfiguraciju prostorija koje deli pregradnog zida veličine 10 m^2 i sa pretpostavljenom apsorpcijom u prijemnoj prostoriji 10 m^2 proračunat je očekivani nivo buke koja dospeva iz susednog stana za različite nivoe zvuka govora u njoj. Kao parametra za poređenje uzete su izmerene vrednosti ambijentalne buke koja dospeva iz spoljašnje sredine. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 7.7. Proračun je izveden za betonsku pregradu debljine 16 cm za koju se proračunata merodavna građevinska izolaciona moć R'_w=51+2 dB. Za najniži nivo ambijentalne buke iz spoljašnje sredine govor iz susedne prostorije ima vrednosti u širem spektralnom opsegu koje premašuju nivo ambijentalne buke, tako da možemo reći da je govor primetan. Kako raste nivo ambijentalne buke tako je sve veći deo spektra govornog signala iz susedne prostorije maskiran ambijentalnom bukom tako da govor (pri najvišim nivoima) ostaje primetan. Možemo da konstatujemo da sa najnižim nivoima ambijentalne buke standardne minimalne vrednosti izolacionih moći pregradnih konstrukcija od R=52 dB neće zadovoljiti zahteve zvučnog komfora, odnosno zaštite privatnosti.

U građevinskoj praksi koriste se generalno dva tipa pregrada, masivne pregrade od teških građevinskih materijala i suvo montažne pregrade. Iako pregrade mogu imati iste merodavne građevinske izolacione moći, njihove spektralne karakteristike se razlikuju. Kao što se može videti na slici 7.6 suvo montažni zidovi imaju veću izolacionu moć u opsegu od 250 do 1000 Hz od masivnih zidova, ali imaju pad u izolacionim svojstvima na najnižim frekvencijama kao i na frekvencijama iznad 1000 Hz. To može imati posledice u različitoj primetnosti zvukova istih nivoa ali različitih spektralnih karakteristika zavisno od frekvencijske zavisnosti izolacione moći pregrada.

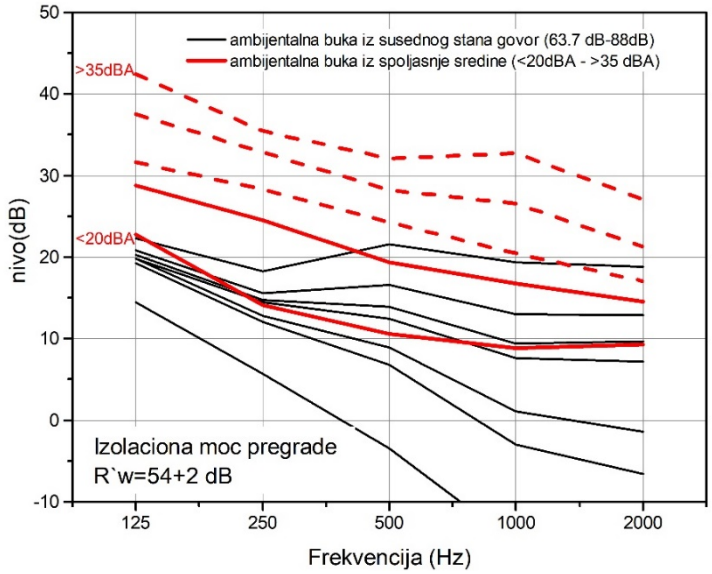
Na slici 7.8 prikazane su karakteristike govornog signala iz susedne prostorije kada je pregradni zid suvo montažni u odnosu na različite nivoe ambijentalne buke. Izabrani zid u zadatoj konfiguraciji prostorija ima merodavnu građevinsku izolacionu moć $R'w$=54+2 dB. U ovoj konfiguraciji i pri

najnižim nivoima ambijentalne buke ostaju perceptivno neprimetni i nešto viši nivoi govornog signala sve do približno 80 dB.

Na slikama 7.7 i 7.8 uočljivo je da se za pregradne konstrukcije čije se izolacione moći razlikuju za 3 dB uočavaju značajne razlike u pogledu ostvarena privatnosti u odnosu na govor različitog nivoa iz susednih prostorija. Prema tome, razlike u proceni ambijentalne buke u zavisnosti od lokacije objekta to jest konfiguracije urbanih zona prikazanih u prethodnim poglavljima, mogu imati značajan uticaj na stanje privatnosti u istim građevinskim okolnostima.



Slika 7.7 Nivoi ambijentalne buke iz susedne prostorije koja potiče od govora različitog nivoa u odnosu na različite nivoe ambijentalne buke iz spoljašnje sredine za pregradnu konstrukciju od armiranog betona debljine 16 cm, R'_w = 51+2 dB



Slika 7.8 Nivoi ambijentalne buke iz spoljašnje sredine u odnosu na ambijentalnu buku iz susedne prostorije za vrednost merodavne građevinske izolacione moći od R'_w = 54+2 dB tipične suvomotažne pregrade.

7.3 Ocena privatnosti za različita stanja nivoa ambijentalne buke

Potreba da se dodatno definišu potrebni uslovi za zadovoljenje svih aspekta zvučnog komfora koji uključuje i stanje privatnosti iskazana je u različitim zemljama kroz definisanje različitih klasa zvučne izolacije [92]. U preporukama VDI 4100 [91] definisane su, kroz tri klase zvučne izolacije, kategorije privatnosti u odnosu na različite tipove buke iz susednih prostora u uslovima niskog nivoa ambijentalne buke od 20 dBA. Tabela 4.1 preuzeta je iz pomenutog dokumenta.

Tabela 7.1 Opis mogućnosti (dometa) u percepciji buke iz susednih prostorija za tri klase zvučne izolacije pri nivou ambijentalne buke nivoa 20 dB(A).

	Tip buke	**Percepcija buke iz susednih prostorija drugog korisnika**		
		Nivo ambijentalne buke 20 dB(A)		
		Klasa 1	**Klasa 2**	**Klasa 3**
1	Glasan govor	Nejasno razumljiv	Jedva razumljiv	Generalno nije razumljiv
2	Povišen govor	Generalno jedva razumljivo	Generalno nije razumljivo	Nije razumljivo
3	Normalan govor	Generalno nije razumljiv	Nije razumljivo	Nije čujno
4	Zabava sa veoma glasnom muzikom	Veoma jasno čujno	Jasno čujno	Još uvek čujno
5	Glasna muzika, TV i radio	Jasno čujno	Još uvek čujno	Jedva čujno
6	Muzika normalnog nivoa	Još uvek čujno	Jedva čujno	Nečujno
7	Deca koja se igraju	Čujno	Još uvek čujno	Jedva čujno
8	Buka koraka	Generalno jedva uznemiravajuće	Generalno jedva uznemiravajuće	Nije uznemiravajuće
9	Buka korisnika	Čujno	Još uvek čujno	Generalno nije čujno
10	Buka servisnih instalacija	Uznemiravanje je generalno izbegnuto	Generalno nije uznemiravajuće	Nije ili samo selektivno uznemiravajuće
11	Buka kućnih uređaja	Još uvek čujno	Jedva čujno	Nečujno

Glavni kvantifikator nivoa čujnosti i razumljivosti govora određen je ukupnim odnosom nivoa postojeće ambijentalne buke koja potiče iz spoljašnje sredine i nivoa govornog signala, koji prolazi kroz sistem pregradnih konstrukcija u posmatrani prostor. Potpuna nečujnost se postiže kada je taj odnos 15 dB. Ako je taj odnos –10 dB može se smatrati da je govor gotovo perfektno razumljiv. U Tabeli 7.2 (preuzetoj iz [91]) prikazane su sukcesivno posledice različitih odnosa nivoa na čujnost i razumljivost govora. U tabeli su prikazani odnosi ukupnog nivoa. Svakako da i spektralne razlike imaju uticaja na stepen primetnosti govora, što u ovom trenutku nije razmatrano.

Tabela 7.2 Razumljivost i čujnost govora u susednim prostorima za različite odnose nivoa ambijentalne buke iz spoljašnje sredine i nivoa govora

	Čujnost i razumljivost govora koji dopire iz susednih prostora drugog korisnika	**ΔL (dB)**
1	Perfektno razumljivo	-10
2	Još uvek razumljivo	0
3	Generalno nije više razumljivo, ali je još uvek čujno (minimalna vrednost za zaštitu privatnosti)	3
4	Nije uopšte razumljivo	7
5	Nije razumljivo jedva čujno	10
6	Nije čujno	15

U različitim Evropskim zemljama usvojene su različite klasifikacione šeme sa različitim broja klasa (3-5). Kategorizacija je izvršena u odnosu na pojačane uslove za merodavna građevinska svojstva pregrada [92]. Razlike u izolacionim svojstvima koja se zahtevaju za više klase zvučnog komfora kreću se od 3–5 dB. Iako to nije eksplicitno definisano u svim dokumentima nacionalnih regulativa uvođenje klasa prouzrokovano je različitim nivoima ambijentalne buke koja potiče is spoljašnje sredine.

U nemačkim preporukama [91] eksplicitno je navedeno da su klase definisane u odnosu na nivo ambijentalne buke i nivo privatnosti koji se želi. U Tabeli 7.3 iskazani su kriterijumi za definisanje klasa zvučne izolacije.

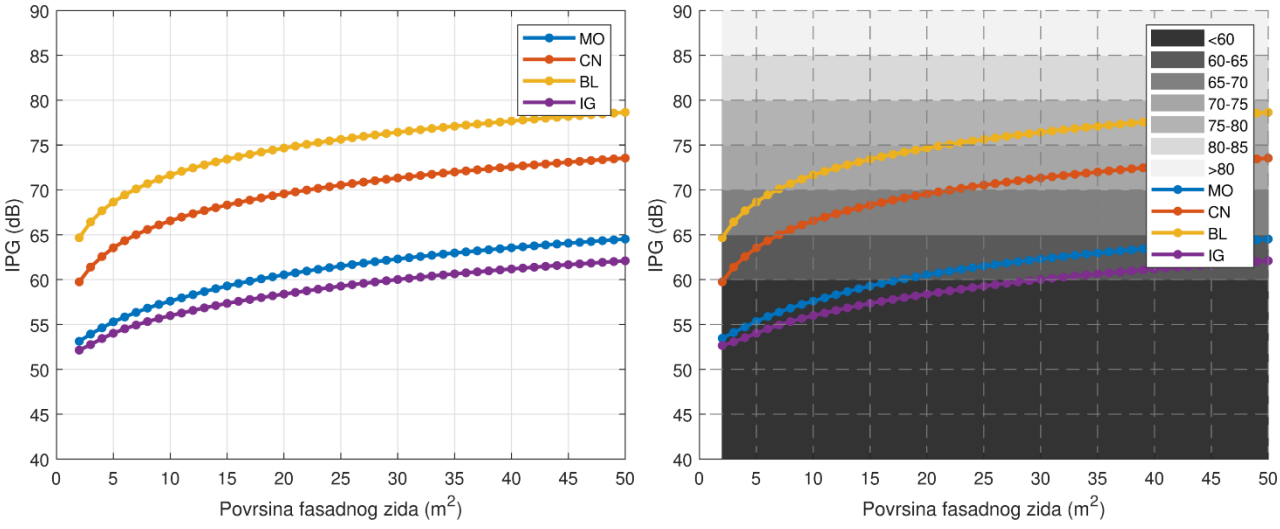
Tabela 7.3 Klase zvučne izolacije iskazane u odnosu na pretpostavljeni nivo govornog signala u susednim prostorima L_{WA}, nivo ambijentalne buke L_{GA} i zahtevanu razliku ovih nivoa za postizanje različitih nivoa privatnosti.

Klase	**Kvalitet zvučne izolacije između prostorija**	L_{WA} **(dB)**	L_{GA} **(dB)**	ΔL **(dB)**	$D_{nT,W}$ **(dB)**
1	Povećana zvučna izolacija	78	20	4	56
2	Dobra zvučna izolacija	78	20	7	59
3	Veoma dobra zvučna izolacija	78	18	10	64

Razlike koje određuju kvalitet zvučne izolacije kreću se koracima od po 3 dB. To potvrđuje polaznu hipotezu da je poznavanje, odnosno predikcija nivoa ambijentalne buke sa preciznošću od 3 dB veoma važan faktor u procesu projektovanja zgrada u kojima treba zadovoljiti kriterijume za određenu klasu zvučnog komfora.

7.4 Predikcija nivoa ambijentalne buke u različitim urbanim sredinama

Na osnovu metodologije predložene u ovoj disertaciji omogućena je predikcija nivoa ambijentalne buke, a samim tim i indeksa privatnosti u unutrašnjosti objekta u fazi projektovanja zgrada. Rezultati procene ambijentalne buke prikazani su u poglavlju 6 i upoređeni sa realnim izmerenim nivoima ambijentalne buke koja je merena u novoizgrađenim objektima. U situaciji sa Slike 6.5 uvedene su sledeće pretpostavke: prijemna i predajna prostorija su odvojene pregradom merodavne građevinske izolacione moći R'_w=52 dB i površine 10 m^2, apsorpcija u prijemnoj prostoriji 10 m^2, a površina fasadne pregrade je varirana. Na osnovu proračunatih nivoa ambijentalne buke proračunava se očekivani nivo privatnosti prema izrazu 2.5.



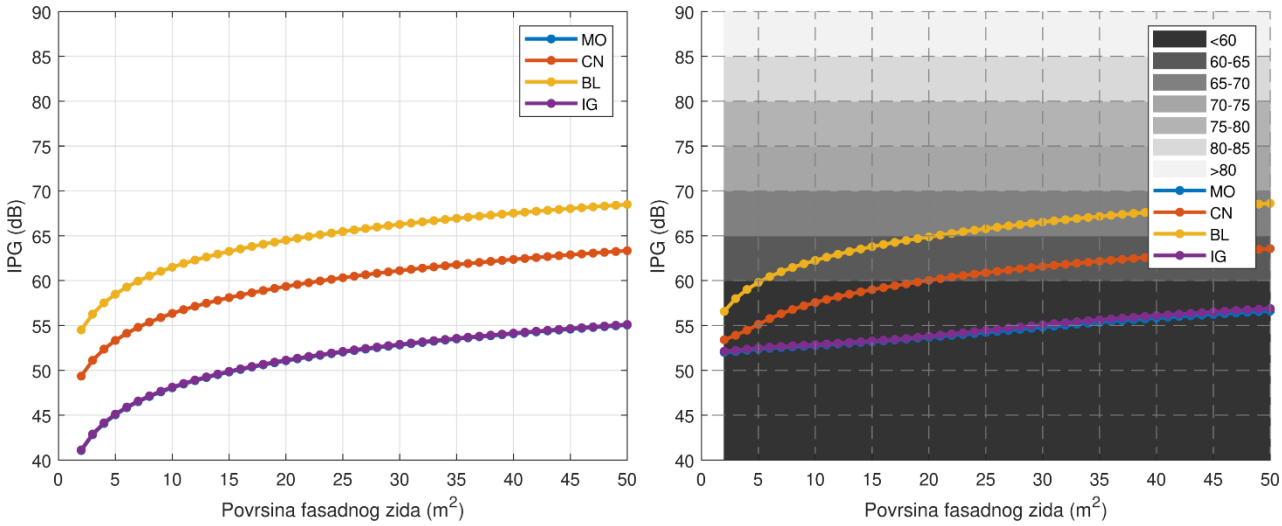
a) b)

Slika 7.9 Zavisnost IPG od površine fasadne pregrade na četiri lokacije: MO, CN, BL i IG. Pretpostavljena fasadna pregrada – monolitno staklo debljine 6 mm.

Na Slici 7.9 prikazana je zavisnost proračunatog indeksa privatnosti od dimenzije fasadne pregrade u opisanoj situaciji za slučaj monolitne pregrade debljine 6 mm. Na Slici 7.9 b je su osenčene klase privatnosti izložene u Poglavlju 2. Ako se pođe od pretpostavke površine fasadne pregrade od 10 m^2 i proračunatim nivoima privatnosti dodele opisi stanja iz tabele 2.1, dolazi se do sledećih rezultata prema lokacijama, poređano po redosledu od najvišeg ka najnižem nivou privatnosti:

- BL – 70≤IPG≤75 – zvuk govora retko čujan, govornik suštinski nerazumljiv (kratke fraze čujne najviše jednom u 15 minuta);
- CN - 65≤IPG≤70 – zvuk govora često čujan, (kratke izgovorene fraze su ređe razumljive);
- MO, IG - IPG≤60 – govor je skoro uvek čujan i često se razume.

Na Slici 7.10 prikazana je analiza sprovedena na osnovu drugog predloženog metoda korekcije izolacione moći koji se primenjuje na laboratorijske vrednosti višeslojnih konstrukcija. Korišćen je isti tip višeslojne pregrade kao u primeru u Poglavlju 6 (fasadna pregrada ukupne debljine 34 mm sa sledećom strukturom: okvir poliester + drvo, okno 8 (laminirano)/20 (argon)/6.



a) b)

Slika 7.10 Zavisnost IPG od površine fasadne pregrade na četiri lokacije: MO, CN, BL i IG. Pretpostavljena fasadna pregrada – višeslojna konstrukcija: okvir poliester + drvo, okno 8 (laminirano)/20 (argon)/6

Kada se proračunate vrednosti indeksa privatnosti uporede sa klasifikacijom, za pretpostavljenu fasadnu pregradu površine 10 m^2, dobijaju se sledeći rezultati:

- BL – 60≤IPG≤65 – zvuk govora uglavnom čujan, (kratke izgovorene fraze se povremeno razumeju);
- MO, CN, IG - IPG≤60 – govor je skoro uvek čujan i često se razume.

U prikazanom primeru, dobijene vrednosti indeksa privatnosti govora pripadaju najnižoj klasi stanja privatnosti za tri od četiri merne lokacije. Metodologija predložena u ovom radu omogućava izvođenje nekoliko praktičnih zaključaka:

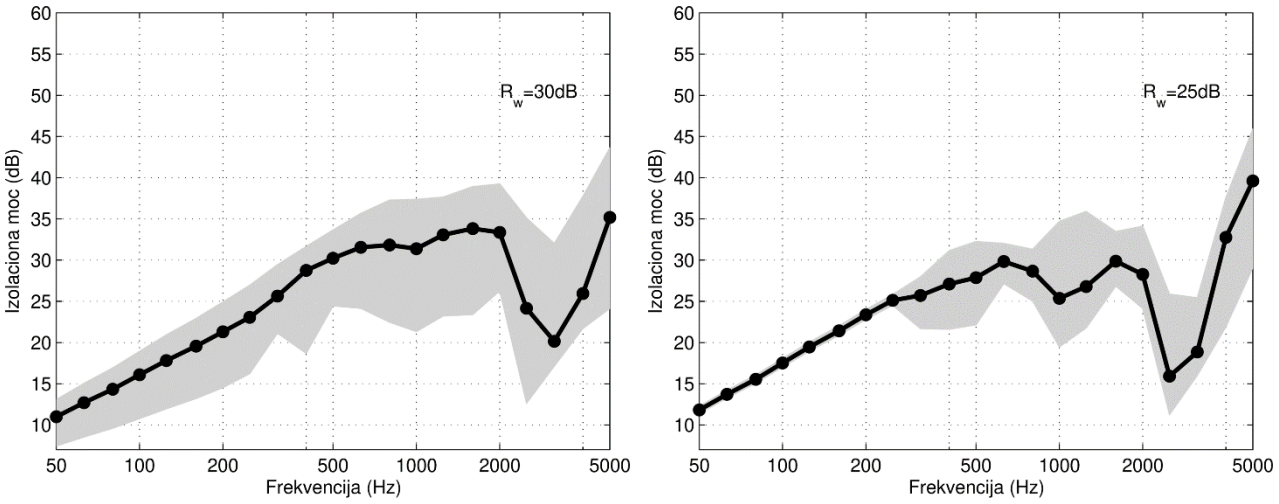
- Dobijeni rezultati se mogu koristiti kao ulazni podatak u odabiru građevinskih elemenata i njihovoj strukturi kako bi se stanje privatnosti poboljšalo.
- Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 7.10 b, za datu situaciju i zadatu fasadnu pregradu, može se očitati koliko je potrebno povećati izolaciju pregradnog zida u cilju postizanja višeg nivoa privatnosti.
- Moguće je proceniti varijaciju u stanju privatnosti različitih prostorija objekta koji imaju istu strukturu fasadne pregrade, ali različitu površinu.
- Moguće je izvršiti predikciju očekivanog stanja privatnosti za projektovane objekte u skladu sa tipom urbane lokacije.

7.5 Procena varijabilnosti indeksa privatnosti na osnovu analize ključnih događaja

U analizi prikazanoj u poglavlju 5.4 objašnjeno je da se globalna struktura ugaone incidencije na određenoj lokaciji može posmatrati kao superpozicija struktura incidencije pojedinačnih događaja koji se na datoj lokaciji mogu desiti. Pri tome, pretpostavka je da različiti tipovi događaja imaju približno iste karakteristike u spektralnom sadržaju buke koju emituju, u prostornoj strukturu pozicije izvora, u nivou zvuka koji emituju i slično. Prikazana je analiza na ulici u kojoj su kao nezavisni tipovi događaja izdvojeni prolasci vozila u oba smera saobraćajnice, prolasci trolejbusa javnog gradskog prevoza i analiza zvuka ambijenta u kome nema prepoznatljivih i izdvojivih karakterističnih događaja jer potiču od udaljenih izvora zvuka.

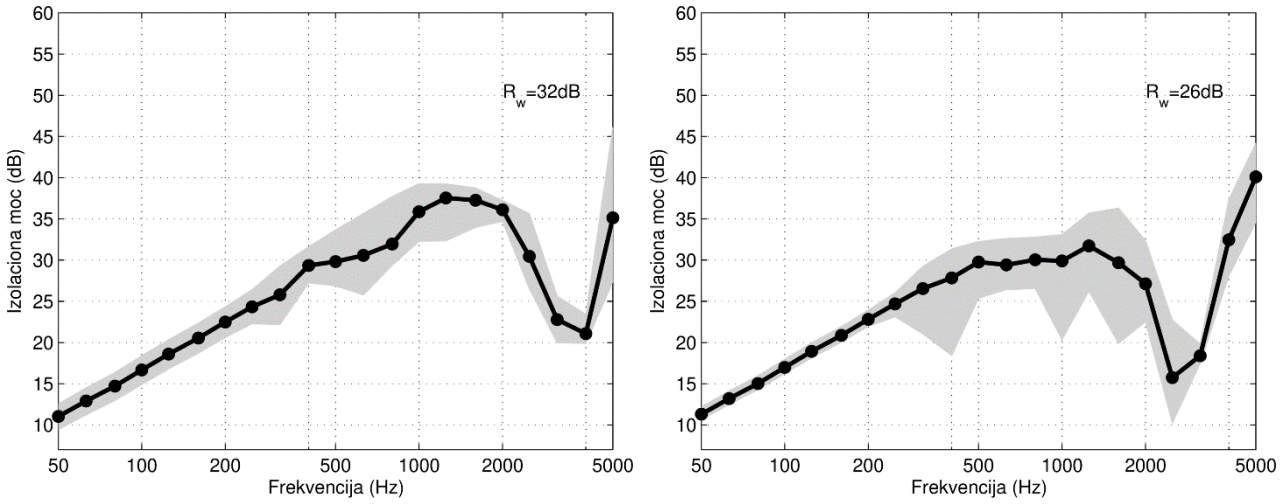
Ovakva analiza nametnula je kao temu istraživanja uticaj promenljivosti zvučnog ambijenta na indeks privatnosti u zgradama. Sprovedena je analiza za dve merne lokacije: Molerova ulica (MO) i ulica Cara Nikolaja (CN). Posmatrajući generalno, zvučni ambijent na svakoj lokaciji može se posmatrati kao sukcesivni sled događaja različitog tipa, pri čemu promena srednjeg nivoa buke zavisi od međusobne razlike u nivoima po tipovima događaja. U pojednostavljenoj analizi za dve pomenute lokacije zvučni ambijent se može posmatrati kao smenjivanje događaja tipa „prolazak vozila“, i segment „opšta ambijentalna buka“ koja potiče od udaljenih izvora. Na obe lokacije analizirano je po 10 događaja oba tipa.

Analiza polazi od razlike u ugaonim raspodelama različitih tipova događaja na prikazanim lokacijama koje imaju za posledicu različite ispoljene izolacione moći fasadnih pregrada. Na Slikama 7.11 i 7.12 prikazane su izolacione moći pretpostavljene monolitne staklene pregrade debljine 6 mm (okno prozora) na lokacijama MO i CN, proračunate na osnovu raspodela koje su dobijene analizom ključnih događaja. Na graficima su crnom linijom ucrtane usrednjene krive izolacione moći dobijene usrednjavanjem krivih proračunatih za svaki od događaja ponaosob. Senčenjem su označeni gabariti odstupanja za sve analizirane događaje.



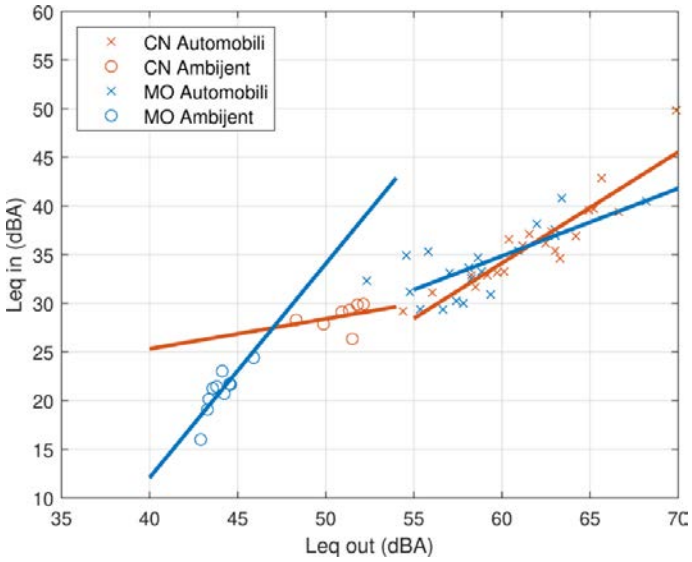
Slika 7.11 Izolacione moći proračunate za fasadnu pregradu debljine 6 mm na lokaciji Molerova, za dva tipa događaja: a) Prolasci automobila, b) Ambijent.

Iz prikazanih rezultata se zaključuje da na obe analizirane lokacije ugaona raspodela u slučaju prolaska automobila rezultuje višim vrednostima ispoljene izolacione moći. Na lokaciji MO, usrednjena jednobrojna vrednost u slučaju prolazaka automobila iznosi 30 dB, dok usrednjena vrednost u slučaju događaja tipa ambijent iznosi 25 dB. Slična razlika se dobija i na lokaciji CN i iznosi 6 dB. Ovakva razlika je uzrokovana drugačijom ugaonom raspodelom incidencije zvuka za dva tipa događaja. Na graficima se takođe može uočiti da je varijabilnost proračunate izolacione moći različita od lokacije do lokacije, i između tipova događaja. Najveća odstupanja postoje na lokaciji Molerove ulice, gde u pojedinim frekvencijskim opsezima ona imaju vrednosti do 10 dB.



Slika 7.12 Izolacione moći proračunate za stakleno okno debljine 6 mm na lokaciji Cara Nikolaja za dva tipa događaja: a) prolasci automobila, b) ambijent.

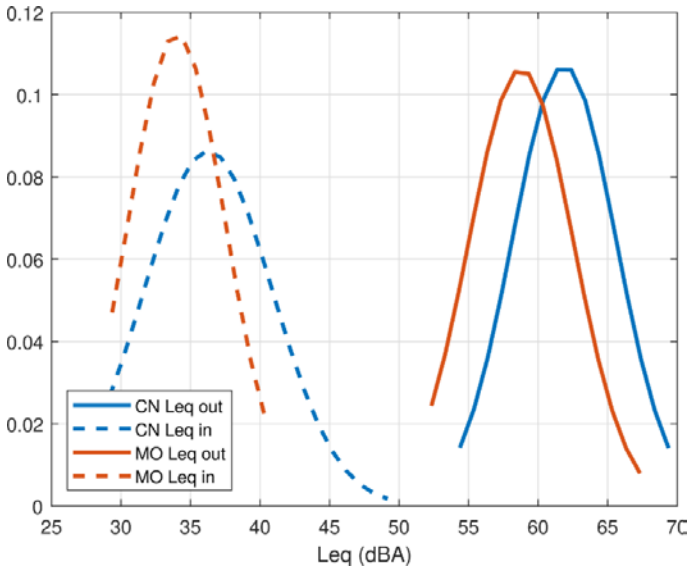
Za sve analizirane događaje izračunate su vrednosti ekvivalentnih nivoa spolja $L_{eq,out}$ i za njih odgovarajuće vrednosti $L_{eq,in}$ u unutrašnjosti prostorije. Pretpostavljena je površina fasadne pregrade od 10 m^2 i apsorpcija unutar prijemne prostorije od A = 10 m^2. Prilikom proračuna nivoa zvuka u prostoriji $L_{eq,in}$ za svaki događaj korišćena je izolaciona moć koja odgovara prostornoj raspodeli tog događaja. Na Slici 7.13 prikazan je *scatter* plot zavisnosti $L_{eq,in}$ od $L_{eq,out}$ za sve događaje na ove dve lokacije.



Slika 7.13 Zavisnost $L_{eq,in}$ od $L_{eq,out}$ na lokacijama MO i CN za dva tipa događaja.

Na slici se može uočiti da je spoljašnji nivo ambijenta $L_{eq,out}$ viši na lokaciji CN u proseku za oko 6 dB. Kada se posmatraju vrednosti nivoa u prostoriji $L_{eq,in}$ nakon prolaska kroz fasadnu pregradu, vidi se da se na posmatranim lokacijama dešavaju dva oprečna efekta. Na lokaciji CN varijansa vrednosti $L_{eq,in}$ se smanjuje, dok se na lokaciji MO povećava. Ovo je na grafiku označeno pravama linearne regresije, gde veći nagib prave označava veće rasturanje vrednosti nakon prolaska kroz fasadnu pregradu. Na primer, na lokaciji MO razlike između maksimalne i minimalne vrednosti ekvivalnentnog nivoa spolja za događaj tipa ambijent su 3 dB. Nakon prolaska kroz pregradu, razlika između maksimalnog i minimalnog ekvivalentnog nivoa je 10 dB. Za događaje prolaska automobila, dešava se suprotan efekat. Na lokaciji MO smanjuju se gabariti odstupanja, dok se na lokaciji CN povećavaju.

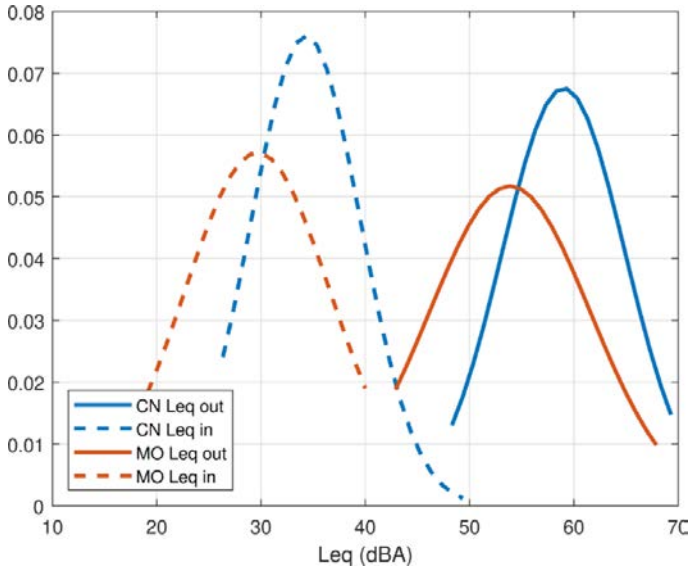
Za slučaj događaja prolaska automobila, ovaj rezultat je prikazan i na Slici 7.14. Na slici se može uočiti da su varijanse vrednosti ekvivalnentnog nivoa spolja slične za oba tipa lokacije, sa nešto višim srednjom vrednošću na lokaciji CN.



Slika 7.14 Gustina raspodele vrednosti $L_{eq,in}$ i $L_{eq,out}$ na lokacijama MO i CN za događaj prolaska automobila.

Na Slici 7.15 se može uočiti da se prilikom prolaska kroz fasadnu pregradu na lokacijama MO i CN dešavaju suprotni efekti. Na lokaciji CN, dešava se povećanje varijanse, dok se na lokaciji MO varijansa smanjuje. Međusobni odnosi srednjih vrednosti ekvivalnentnog nivoa su slični kao i kod spoljašnjeg ekvivalnentnog nivoa.

Prikazane razlike u delovanju na raspodelu nivoa na dve lokacije su direktna posledica različitih ugaonih raspodela incidentne energije koje su izmerene mikrofonskim nizom. Ukoliko se ovaj rezultat tumači sa stanovišta ambijentalne buke u unutrašnjosti prostorije, može se zaključiti da će se na lokaciji MO desiti smanjivanje razlika između pojedinačnih događaja, odnosno dobiti ustaljena vrednosti unutrašnje ambijentalne buke sa manjim varijacijama u odnosu na lokaciju CN. Diferenciranje različitih lokacija po ovom kriterijumu dovodi do saznanja o još jednoj dimenziji kompleksnog problema procene ambijentalne buke. Ukoliko se zbirno posmatraju gustine raspodele za oba tipa događaja, na obe lokacije se ispoljava isti efekat smanjivanja varijanse, koji je nešto izraženiji na lokaciji CN.



Slika 7.15 Gustina raspodele vrednosti $L_{eq,in}$ i $L_{eq,out}$ na lokacijama MO i CN zbirno za oba tipa događaja

9 Zaključak

Ova disertacija objedinjuje skup istraživanja iz nekoliko oblasti sa ciljem da se razvije metodologije za predikciju stanja privatnosti u zgradama, uzimajući pri tome u obzir različite faktore koji na to mogu imati nekog uticaja. Stanje privatnosti u zgradama kvantifikuje se numeričkim parametrom koji se naziva indeks privatnosti govora (IPG). On je definisan kao zbir vrednosti ekvivalnentnog nivoa ambijentalne buke u prostoriji i izolacione moći pregrada koje tu prostoriju štite od zvukova iz okoline i koji potencijalno narušavaju privatnost ljudi.

Metodologija korišćena u realizovanim istraživanjima najvećim delom je zasnovana na primeni mikrofonskih nizova i prostorno-vremenske obrade signala kao alata za uvid u strukturu zvučnog polja koji napada fasade zgrada, koje prodirući kroz fasadne pregrade postaje ambijentalna buka u prostorijama. Dobijeni rezultati u disertaciji omogućavaju predikciju stanja buke u prostorijama, što je osnovni korak u određivanju nivoa postignute privatnost.

Savremena inženjerska praksa u oblasti građevinske akustike ukazala je na fenomen "ekstremne tišine" koja danas postoji u novim zgradama. Boravišne prostorije stanova postale su oaze tišine, što je uslovilo promenu paradigme u tumačenju i inženjerskom tretiranju nivoa ambijentalne buke kao teme u projektovanju zgrada. Naime, pokazalo se da je nekad teško dostižan ideal u zgradama, a to je postizanje što nižeg nivoa ambijentalne buke u prostorijama, stvorio stanarima ozbiljne probleme kada je zahvaljujući napretku tehnologije on najzad dostignut. To je otvorilo drugačiji pogled na temu ambijentalne buke u prostorijama, pa je to bilo motivacija za formulisanje teme ove disertacije.

Istraživanja sprovedena u ovoj disertaciji imaju nekoliko paralelnih i međusobno zavisnih tokova. Jedan tok istraživanja bio je posvećen optimizaciji procedura merenja uz pomoć mikrofonskog niza i prostorno-vremenske obrade signala. Takav istraživački alat omogućava određivanje ugaone, frekvencijski zavisne raspodele incidentne energije na fasadama zgrada. U disertaciji je prikazana optimizacija postupka predikcije ambijentalne buke na fasadama za različite urbanističke i saobraćajne uslove u okruženju zgrada. U radu su izabrane četiri specifične gradske urbanističke mikro celine koje su u prethodnim istraživanjima prepoznate da imaju značajno različitu strukturu zvučnog polja koji pogađa površine fasada. Metodologija primenjena u disertaciji i izvedeni zaključci oslanjaju se na rezultate merenja sprovedenih na realnim gradskim lokacijama.

Drugi tok istraživanja posvećen je analizi ključnih događaja koji se prepoznaju u ambijentalnoj buci u različitim urbanim sredinama. Takvi događaji u mnogome određuju ukupnu raspodelu incidentne energije na fasadama i predstavljaju osnov za predikciju zvučnog polja na fasadama na osnovu podataka o gustini saobraćaja.

U prvom od četiri poglavlja disertacije koji prikazuju rezultate istraživanja opisana je predložena metodologija predikcije ambijentalne buke i indeksa privatnosti u zgradama. Pokazano je da se prostorno-vremenskom obradom višekanalnog snimka buke iz mikrofonskog niza na nekoj urbanističkoj lokaciji mogu odrediti zvučne mape koje odgovaraju realnoj raspodeli izvora buke, a zatim na osnovu njih izračunati ugaone raspodele incidentne energije na fasadi. U disertaciji su predložene dve metode korekcije vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada bazirane na tako dobijenim raspodelama. One se mogu koristiti za precizniju predikciju zvučne izolacije fasade u urbanim zonama različitih konfiguracija saobraćajnica i ulica. Prva predložena metoda korekcije primenjuje se u slučaju monolitnih fasadnih pregrada. Proračun njihove izolacione moći koristi poznate analitičke izraze u kojim figuriše ugaona raspodela. Druga metoda je namenjena za proračune kada se koriste fasadne pregrade kompleksne, višeslojne strukture kao što su savremeni paketi stakla na prozorima, za koje ne postoji analitički izrazi za ugaonu zavisnost koeficijenta transmisije zvuka. Metoda predviđa korišćenje posebno definisanih numeričkih faktora kojim se koriguju poznate laboratorijske vrednosti izolacione moći korišćenih pregrada.

U narednom, petom poglavlju, ispitane su mogućnosti povećanja efikasnosti prostorno-vremenske obrade signala. Istražen je uticaj promene prostorne rezolucije algoritma na dobijene rezultate. Utvrđena je zavisnost minimalnog potrebnog ugaonog pomeraja od konfiguracije urbane zone i analiziranog frekvencijskog opsega. Pokazano je da se bez značajnijeg gubitka tačnosti krajnjih rezultata može izvršiti redukcija kojom se skraćuje vreme izvršavanja od 60% do 80%. Izvršena je i analiza optimizacije trajanja uzorka buke nad kojim se vrši obrada i ukazano na mogućnost smanjenja trajanja signala i do 3 puta u odnosu na prvobitna istraživanja, bez značajnijeg uticaja na krajnje rezultate. Takođe je ispitana mogućnost svođenja analize globalnih karakteristika ugaone raspodele buke na obradu ključnih događaja koji postoje na zadatoj lokaciji. Predložen je metod kojim se za zadatu klasu urbane lokacije mogu odrediti korekcioni faktori uticaja ključnih događaja na globalnu karakteristiku ugaone raspodele. Pokazano je da se primenom ovih korekcionih faktora na lokacijama koje pripadaju istoj klasi analiza ugaone raspodele buke može svesti samo na analizu ključnih zvučnih događaja. Na taj način se ostvaruje značajna ušteda u vremenu obrade.

U šestom poglavlju prikazani su rezultati analize stanja ambijentalne buke u zgradama dobijeni terenskim merenjima. Izvršena je klasifikacija rezultata i ukazano je na postojanje izrazito niskih nivoa ambijentalne buke na značajnom procentu mernih lokacija. U okviru ovog poglavlja prikazana je primena predložene metodologije na predikciju stanja buke u zgradi i dati su rezultati za različite tipove pregrada na četiri analizirane merne lokacije. Rezultati predikcije su upoređeni sa rezultatima terenskih merenja, čime je predložena metodologija verifikovana.

U sedmom poglavlju prikazan je pregled mogućih izvora buke u zgradama, opisane su njihove karakteristike i varijabilnost spektralnog sadržaja i nivoa zvuka koji proizvode. Pokazana je analiza prenošenja buke ovih izvora pri standardnim vrednostima izolacionih moći pregrada koje se ugrađuju u zgradama. Poređenjem dobijenih rezultata sa izmerenim nivoima ambijentalne buke ukazano je na okolnosti kada privatnost postaje ugrožena. U okviru poglavlja prikazana je primena predložene metodologije za predikciju indeksa privatnosti na analiziranim lokacijama i izvršena je klasifikacija lokacijama prema stanju indeksa privatnosti. Pokazano je da se dobijeni rezultati mogu koristiti za donošenje odluka o izboru pregradnih elemenata u objektima u cilju maksimiziranja stanja privatnosti. U ovom poglavlju komentarisana je i vremenska varijabilnost indeksa privatnosti posmatranjem buke kao sukcesivnog sleda ključnih događaja. Analizom ekvivalentnih nivoa takvih događaja spolja i unutra pokazano je da će usled različitih ugaonih raspodela incidentne energije na različitim lokacijama doći do različitih promena u dinamičkom opsegu ekvivalentnih nivoa događaja pri prolasku kroz fasadnu pregradu. Ovo je pokazano na primeru dve lokacije kod kojih dolazi do suprotnog efekta: na jednoj dolazi do smanjivanja varijanse ekvivalentnih nivoa buke, a na drugoj do povećavanja, posmatrano relativno u odnosu na varijansu nivoa buke ispred fasade. Ova činjenica je posledica razlika u ugaonoj raspodeli energije koja napada fasadu.

Prema tome, ova disertacija sadrži naučne doprinose koji su pobrojani u nastavku.

- Izvršeno je smanjivanje računske i vremenske kompleksnosti metode za određivanje ugaone raspodele incidentne zvučne energije na fasadi zgrada primenom mikrofonskog niza. Pokazano je da je moguće izvršiti povećanje prostorne rezolucije i redukciju vremenskog trajanja signala bez značajnog gubitka tačnosti krajnjih rezultata. Na različitim lokacijama date su smernice o nivou redukcije koji se može izvršiti.
- Prikazana je mogućnost svođenja analize ugaone raspodele na lokaciji na analizu ključnih događaja. Uvedeni su korekcioni faktori koji odgovaraju tipu urbane lokacije kojima bi se analiza na svim lokacijama istog tipa mogla svesti samo na analizu ključnih događaja.
- Definisane su procedure za predikciju ambijentalne buke unutar zgrade i indeksa privatnosti u fazi projektovanja zgrada na bazi rezultata dobijenih mikrofonskim nizom. Prikazana je procedura kojom se može izvršiti predikcija izolacionih moći koje će fasadne pregrade ispoljiti na različitim tipovima urbanih lokacija. Zatim je prikazana procedura kojom se može utvrditi stanje privatnosti na osnovu dobijenih predikcija izolacionih moći.

- Primenom prikazane metodologije analizirana je zavisnost indeksa privatnosti od tipa lokacije na kojoj se objekat nalazi. Za sve analizirane lokacije data je procena indeksa privatnosti za dva tipa pretpostavljene fasadne pregrade.
- Prikazani su rezultati kojima se mogu, na bazi predložene metodologije, donositi odluke o tipovima pregradnih elemenata u ranoj fazi projektovanja zgrade sa ciljem postizanja zadatog nivoa privatnosti u njoj.
- Analizom ključnih događaja, pokazan je uticaj različitih tipova lokacije na vremensku varijabilnost indeksa privatnosti. Zaključeno je da će se na različitim tipovima urbanih lokacija ispoljiti različiti uticaji na dinamički opseg ekvivalentnih nivoa buke događaja pri prolasku kroz fasadne elemente i da je uzrok ovih različitih uticaja ugaona raspodela incidentne energije.

Rezultat dobijeni u ovoj disertaciji otvaraju neke nove teme za buduća istraživanja. Jedan mogući pravac istraživanja može biti razvoj softverskih alata kojim se na osnovu pojedinačnih događaja može predvideti složena raspodela energije na fasadama zgrada. To podrazumeva primenu različitih tehnika mašinskog učenja. Drugi mogući pravac budućih istraživanja može biti implementacija mikrofonskih nizova kao deo *IoT* pametnih gradova. Jedan mogući aspekt toga bila bi implementacija mikrofonskih nizova u fasadne elemente, što bi omogućilo permanentan monitoring i kontrolu saobraćaja sa aspekta zvučnog komfora. Poseban izazov može biti primena takve tehnologije na zelenim fasadama koje su jedan savremeni trend u arhitekturi.

10 Literatura

1. **H. Fastl, E. Zwicker.** *Psychoacoustics.* Berlin : Springer, 2007.

2. **D. Šumarac Pavlović, M. Mijić.** *Elektroakustika.* Beograd : Akademska misao, 2017.

3. **H. Olson.** *Acoustical Engineering.* s.l. : Van Nostrand Company, Inc, 1960.

4. **WHO.** *Hearing loss due to recreational exposure to loud sounds - A review.* 2015. 9789241508513.

5. *The Neural Basis of Individual Holistic and Spectral Sound Perception.* **P. Schneider, M. Wengenroth.** 3, 2009, Contemporary Music Review, T. 28, str. 315–328.

6. **Chion, M.** *Audio-vision.* New York : Columbia University Press, 1994.

7. **Pickles, J.** *An Introduction to the Physiology of Hearing.* s.l. : Brill, 2008.

8. **Jovičić, S.** *Govorna komunikacija – fiziologija, psihoakustika i percepcija.* Nauka : s.n., 1999.

9. *Study on achieving speech privacy using masking noise.* **T. Tamesue, S. Yamaguchi, T. Saeki.** 2006, Journal of Sound and Vibration , T. 297, str. 1088–1096.

10. **Document, Technical.** *Multichannel surround sound systems and operations.* New York : Audio Engineering Society. AESTD1001.0.01-05.

11. **C. L. S.Gilford, D. K. Jones.** *Psychoacoustic criteria for background noise and sound insulation in Broadcasting studios.* s.l. : BBC Research Report. No PH-5, 1967/11.

12. **EBU Technical Review, Gerhard Spikofski,.** *Assessment of sound field parameter differences in studio listening conditions.* September 2000. str. 1-17.

13. **EBU Tech 3276.** *Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two–channel stereophonic.* 1998.

14. —. *Listening conditions for the assessment of sound programme material Supplement 1: Multichannel sound.* 2004.

15. **WHO.** *Environmental noise guidelines for the European Region.* 2019. 978 92 890 5356 3.

16. **RS, Sl. glasnik.** *Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini.* 75/2010.

17. **ISO 22955.** *Acoustics — Acoustic quality of open office spaces.* 2021.

18. *Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration.* **H. Jahncke, S. Hygge, N. Halin, A. M. Green, K. Dimberg,.** 2011, Journal of Environmental Psychology, T. 131, str. 373-382.

19. *Criteria for acoustic comfort in open-plan offices.* **Bradley, J. S. i Gover, B. N.,.** s.l. : The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Inter-Noise 2004. str. 1-6.

20. **ISO 6242-3.** *Building Construction — Expression of users' requirements — Part 3: Acoustical requirements.*

21. *On the definition of acoustic comfort in residential buildings.* **N. G. Vardaxis, D. Bard.** s.l. : The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, T. 141.

22. *Objective parameters for acoustic comfort in enclosed Spaces.* **P. N. Dokmeci, J. Kang.** Sydney : Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, 2010. str. 1-4.

23. *Optimum Room Acoustic Comfort (RAC) can be achieved by using a selection of appropriate acoustic descriptors.* **C. Svensson, E. Nilsson.** Paris : EURONOISE, 2008. str. 3859-3863.

24. *Concept Analysis of Comfort.* **Siefert, M. L.** 2002. Nursing Forum. T. 37(4), str. 16-23.

25. *Thermal and acoustic comfort in buildings.* **S. Monteiro da Silva, M. Guedes de Almeida.** INTERNOISE 2010. str. 1-10.

26. *Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe.* **Rasmussen, B.** 2010, Applied Acoustics, T. 71, str. 373–385.

27. *Some actual problems in making an acoustic comfort.* **M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, M. Bjelić.** 2018. 26th International Conference "Noise and Vibration" . str. 15-20.

28. **SRPS EN 12354-1.** *Akustika u građevinarstvu - Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih telemenata - Deo 1: Zvučna izolacuja između prostorija.* 2008.

29. *Noise pollution and mental health.* **Guha, M.** 5, 2022, Journal of Mental Health, T. 31, str. 605–606.

30. *Speech Privacy in Buildings.* **W. Cavanaugh, W. Farrell, P. Hirtle, B. Watters.** 4, s.l. : The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, T. 34, str. 475-492.

31. *Speech Privacy Class For Rating the Speech Privacy of Meeting Rooms.* **J. Bradley, B. Gover.** 3, s.l. : Canadian Acoustics, 2008, T. 36, str. 22-23.

32. *Speech levels in meeting rooms and the probability of speech privacy problems.* **J. Bradley, and B. Gover.** s.l. : The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, T. 127, str. 815.

33. *A new system of speech privacy criteria in terms of Speech Privacy Class (SPC) values.* **J. Bradley, B. Gover.** Sydney : Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, 2010. str. 1-5.

34. *Noise in dwellings generated in normal home activities – general approach.* **M. Adnađević, M. Mijić, D. Sumarac Pavlović, D. Mašović.** Aalburg : Forum Acusticum, 2011. str. 1355-1340.

35. *Noise in dwellings generated in normal home activities – spectral approach.* **M. Adnađević, M. Mijić, D. Sumarac Pavlović, D. Mašović.** Aalburg : Forum Acusticum, 2011. str. 1383-1388.

36. **RS, Sl. glasnik.** *Pravilnik o uslovima i normativima za projektovanje stambenih zgrada i stanova,.* br. 58/2012, 74/2015 i 82/2015.

37. **U.J6.201, SRPS.** *Akustika u zgradarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada.* 1990.

38. *Statistics of sound level generated in dwellings during everyday activities – preliminary analysis.* **M. Adnađević, M. Mijić, D. Sumarac Pavlović, D. Mašović.** Florence : s.n., 2010. European Symposium „Harmonisation of European Sound Insulation Descriptors and Clasification Standard.

39. *Measures for assessing architectural speech security (privacy) of closed offices and meeting rooms.* **B. Gover, J. Bradley.** s.l. : The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, T. 116, str. 3480.

40. **ASTM E2638 –10.** *Standard Test Method for Objective Measurement of the Speech Privacy Provided by a Closed Room.* 2017.

41. *Criteria for acoustic comfort in open-plan offices.* **J. S. Bradley, B. N. Gover.** s.l. : The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Inter-Noise 2004. str. 1-6.

42. *A new procedure for assessing the speech security of meeting rooms, .* **J.S. Bradley, B.N. Gove.** s.l. : Proceedings of the Institute of Acoustics, 2008. T. 30, str. 1-7.

43. **Gover, B. N., Bradley, J. S.** *Guide for Assessment of the Architectural Speech Privacy and Speech Security of Closed Offices and Meeting Rooms, .* s.l. : National Research Council Canada, Research Report , 2009. RR-276.

44. **Park, H.K., Bradley, J. S., Gover, B. N.** *Rating Airborne Sound Insulation in Terms of the Annoyance and Loudness of Transmitted Speech and Music Sounds, .* s.l. : National Research Council Canada, Research Report, 2008. DBR-RR-242.

45. **ISO 16283-1.** *Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.* 2014.

46. **ISO 1996-1.** *Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures.* 2016.

47. **International Organization for Standardization.** *ISO 717-1:2013, Acoustics Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation.* 2013.

48. *Uticaj „tišine“ na zvučni komfor.* **M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, M. Bjelić, T. Miljković.** Srebrno jezero : Društvo za Etran, 2019. str. 46-51.

49. *Attitudes to Noise Inside Dwellings in Three Megacities: Seoul, London, and São Paulo.* **P. J. Lee, C. Hopkins, R. Penedo.** 6005, 2020, International Journal of Environmental Research and Public Health, T. 17, str. 1-25.

50. *Noise in urban areas: How does the definition of "neighbourhood" impact exposure assessment?* **F. Mauny, Q. Tenailleau, S. Pujol A. Parmentier H. Houot, B. Nadine.** 2016. nter-Noise. str. 1-11.

51. *Urban noise surveys.* **A. L. Brown, K. C. Lam.** 1, 1987, Applied Acoustics, T. 20, str. 23-39.

52. *Comparison between the spectrum shape of traffic noise in Belgrade and the ISO 717-1 reference spectrum.* **D. Mašović, M. Mijić, D. Šumarac-Pavlović.** Innsbruck : s.n., 2013. INTERNOISE .

53. **Kang, J.** *Urban Sound Environment .* s.l. : CRC Press, 2020.

54. *Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modelling vs. experimental observations.* **A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, D. Botteldooren.** 2010, Applied Acoustics, T. 71, str. 764–770.

55. **SRPS EN ISO 717-1.** *Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.*

56. **RS, Sl. glasnik.** *Pravilnik o energetskoj efikasnosti zgrada.* br 61/2011.

57. **Godara, L.C.** *Smart antennas.* New York : CRC Press LLC, 2004.

58. **Trees, H. Van.** *Optimum Array Processing.* New York : John Wiley & Sons, Inc., 2002. str. 17-90.

59. **J.J. Christensen, J. Hald.** *Beamforming.* Nærum, Denmark : Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S, 2004.

60. *A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances.* **J. Hald, J. Christensen.** 2002, J. Acoust. Soc. Am., T. 112, str. 2448. DOI: 10.1121/1.4780077.

61. *Localisation of sound sources on moving vehicles with phased microphone arrays.* **U. Michela, B. Barsikowb, P. Böhninga, M. Hellmig.** Prague : The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.

62. **Underbrink, J.** Aeroacoustic Phased Array Testing in Low Speed Wind Tunnels . [aut. knjige] Thomas J. Mueller. *Aeroacoustic Measurements.* Berlin : Springer, 2002, 3, str. 98–217.

63. *Wind turbine noise measurement using a compact microphone array with advanceddeconvolution algorithms.* **R.C. Ramachandran, G. Raman, R.P. Dougherty.** 2014, Journal ofSoundandVibration, T. 333, str. 3058–3080.

64. *Parameterization and Reproduction of Concert Hall Acoustics Measured with a Circular Microphone Array.* **E. M. Hulsebos, D. de Vries.** s.l. : Audio Engineering Society, 2002. AES Convention. T. 112.

65. *Room impulse response measurement with a spherical microphone array, application to room and building acoustics.* **S. Barre, D. Dobler, A. Mayer.** Melburne : s.n., 2014. Inter-noise 2014.

66. *Analysis of absorption in situ with a spherical microphone array.* **J. Rathsam, B. Rafaely.** 2015, Applied Acoustics, T. 89, str. 273-280.

67. **techniques, Wideband beamforming : concepts and.** *W. Liu, S. Weiss.* s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.

68. *History of acoustic beamforming.* **Michel, U.** Berlin : s.n., 2006. Berlin Beamforming Conference.

69. **Trees, H.L. Van.** *Optimum Array Processing.* New York : John Wiley & Sons, Inc., 2002. str. 17-90.

70. *A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources.* **T. F. Brooks, W. M. Humphreys.** 2006, Journal of Sound and Vibration, T. 294, str. 856-879.

71. **T.F. Brooks, W.M. Humphreys.** *Effect of directional array size on the measurement of airframe noise components.* s.l. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. str. 99-1958.

72. *The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms.* **Welch, P.D.** 2, 1967, IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO AND ELECTROACOUSTICS, tom. AU-15, str. 70-73.

73. **Vogel, C.R.** *Computational Methods for Inverse Problems.* Philadelphia, : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.

74. **W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery,.** *Numerical Recipes in FORTRAN, The Art of Scientific Computing.* Cambridge : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.

75. *Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming.* **Dougherty, R.P.** Monterey : s.n., 2005. 26th AIAA Aeroacoustics Conference.

76. *A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources.* **K. Ehrenfried, L. Koop.** Cambridge : s.n., 2006. 27th AIAA Aeroacoustics Conference.

77. **R.C. Gonzalez, R.E. Woods,.** *Digital Image Processing 2end Ed.* s.l. : Addison-Wesley, 1992.

78. *Dizajn mikrofonskog niza optimizovanog za monitoring saobraćajne buke.* **M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić.** Zlatibor : s.n., 2016. Zbornik 60. konferencije ETRAN 2016. str. AK 1.2. 1-6.

79. *Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis* . **M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić.** May 2017, The Journal of the Acoustical Society of America, str. 3101-3104.

80. **M. Bjelić.** *Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza.* Beograd : Elektrotehnički fakultet - doktorska disertacija, 2018.

81. **M. Tomašević.** *Algoritmi i strukture podataka.* s.l. : Akademska misao, 2008.

82. *Design and Calibration of a Small Aeroacoustic Beamformer.* **E. Arcondoulis, C. Doolan, A. Zander, L. Brooks.** Sydney : Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, 2010. DOI: 10.1109/CAR.2010.5456775.

83. **Dougherty, R.** *Spiral-shaped array for broadband imaging. Pat. US 5,838,284* 1998.

84. *Microphone array method for determining noise angular energy distribution on building envelopes.* **M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković.** Achen : s.n., 2019. 23rd International Congress on Acoustics. str. 134-141.

85. **Kurtović, H.** *Osnovi tehničke akustike.* Beograd : Naučna knjiga, 1982.

86. *Određivanje ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada na bazi izdvojenih karakterističnih događaja.* **M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković.** Beograd : Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN,.

87. *An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds.* **T. F. Coleman, Y. Li.** 1996, SIAM Journal on, T. 6, str. 418–445.

88. **ANC Guidelines.** *Measurement of sound levels in buildings.* Great Britain : Association of Noise Consultants, 2020.

89. **Noise Measurement Manual.** Australia : Department of Environment and Science, 2020.

90. **ISO/R 1996-1971 .** *Assesment of noise with the respect to community response.*

91. **VDI 4100.** *Sound insulation between rooms in buildings - Dwellings - Assessment and proposals for enhanced sound insulation between rooms.* 2012.

92. **B. Rasmussen, M. Machimbarrena.** *Existing Insulation Performance Requirements and Classification Schemes for Housting Across Europe.* s.l. : Cost Action Tu0901, 2014. str. Chapter 2.

93. *Effects of vocal loudness variation on spectrum balance as reflected by the alpha measure of long-term-average spectra of speech.* **J. Sundberg, M. Nordenberg.** 1, 2006, J. Acoust. Soc. America, T. 120.

94. **Laboratorija za akustiku.** *Studija o uslovima koji moraju ispunjavati ugostiteljski objekti radi zastite od buke na teritoriji grada Beograd.* Beograd : GRAD BEOGRAD - GRADSKA UPRAVA GRADA BEOGRADA, 2019. Studija.

95. **RS, Službeni glasnik.** *Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini.* Beograd : s.n., 2021. 96.

96. **M. Brandstein, D. Ward.** *Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications.* New York : Springer-Verlag, 2001.

97. **Kjær, Brüel &.** PULSE Array-based Noise Source Identification Solutions. [Na mreži] Brüel & Kjær. https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2144.ashx.

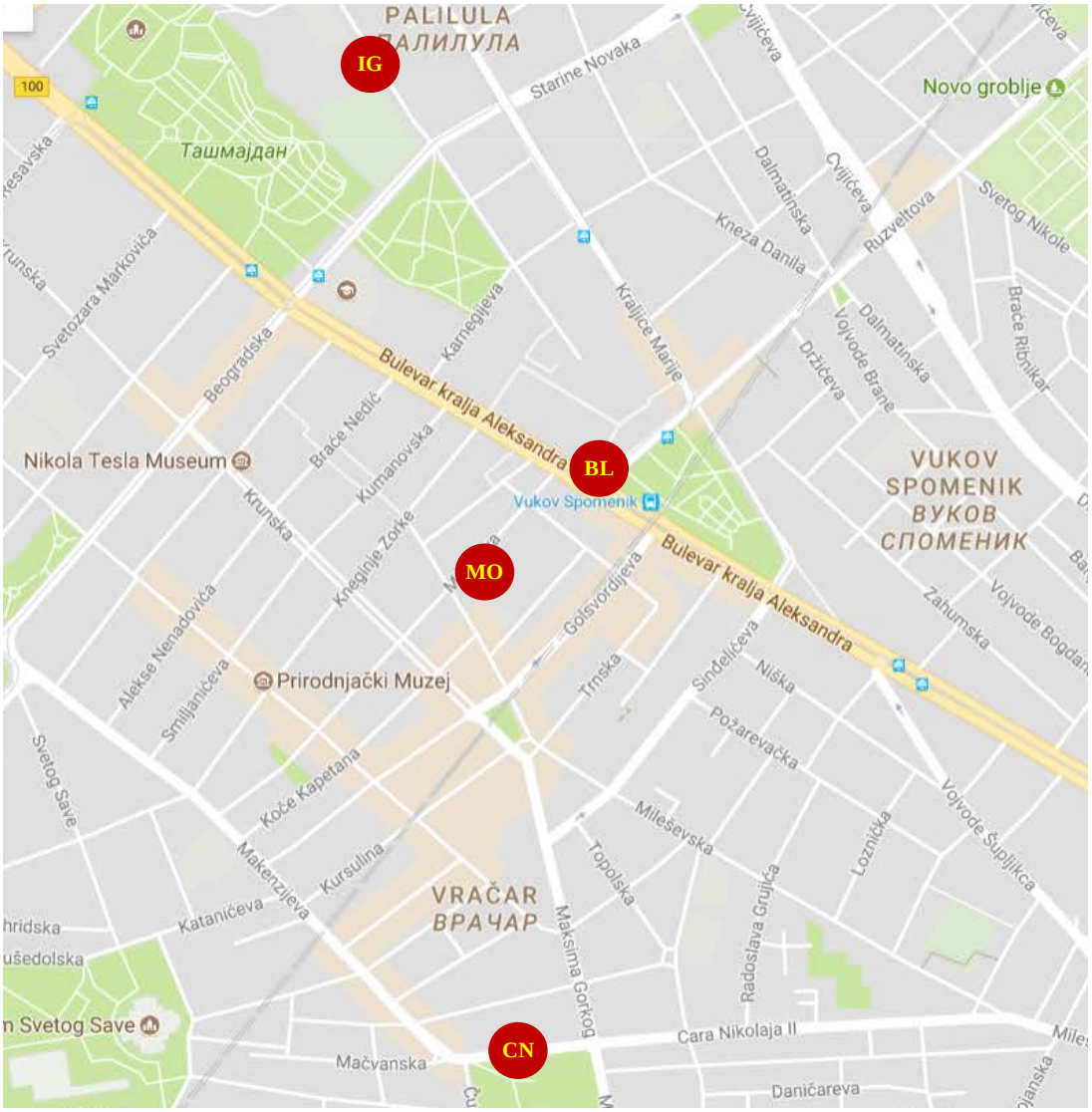
98. **Kuttruff, Heinrich.** *Room Acoustics.* s.l. : Spon Press, 2009.

99. —. *Acoustics An introduction.* s.l. : Taylor & Francis, 2007.

11 Prilozi

P.1 Prikaz mernih lokacija

Na slici je prikazana je mapa sa mernim lokacijama, a u narednoj tabeli dati su detalji o lokaciji mernog mesta.

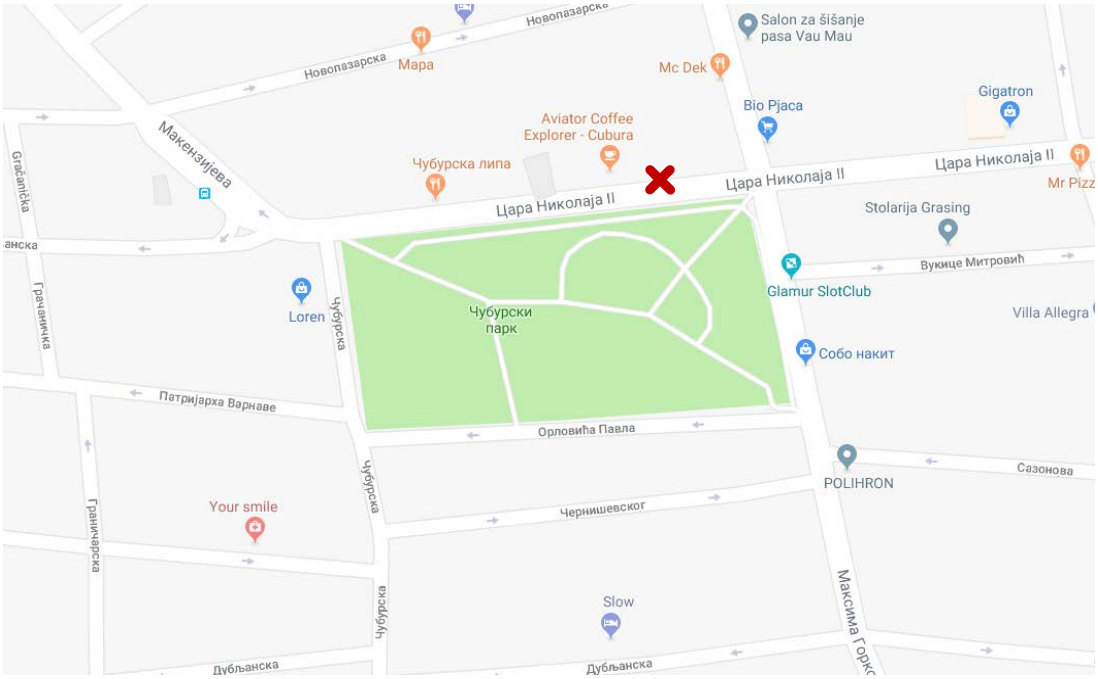


Slika 11.1 Lokacije na kojima su izvršena merenje

Tabela 11.1 Lokacije na kojima su izvršena merenje

Naziv merenja	Mesto merenja (Ulica)
CN	Zgrada (Cara Nikolaja II 21)
BL	Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)
MO	Zgrada Molerova (Molerova 70)
IG	Zgrada Ilije Garašanina 16

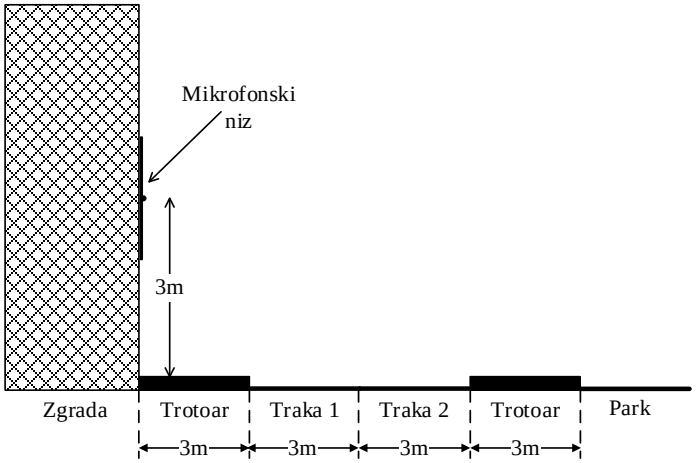
P1.1 Ulica cara Nikolaja II 21



Slika 11.2 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



Slika 11.3 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

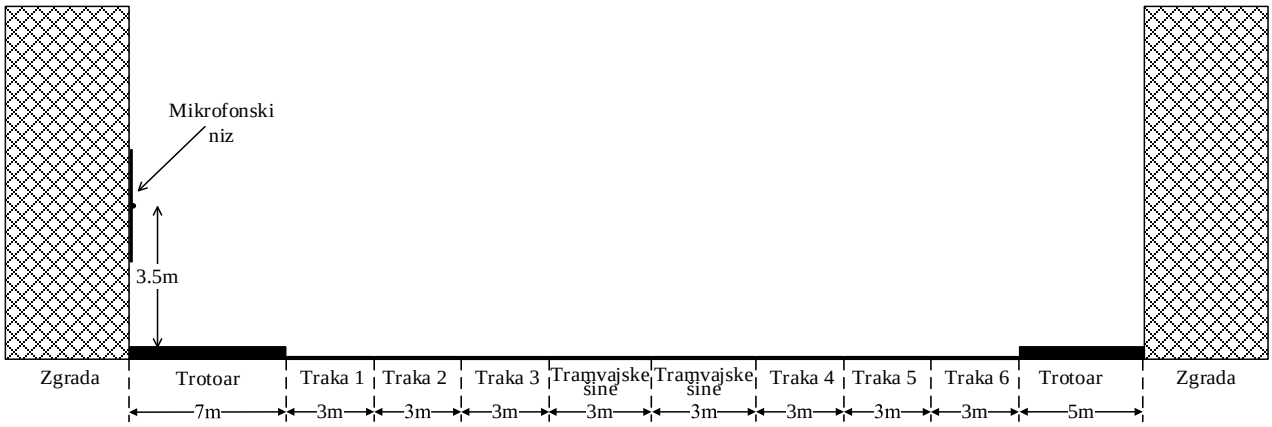


Slika 11.4 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P1.2 Ulica bulevar kralja Aleksandra 73

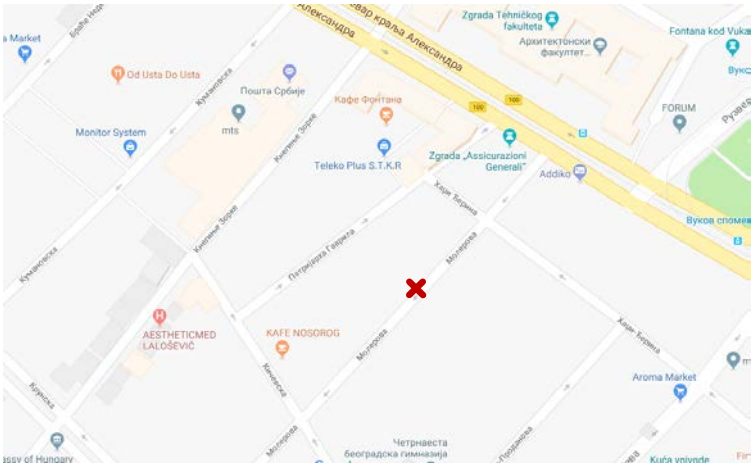


Slika 11.5 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



Slika 11.6 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P1.3 Ulica Molerova 70

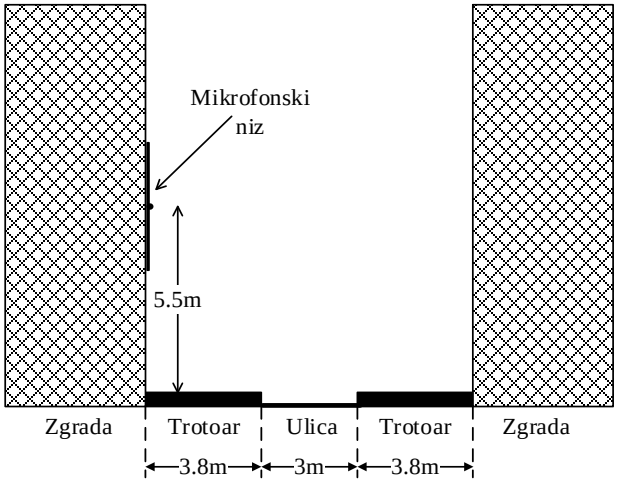


Slika 11.7 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



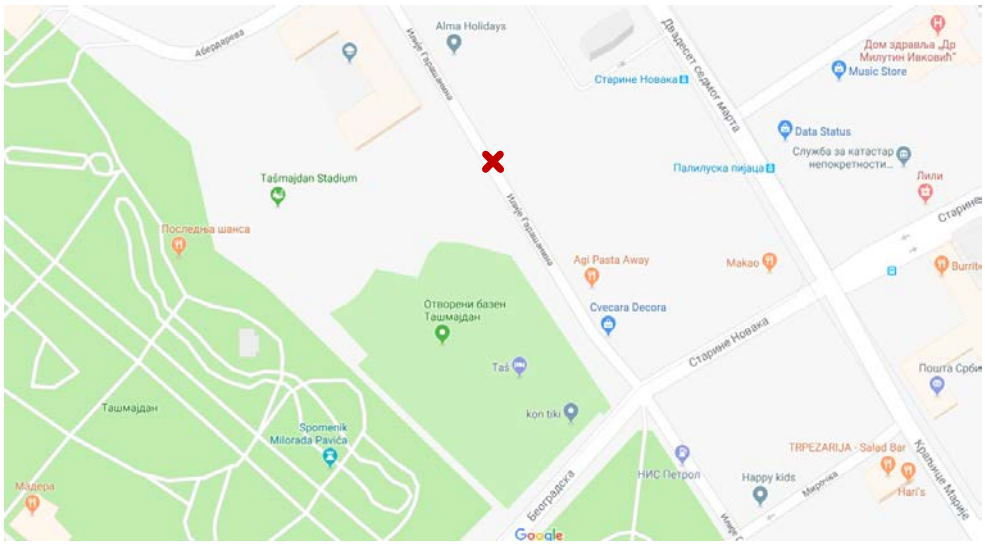


Slika 11.8 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



Slika 11.9 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

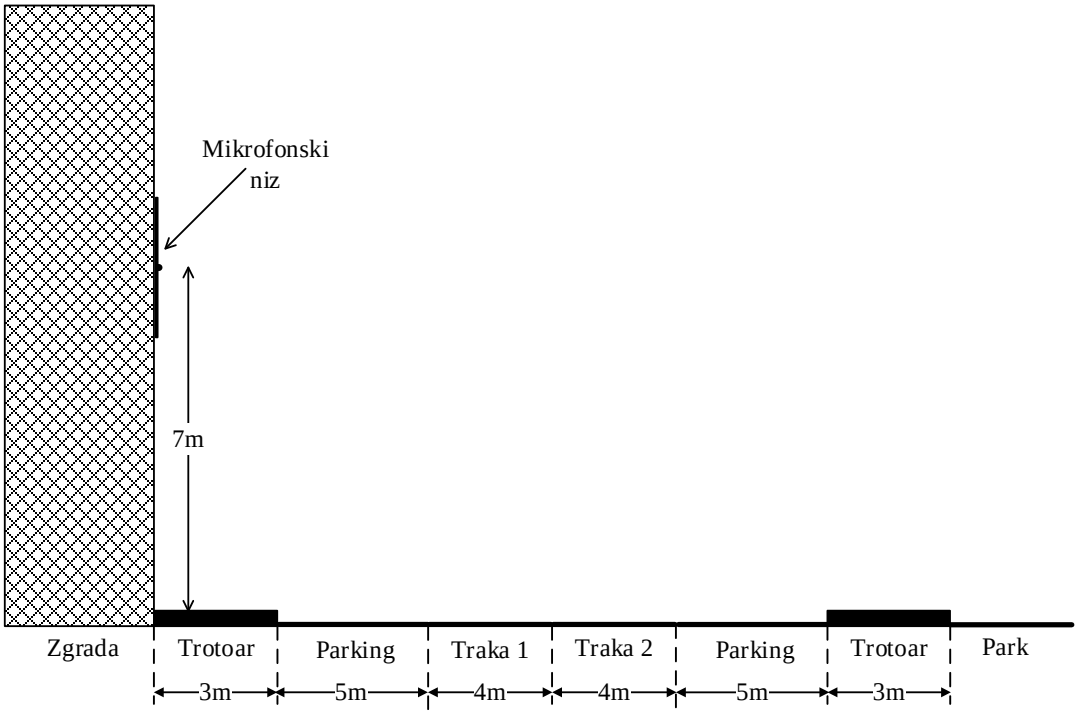
P1.4 Ilije Garašanina



Slika 11.10 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



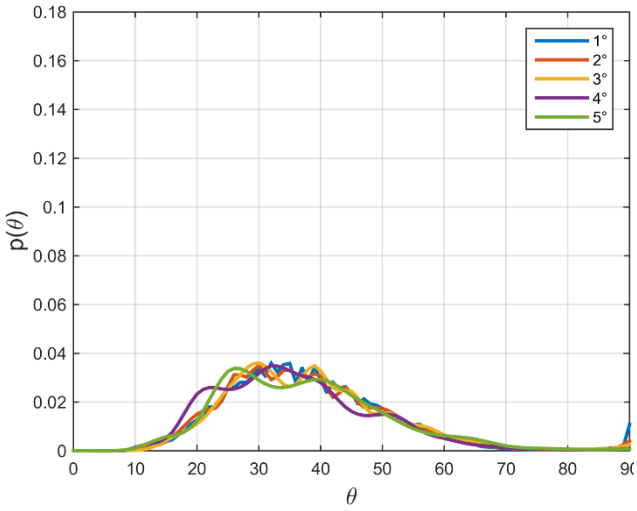
Slika 11.11 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (levo) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (desno)



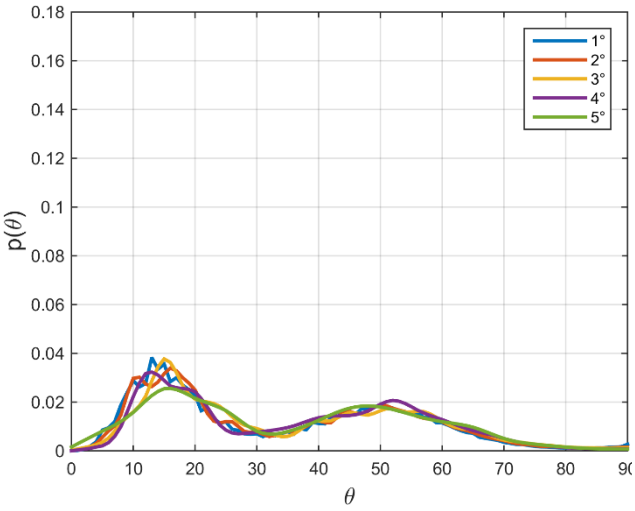
Slika 11.12 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P.2 Prikaz ugaonih raspodela za različite ugaone rezolucije

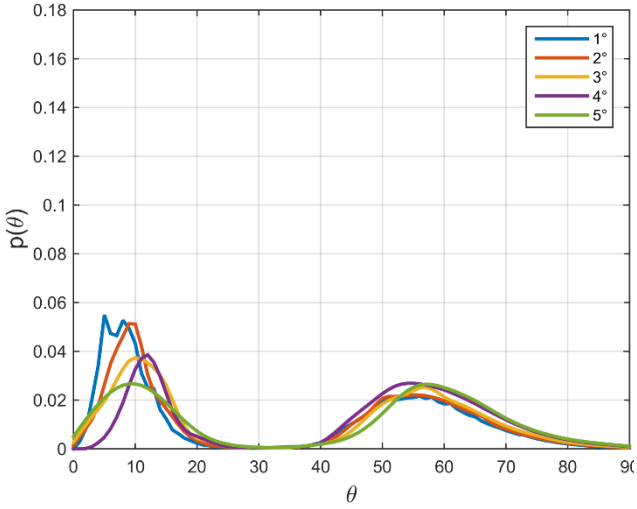
P2.1 Ulica cara Nikolaja II 21



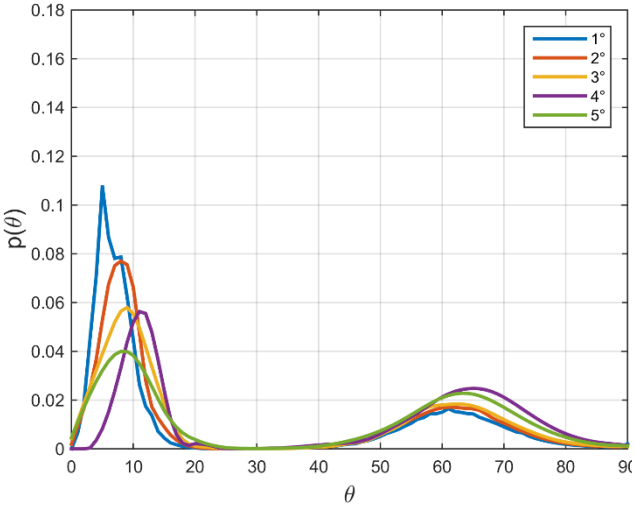
Slika 11.13 Raspodele za tercu 250 Hz



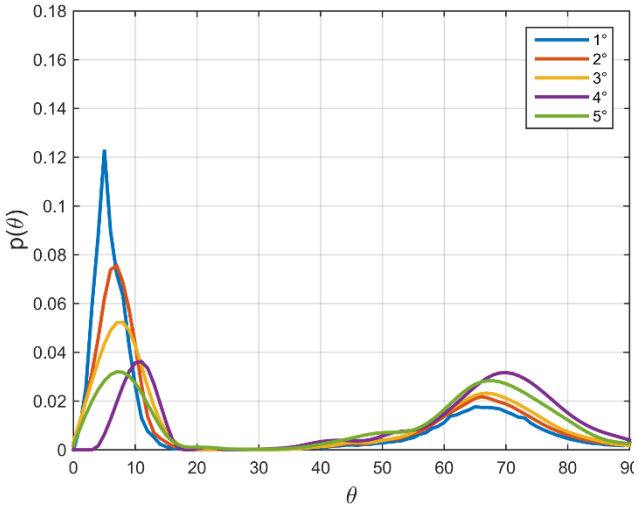
Slika 11.14 Raspodele za tercu 315 Hz



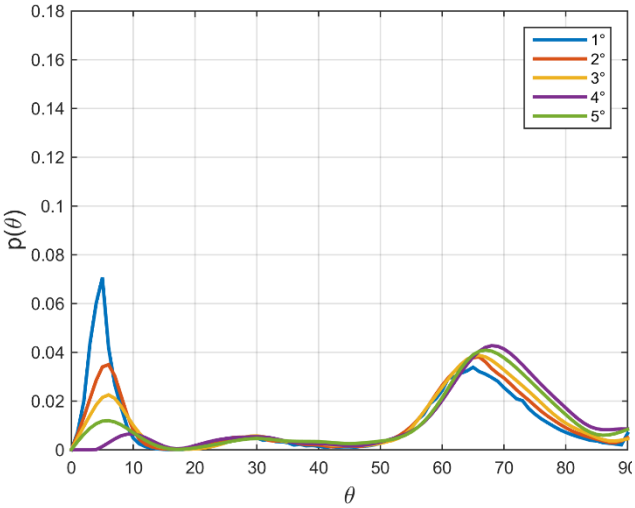
Slika 11.15 Raspodele za tercu 400 Hz



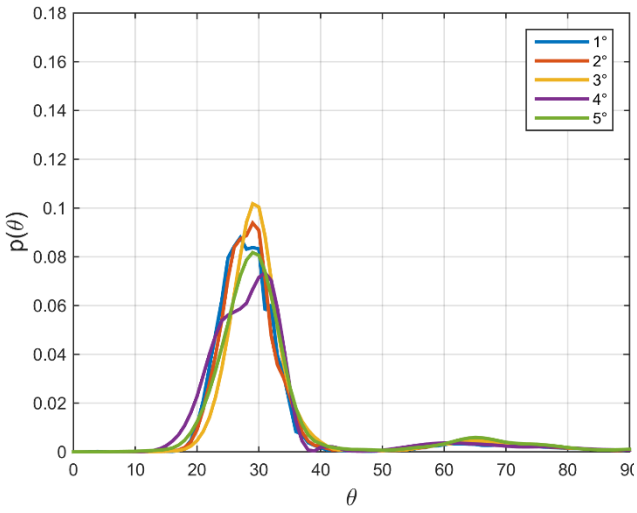
Slika 11.16 Raspodele za tercu 500 Hz



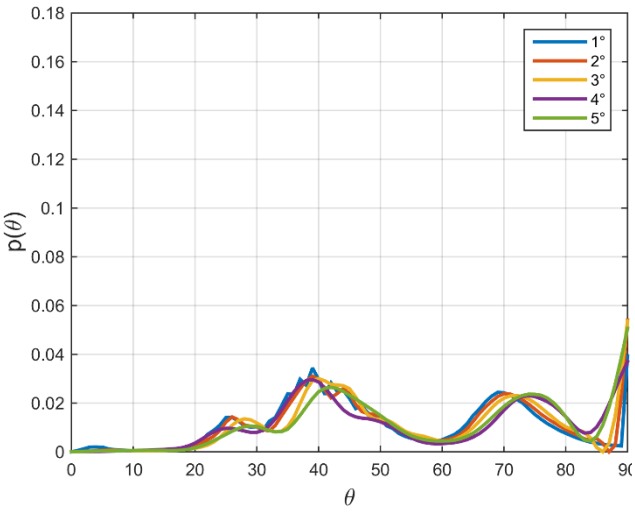
Slika 11.17 Raspodele za tercu 630 Hz



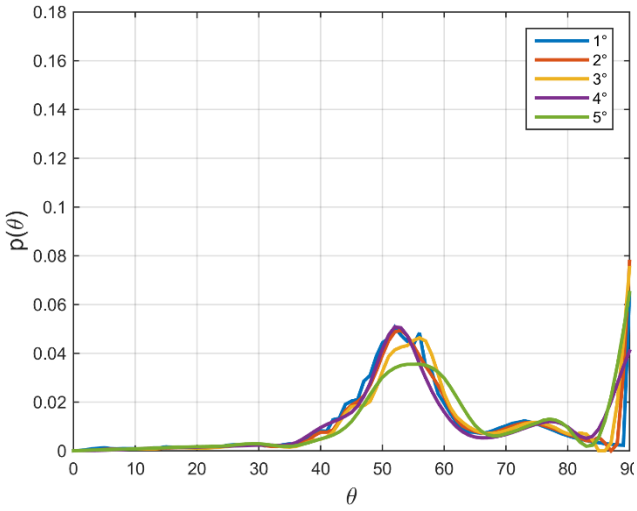
Slika 11.18 Raspodele za tercu 800 Hz



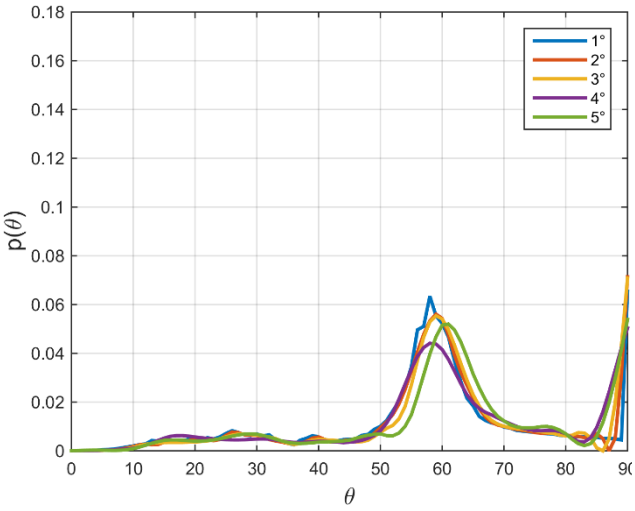
Slika 11.19 Raspodele za tercu 1000 Hz



Slika 11.20 Raspodele za tercu 1250 Hz

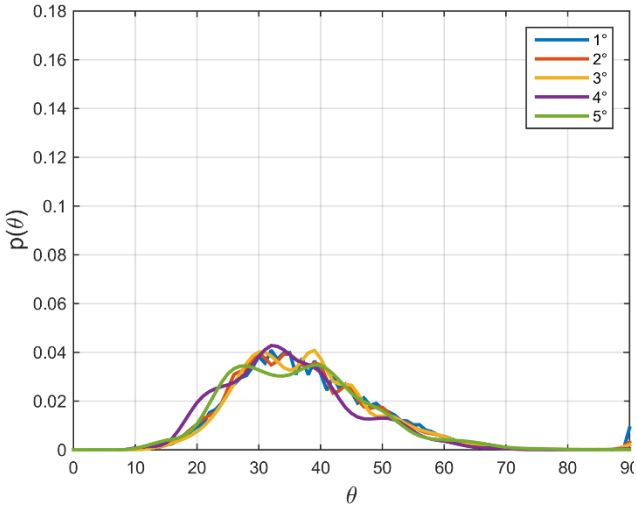


Slika 11.21 Raspodele za tercu 1600 Hz

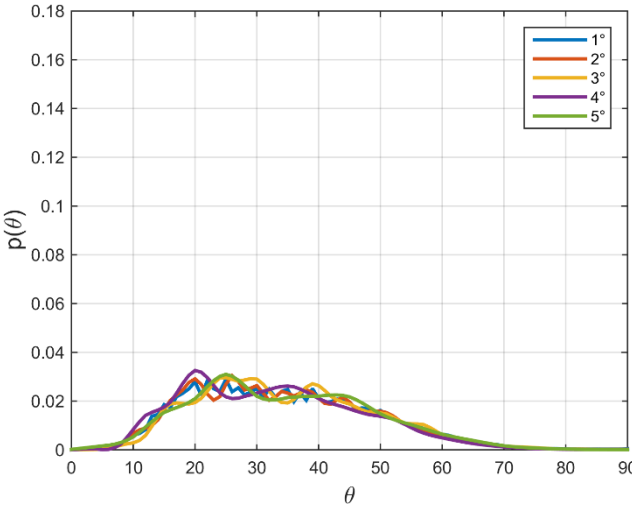


Slika 11.22 Raspodele za tercu 2000 Hz

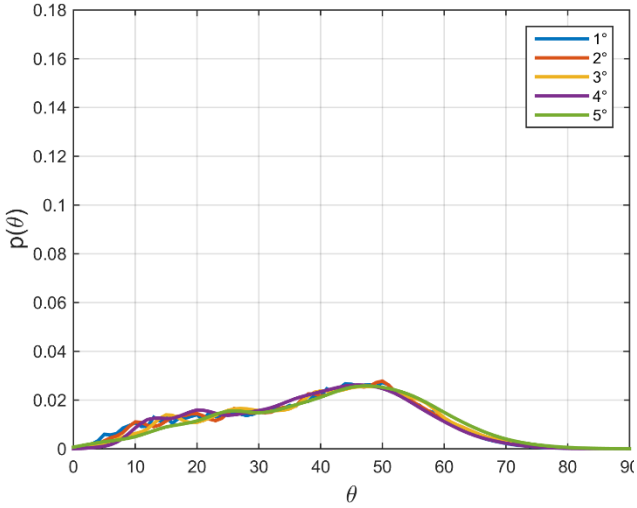
P2.2 Ulica bulevar kralja Aleksandra 73



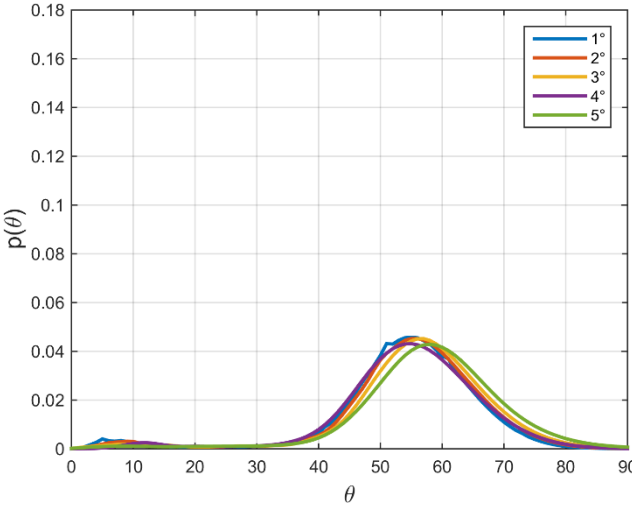
Slika 11.23 Raspodele za tercu 250 Hz



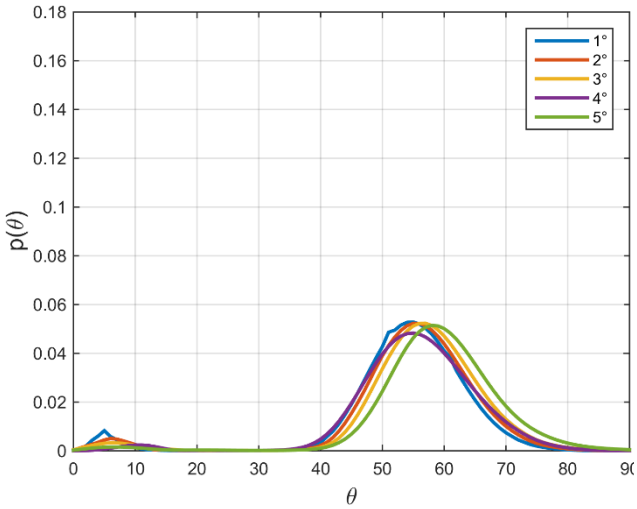
Slika 11.24 Raspodele za tercu 315 Hz



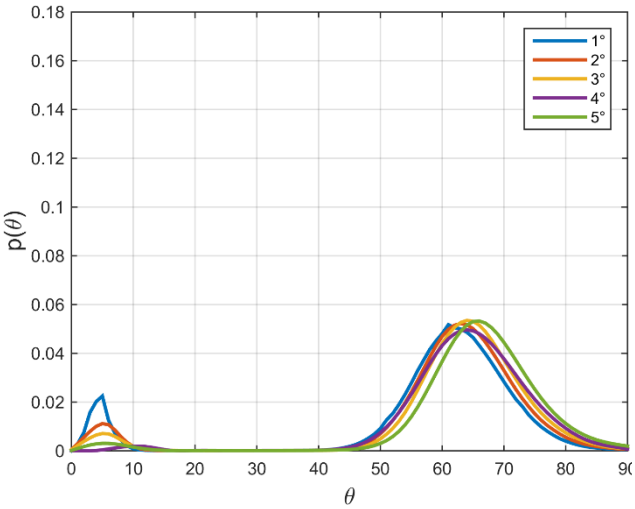
Slika 11.25 Raspodele za tercu 400 Hz



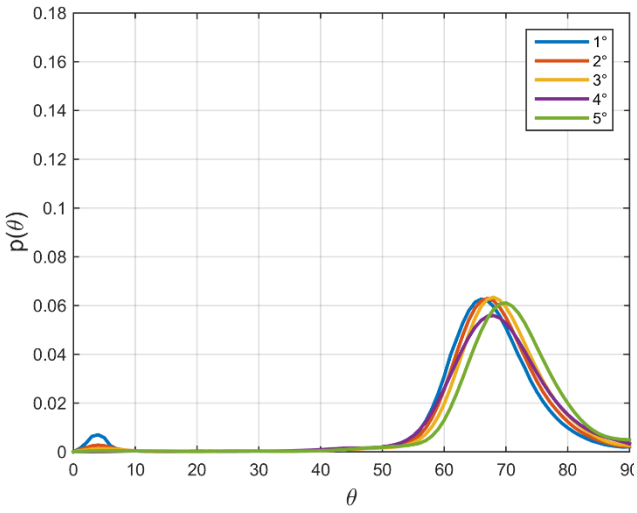
Slika 11.26 Raspodele za tercu 500 Hz



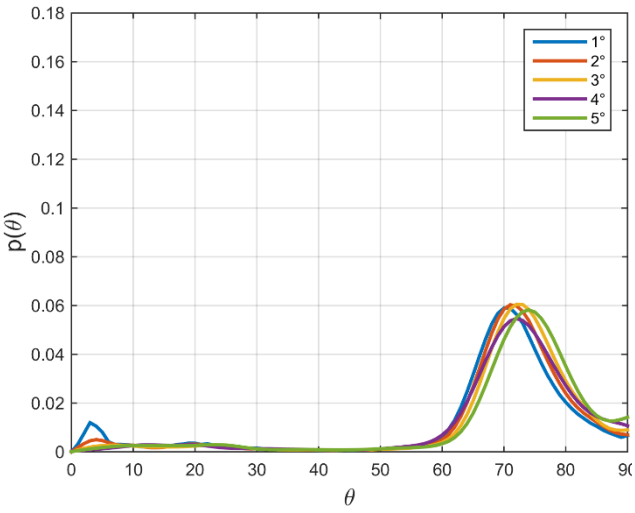
Slika 11.27 Raspodele za tercu 630 Hz



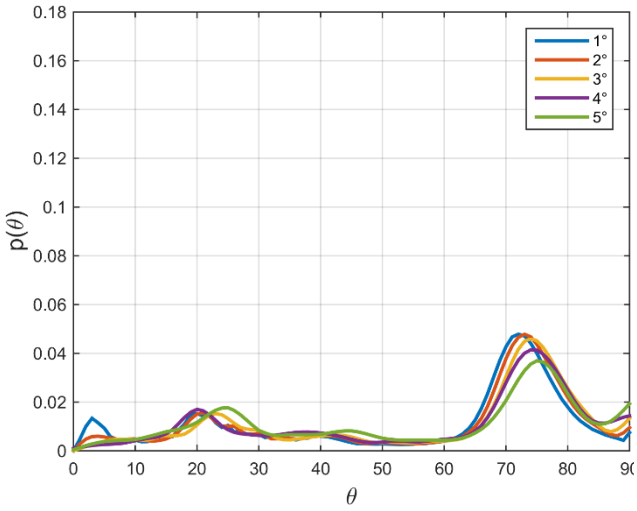
Slika 11.28 Raspodele za tercu 800 Hz



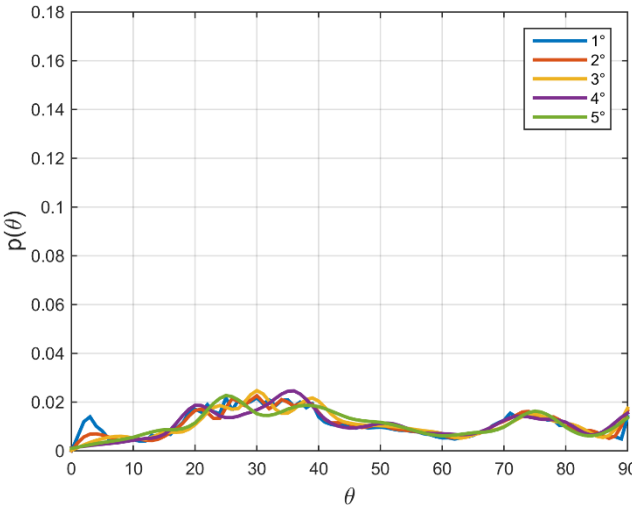
Slika 11.29 Raspodele za tercu 1000 Hz



Slika 11.30 Raspodele za tercu 1250 Hz

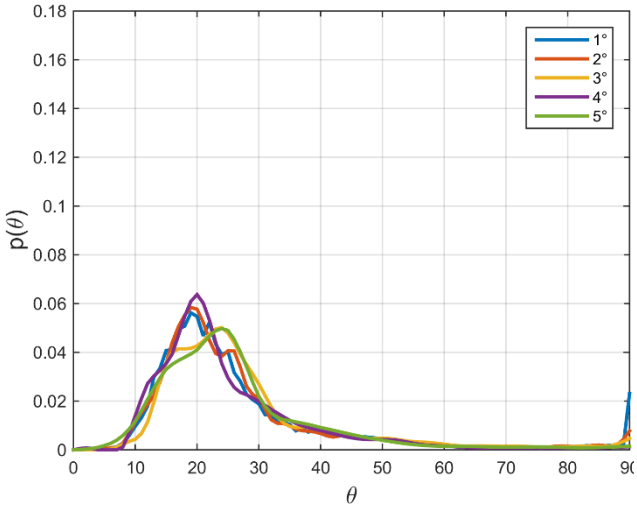


Slika 11.31 Raspodele za tercu 1600 Hz

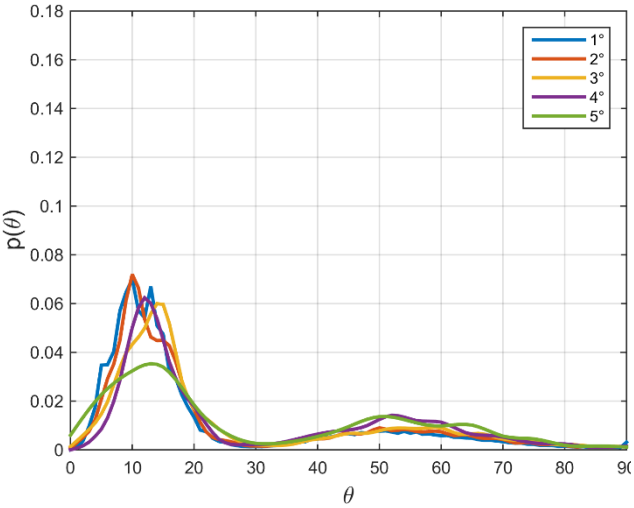


Slika 11.32 Raspodele za tercu 2000 Hz

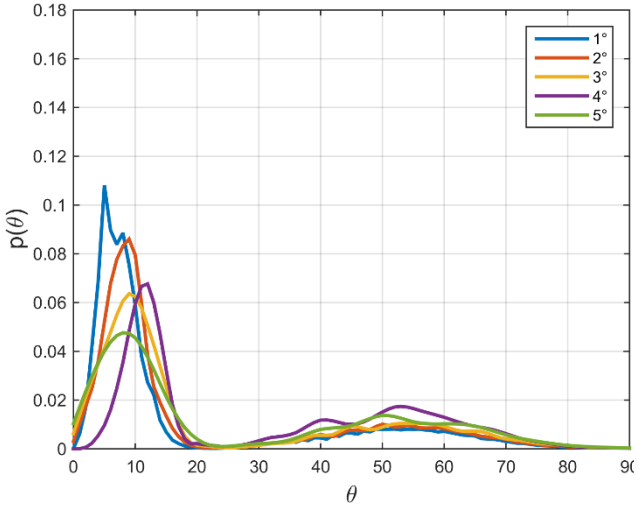
P2.3 Ulica Molerova 70



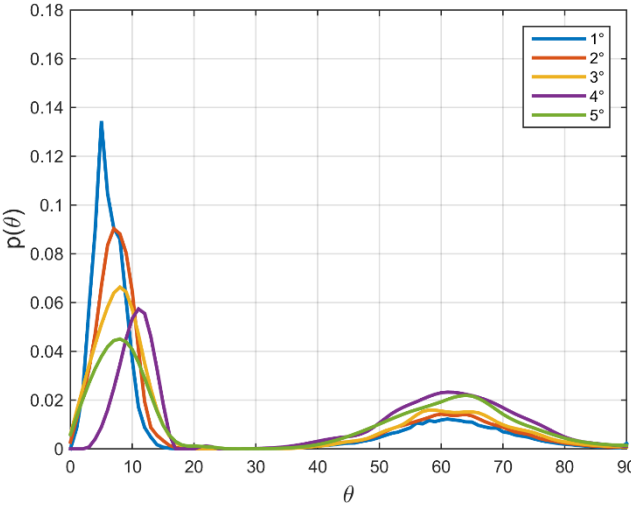
Slika 11.33 Raspodele za tercu 250 Hz



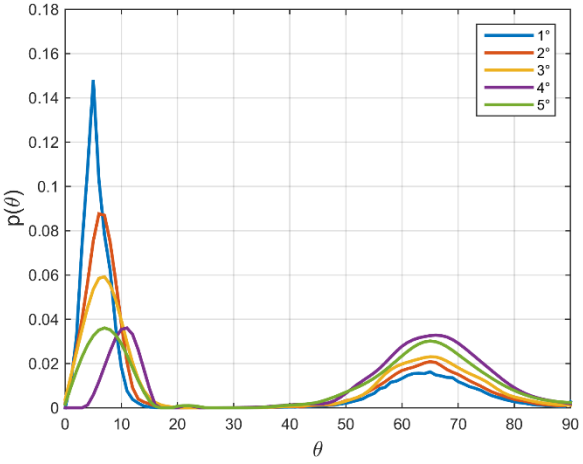
Slika 11.34 Raspodele za tercu 315 Hz



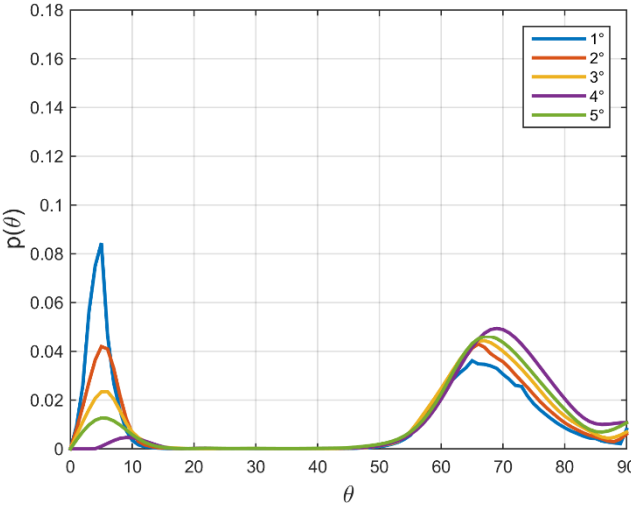
Slika 11.35 Raspodele za tercu 400 Hz



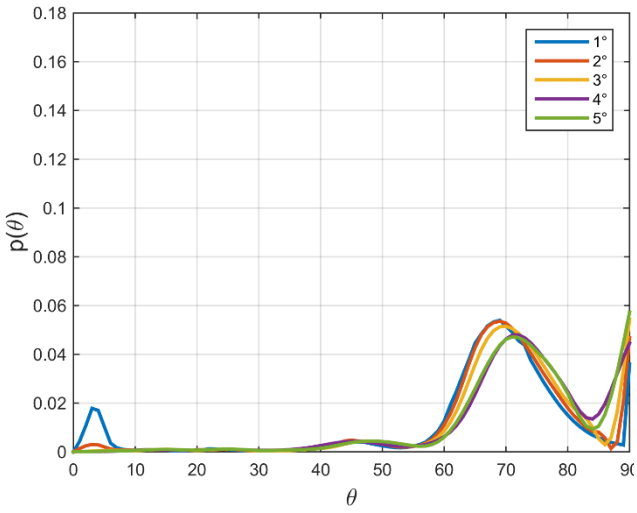
Slika 11.36 Raspodele za tercu 500 Hz



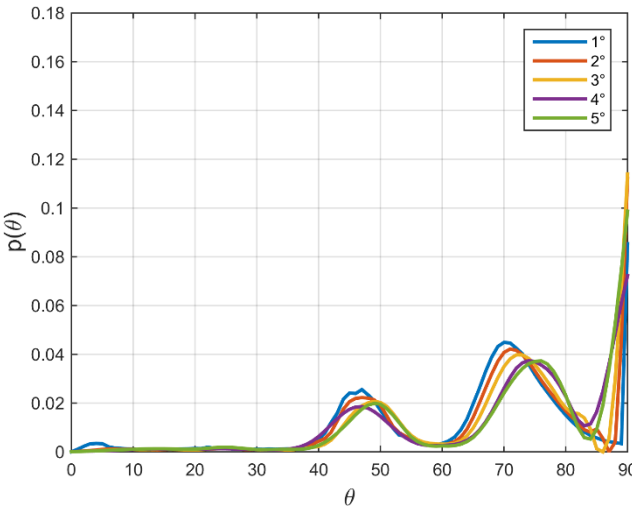
Slika 11.37 Raspodele za tercu 630 Hz



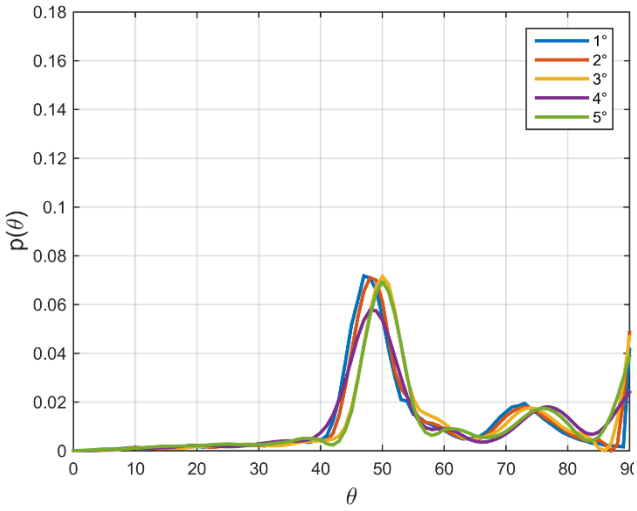
Slika 11.38 Raspodele za tercu 800 Hz



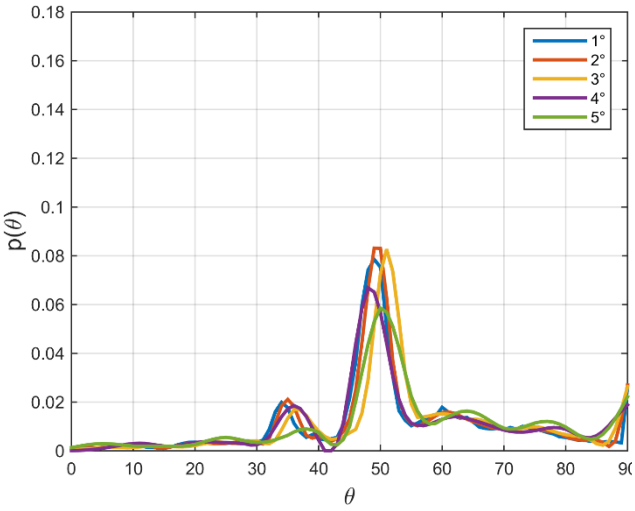
Slika 11.39 Raspodele za tercu 1000 Hz



Slika 11.40 Raspodele za tercu 1250 Hz

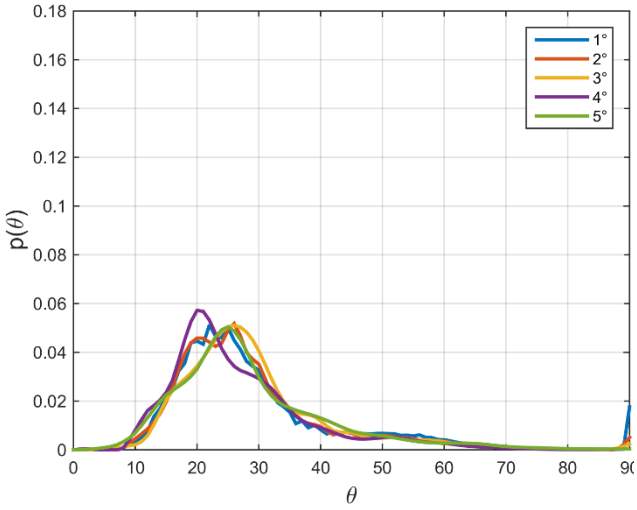


Slika 11.41 Raspodele za tercu 1600 Hz

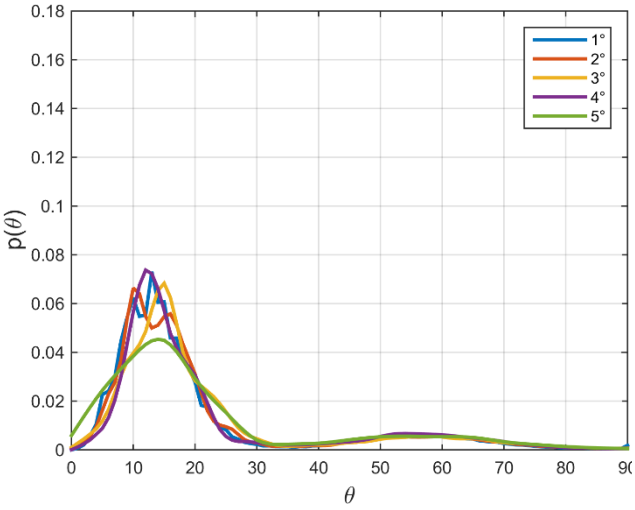


Slika 11.42 Raspodele za tercu 2000 Hz

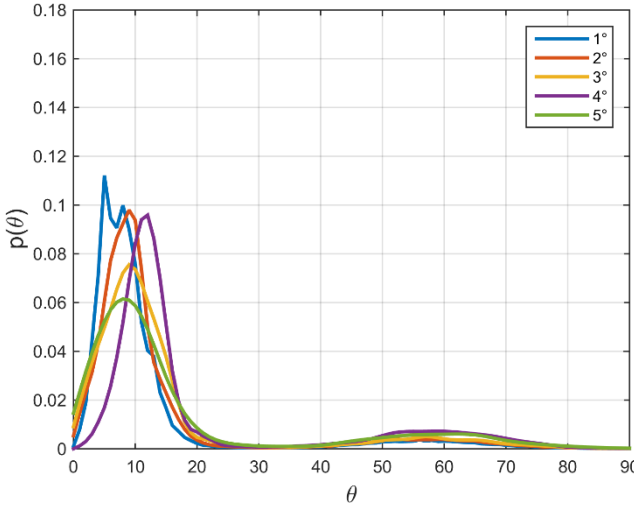
P2.4 Ulica Ilije Garašanina



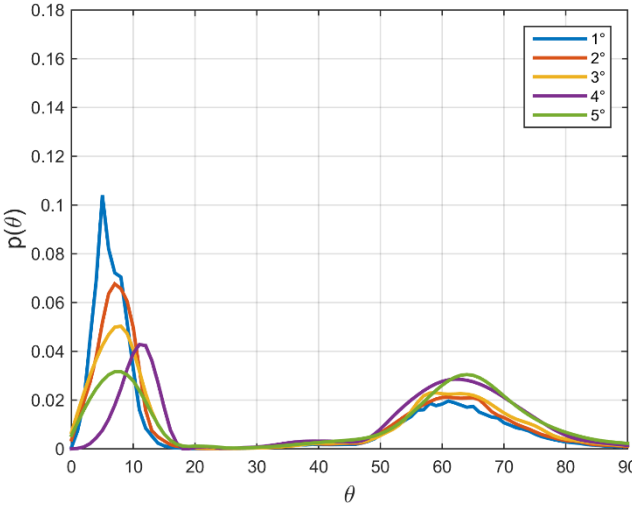
Slika 11.43 Raspodele za tercu 250 Hz



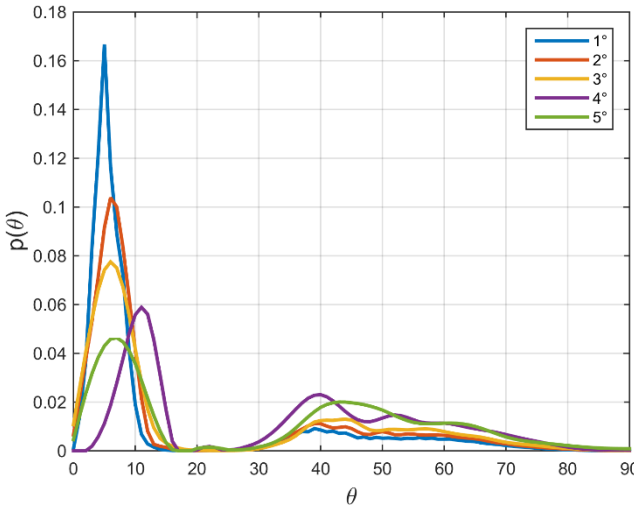
Slika 11.44 Raspodele za tercu 315 Hz



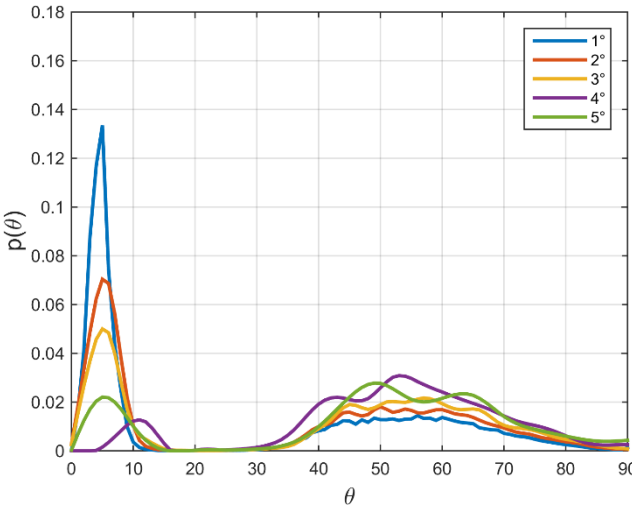
Slika 11.45 Raspodele za tercu 400 Hz



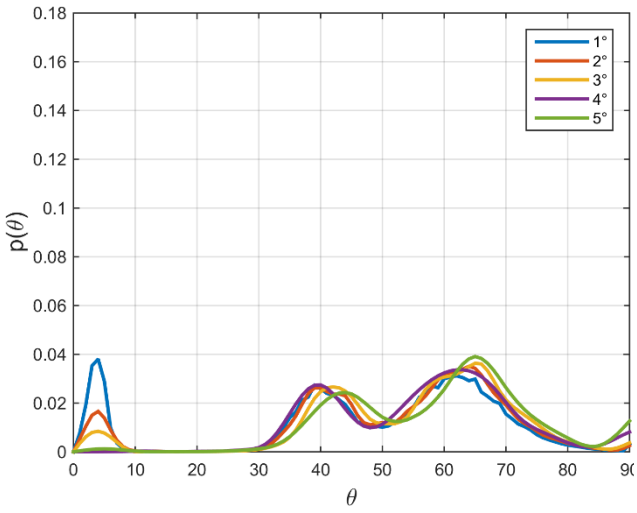
Slika 11.46 Raspodele za tercu 500 Hz



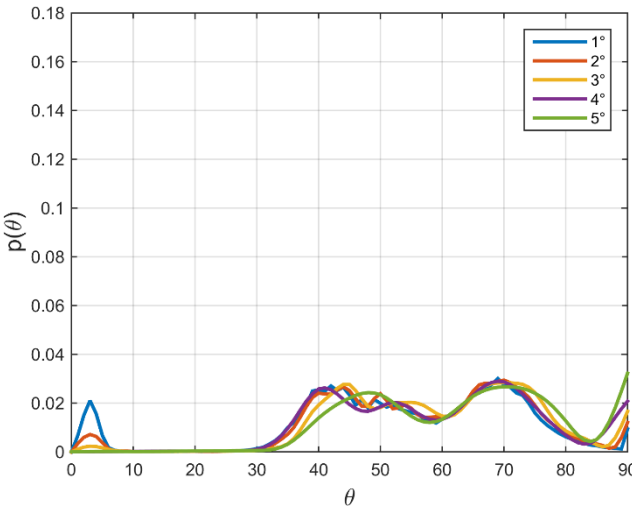
Slika 11.47 Raspodele za tercu 630 Hz



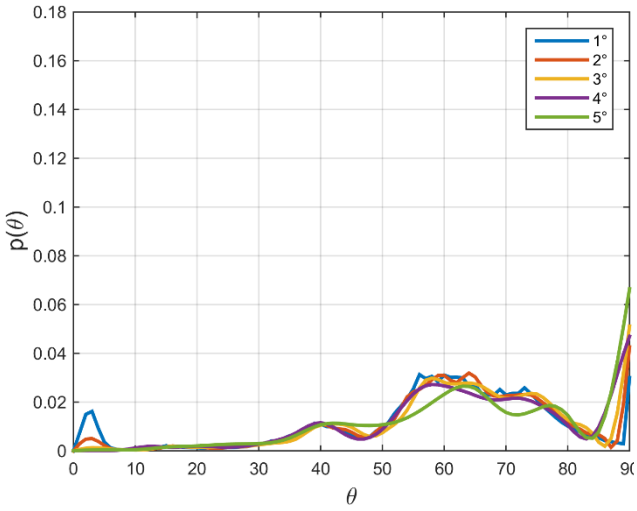
Slika 11.48 Raspodele za tercu 800 Hz



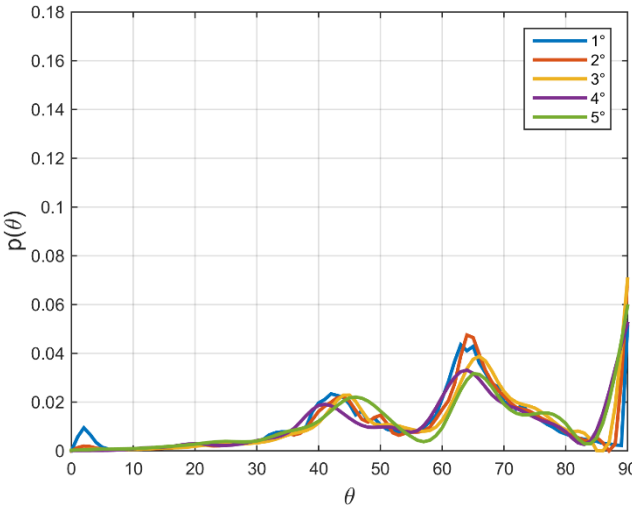
Slika 11.49 Raspodele za tercu 1000 Hz



Slika 11.50 Raspodele za tercu 1250 Hz



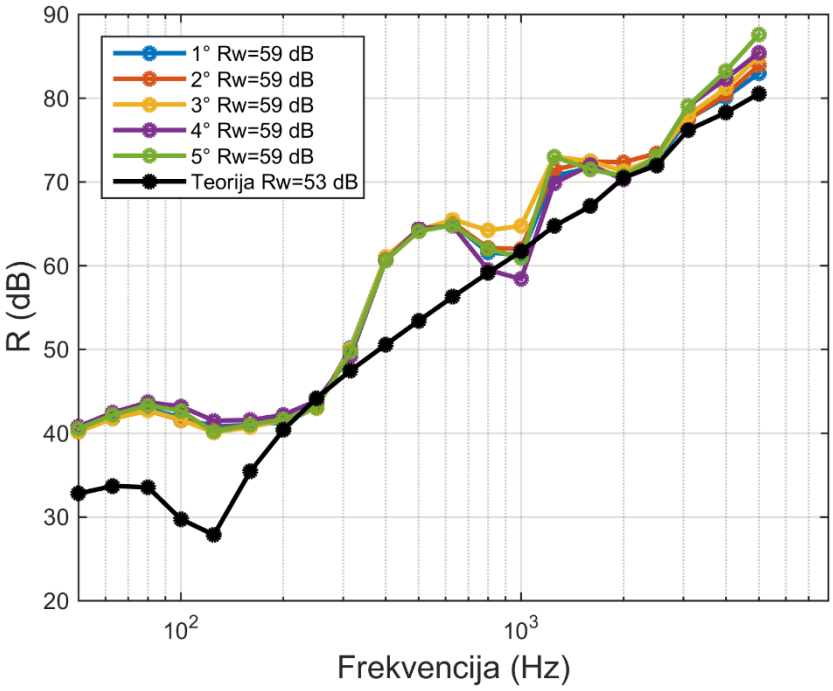
Slika 11.51 Raspodele za tercu 1600 Hz



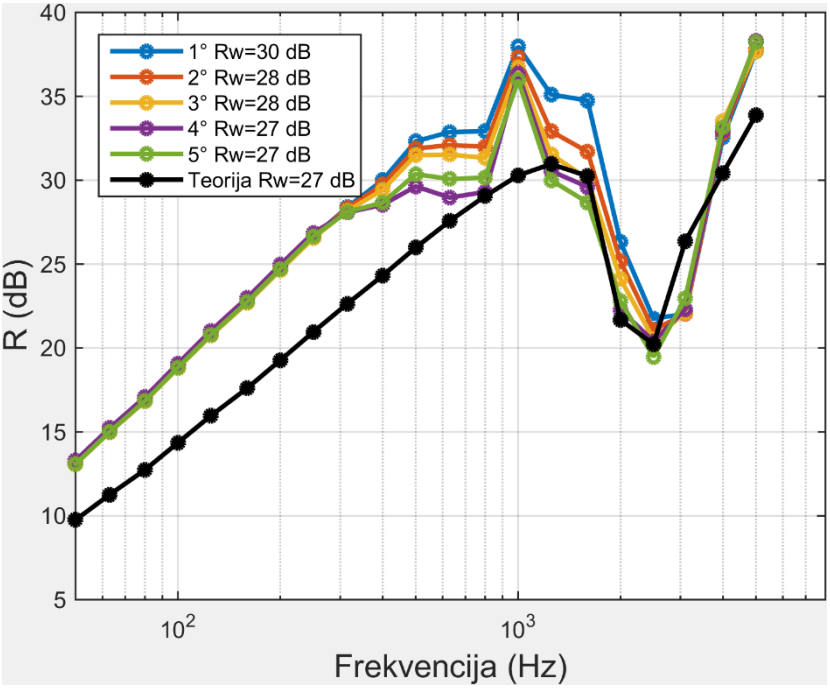
Slika 11.52 Raspodele za tercu 2000 Hz

P.3 Prikaz izolacionih moći za različite ugaone rezolucije

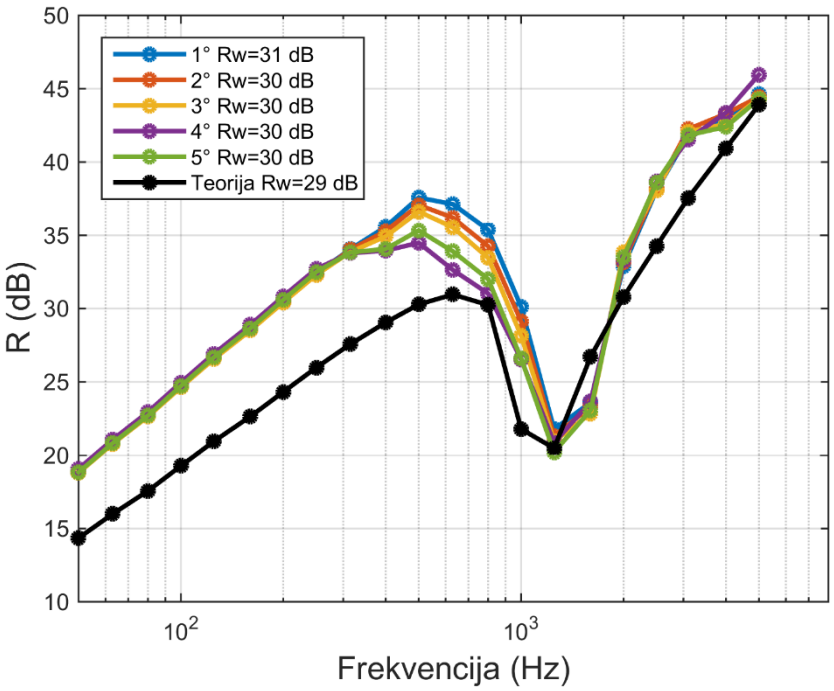
P3.1 Ulica cara Nikolaja II 21



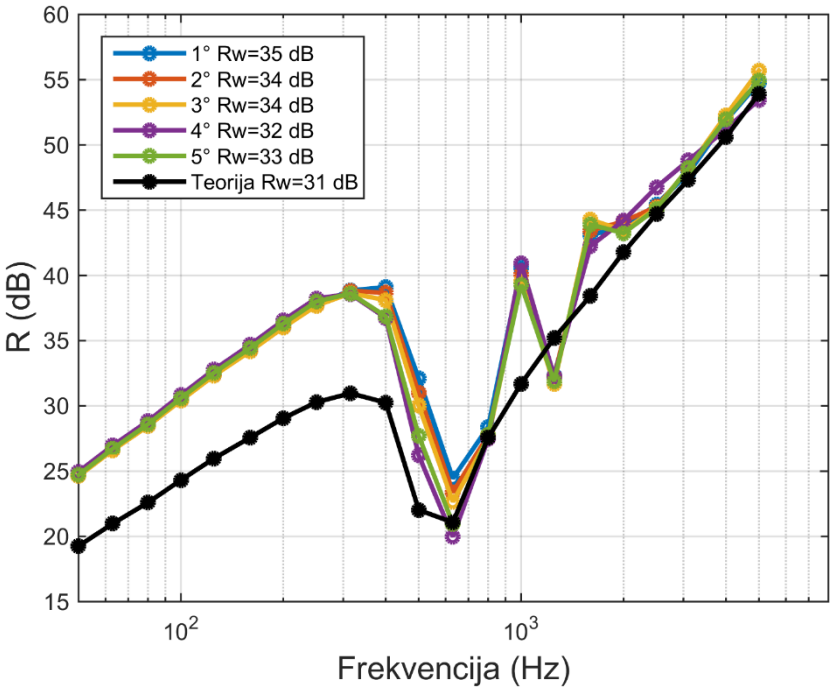
Slika 11.53 Proračunate izolacione moći za beton debljine 16 cm



Slika 11.54 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 6 mm

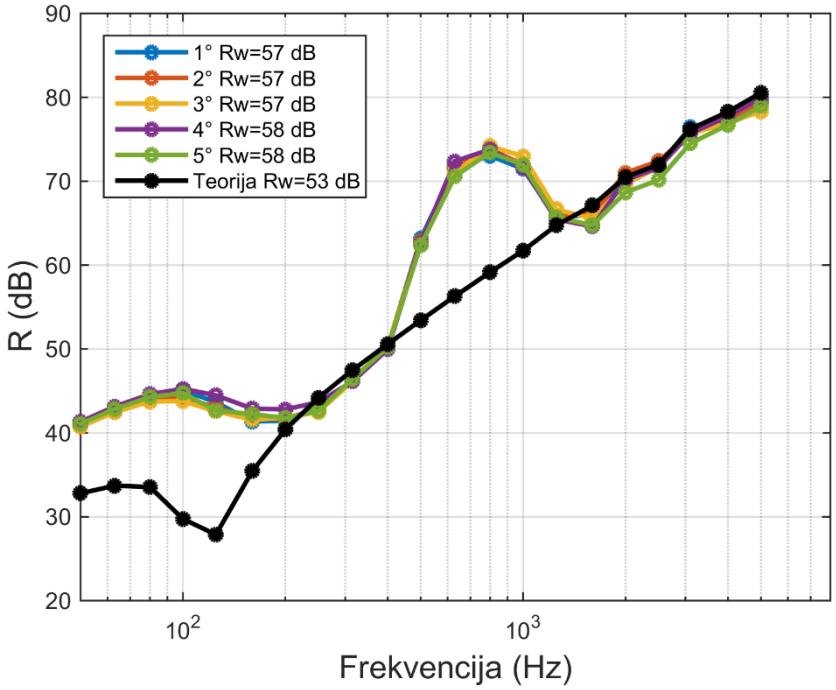


Slika 11.55 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 12 mm

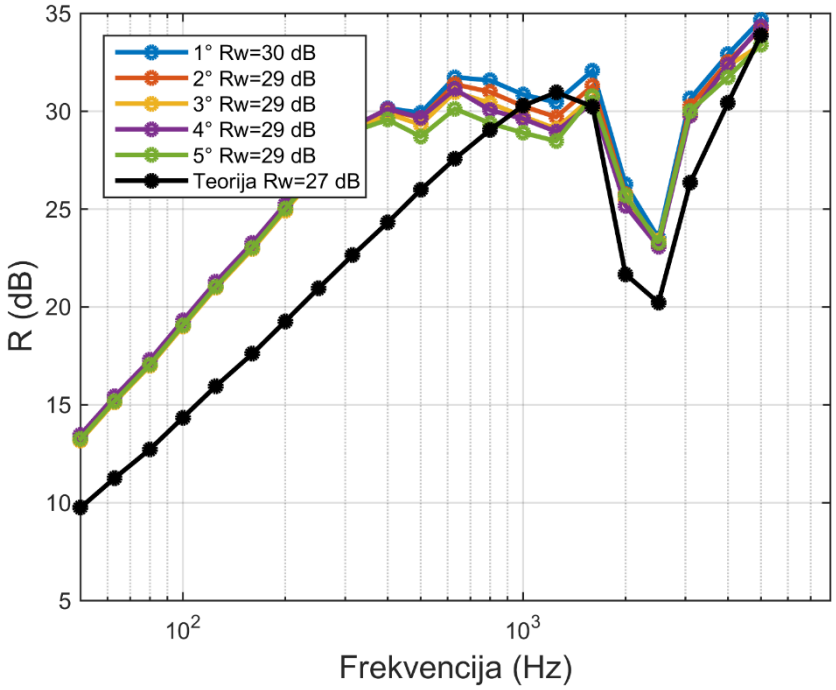


Slika 11.56 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 24 mm

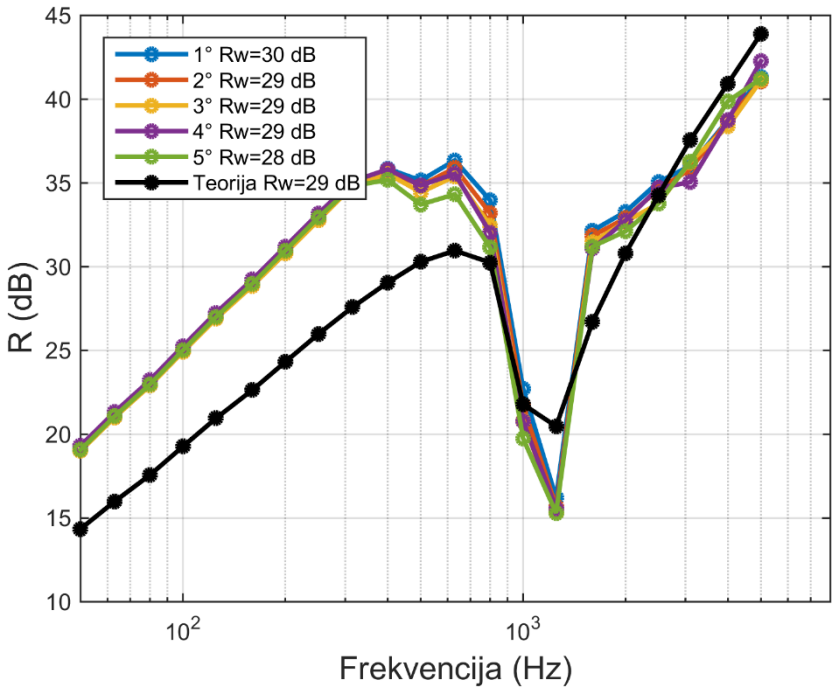
P3.2 Ulica bulevar kralja Aleksandra 73



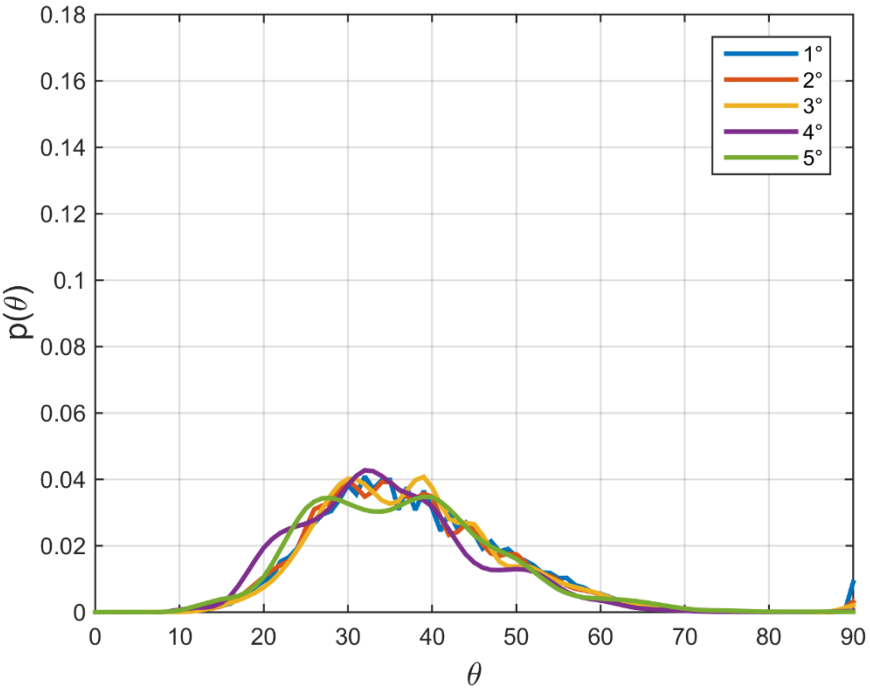
Slika 11.57 Proračunate izolacione moći za beton debljine 16 cm



Slika 11.58 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 6 mm

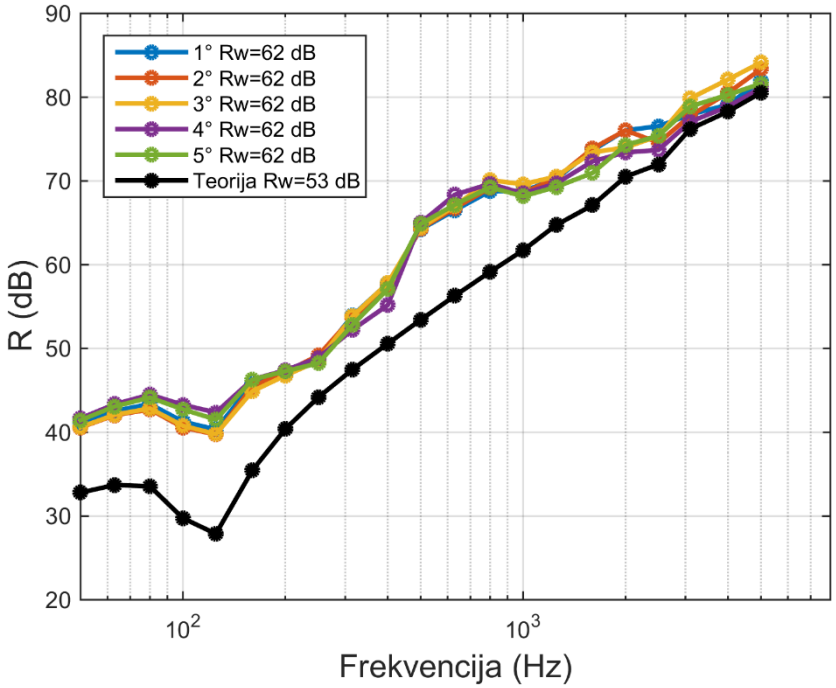


Slika 11.59 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 12 mm

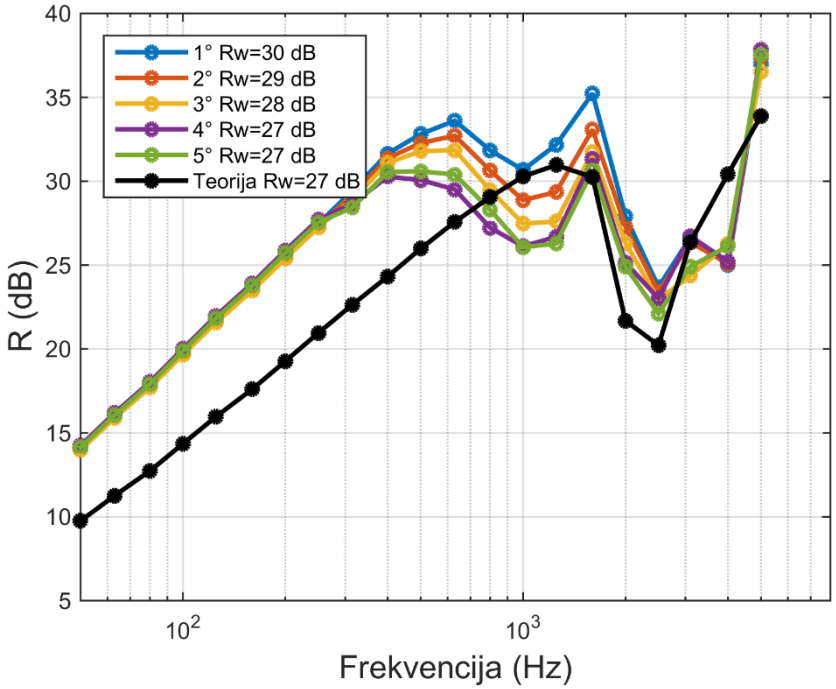


Slika 11.60 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 24 mm

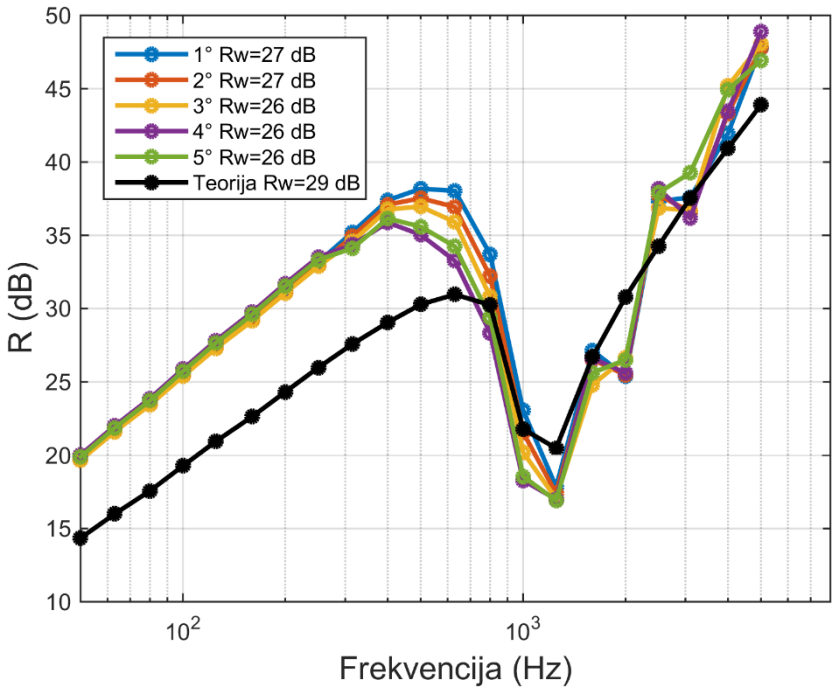
P3.3 Ulica Molerova 70



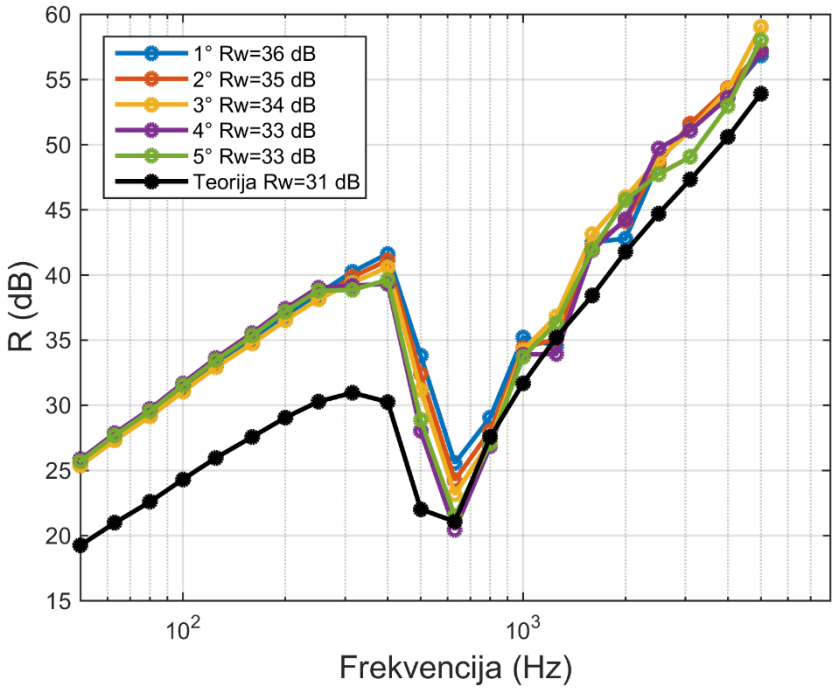
Slika 11.61 Proračunate izolacione moći za beton debljine 16 cm



Slika 11.62 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 6 mm

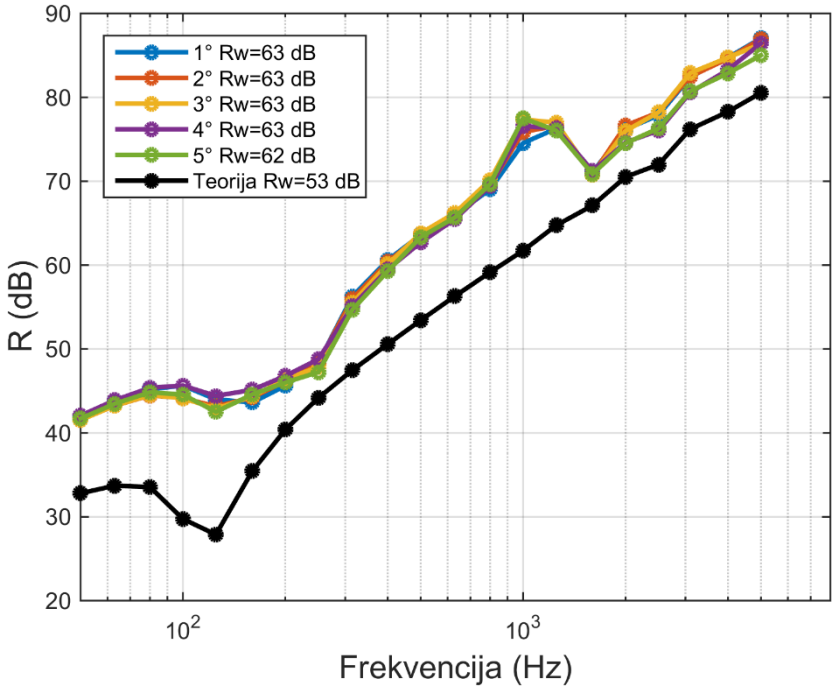


Slika 11.63 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 12 mm

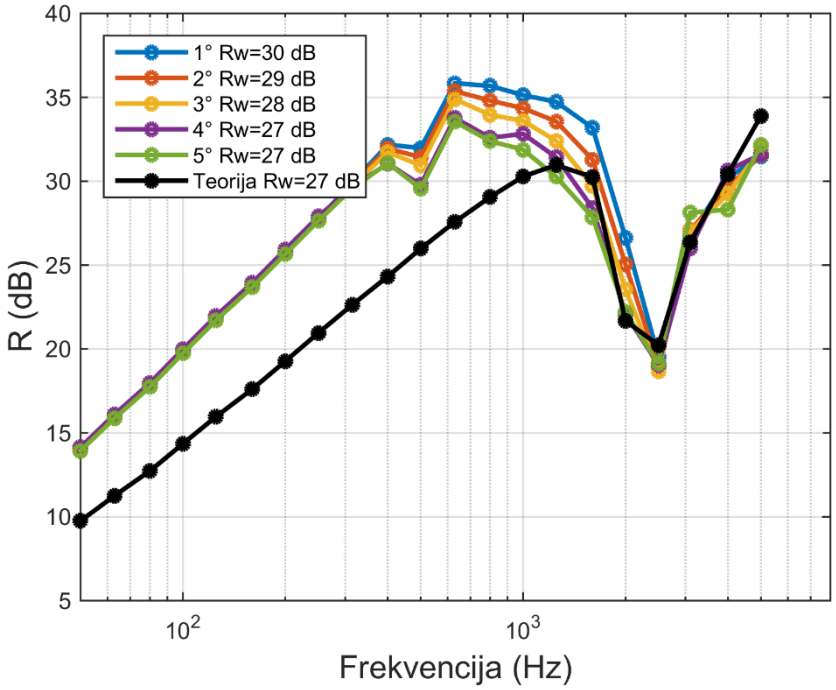


Slika 11.64 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 24 mm

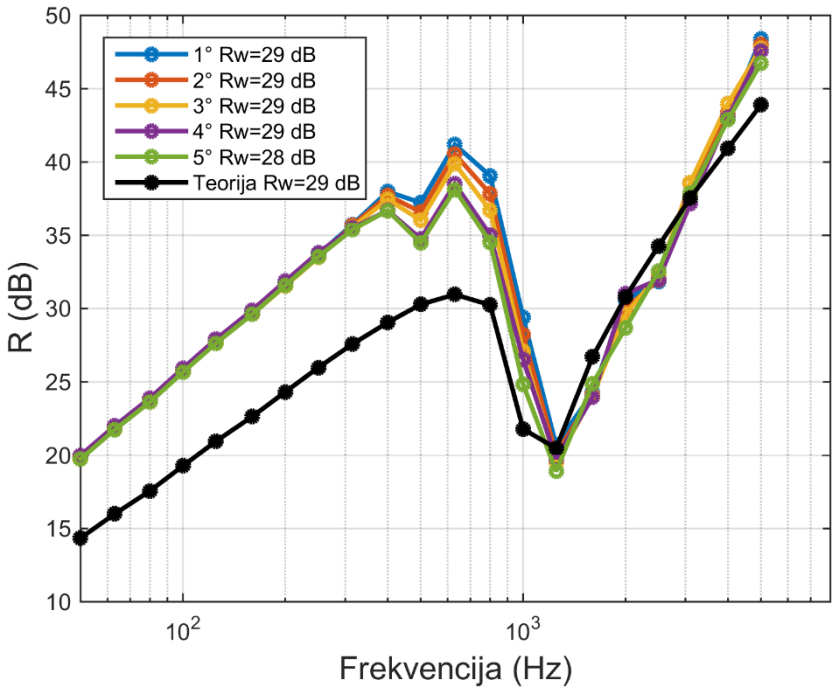
P3.4 Ulica Ilije Garašanina



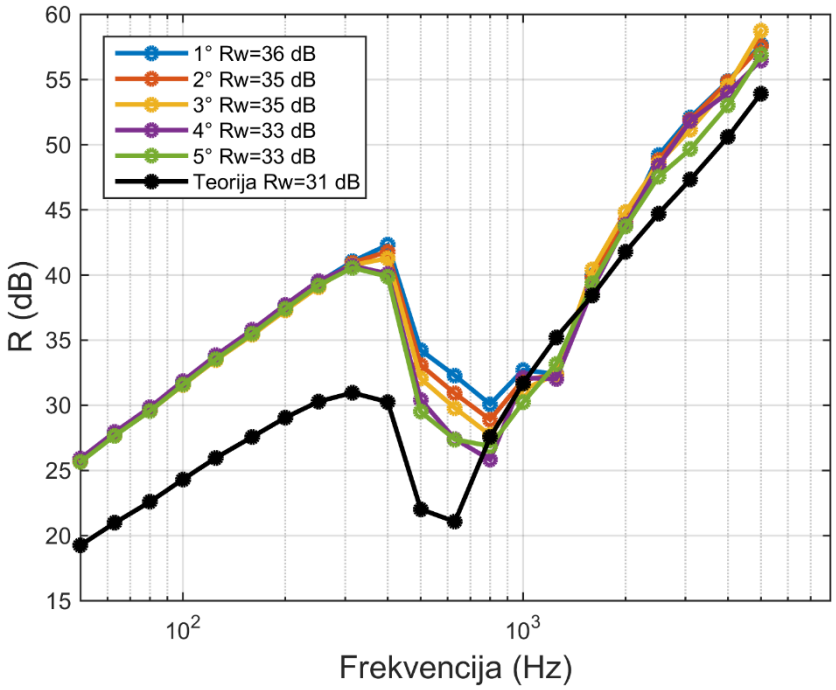
Slika 11.65 Proračunate izolacione moći za beton debljine 16 cm



Slika 11.66 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 6 mm



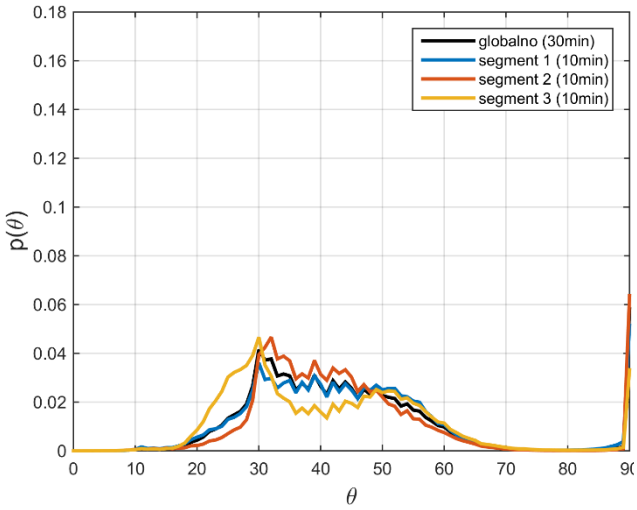
Slika 11.67 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 12 mm



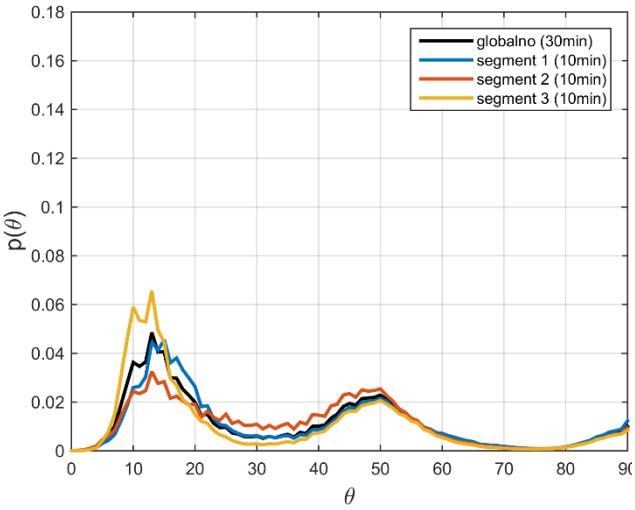
Slika 11.68 Proračunate izolacione moći za staklo debljine 24 mm

P.4 Prikaz ugaonih raspodela i izolacionih moći za različito trajanje snimanja saobraćajne buke

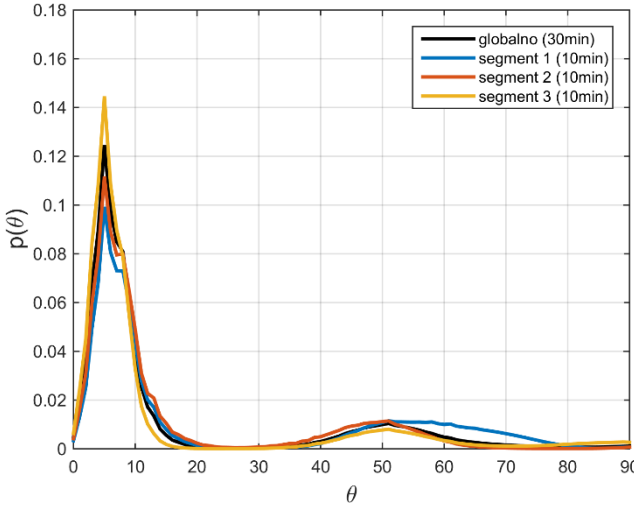
P4.1 Ulica cara Nikolaja II 21



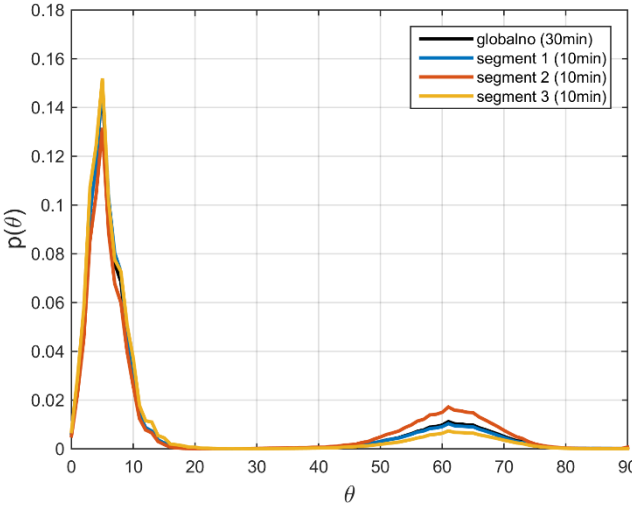
Slika 11.69 Raspodele za tercu 250 Hz



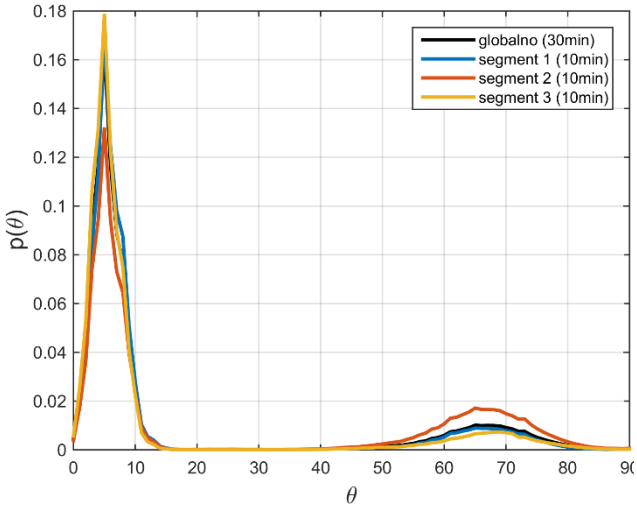
Slika 11.70 Raspodele za tercu 315 Hz



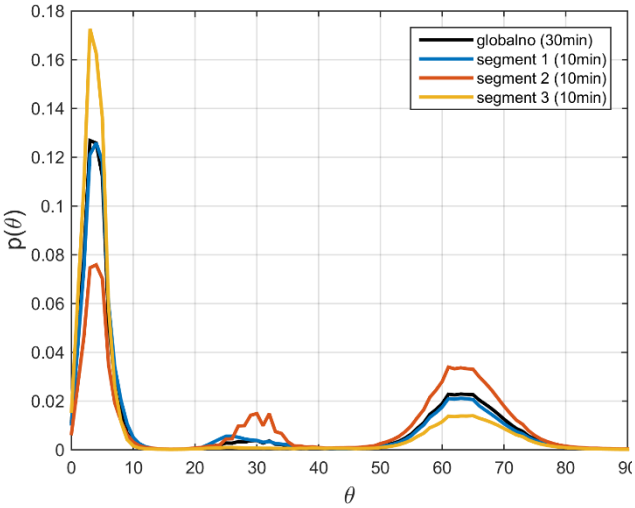
Slika 11.71 Raspodele za tercu 400 Hz



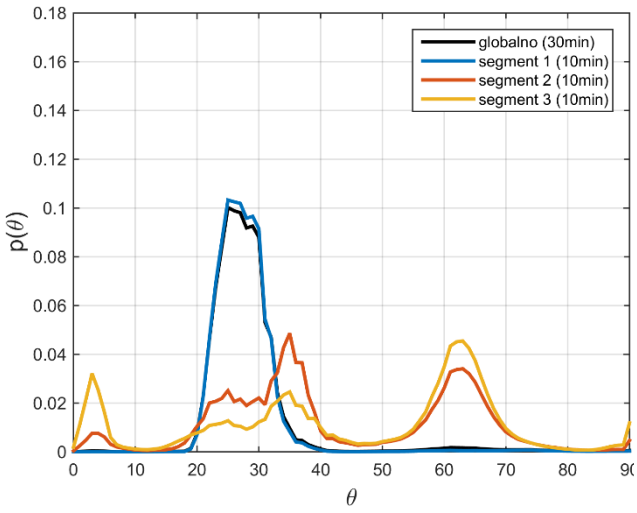
Slika 11.72 Raspodele za tercu 500 Hz



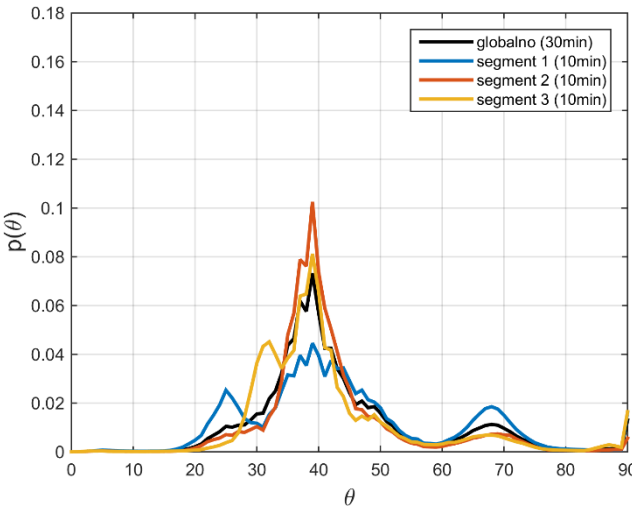
Slika 11.73 Raspodele za tercu 630 Hz



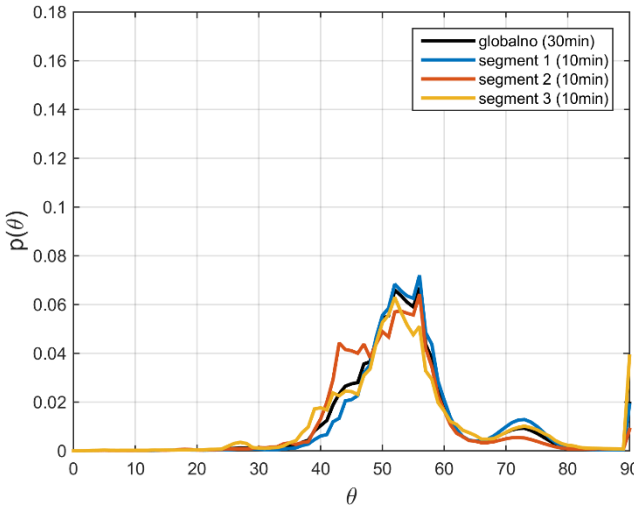
Slika 11.74 Raspodele za tercu 800 Hz



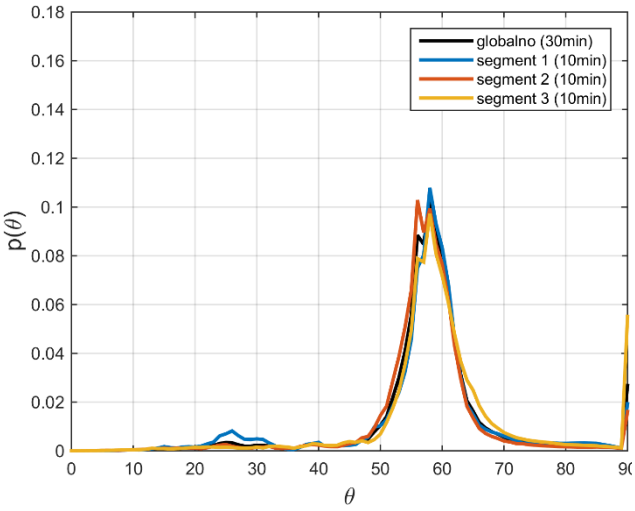
Slika 11.75 Raspodele za tercu 1000 Hz



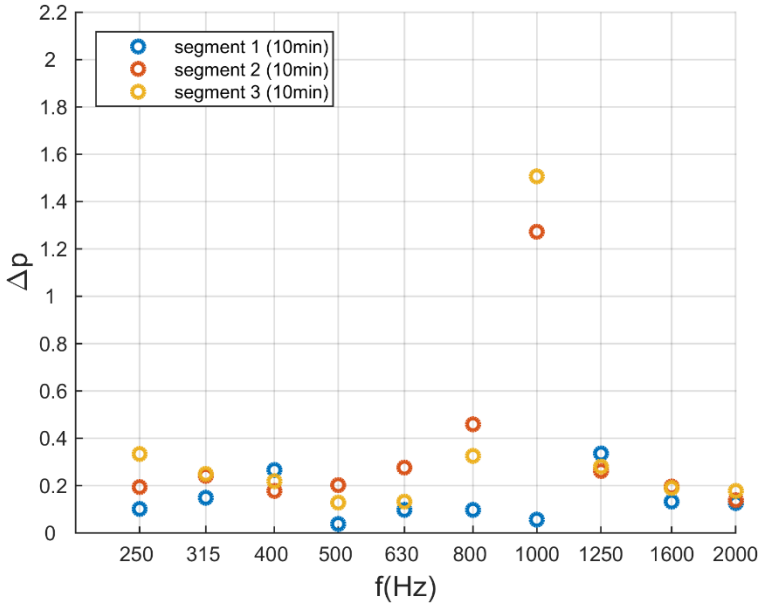
Slika 11.76 Raspodele za tercu 1250 Hz



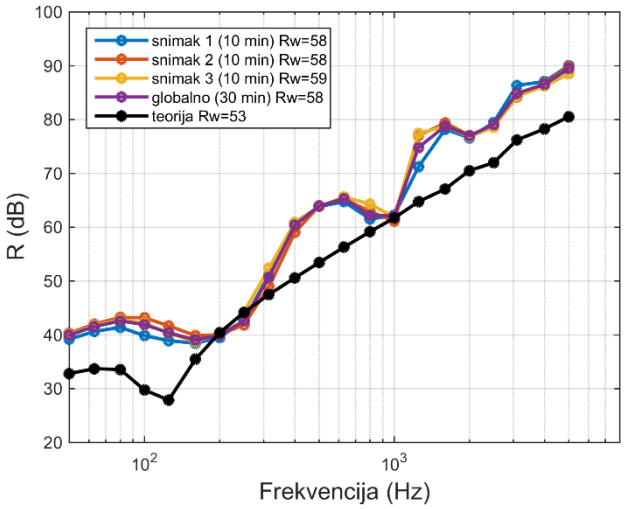
Slika 11.77 Raspodele za tercu 1600 Hz



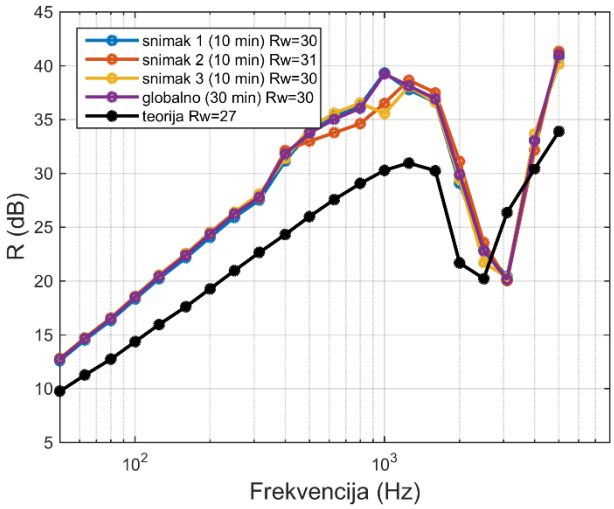
Slika 11.78 Raspodele za tercu 2000 Hz



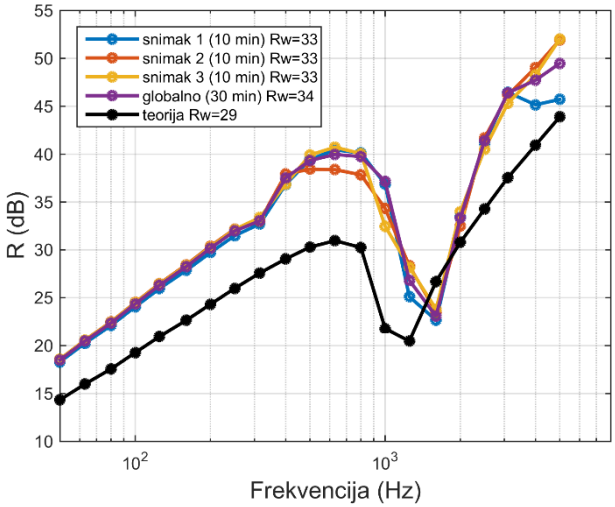
Slika 11.79 Razlika funkcija gustina verovatnoća u odnosu na globalnu funkciju gustine verovatnoće



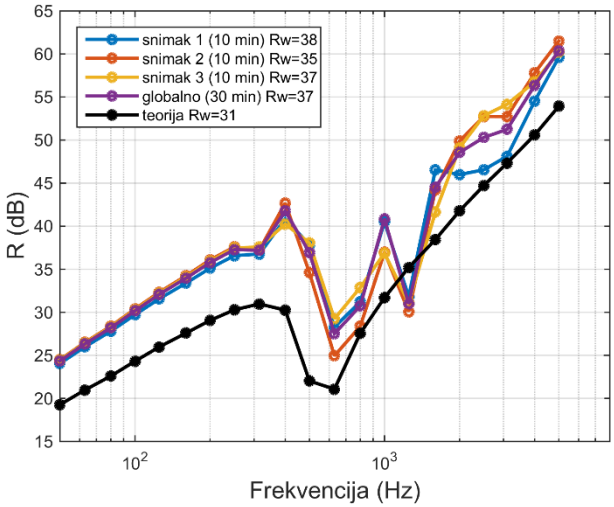
Slika 11.80 Izolaciona moć za beton 16 cm



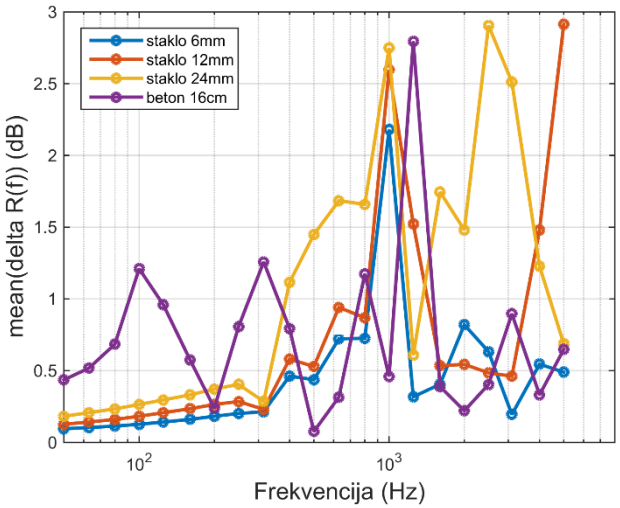
Slika 11.81 Izolaciona moć za staklo 6 mm



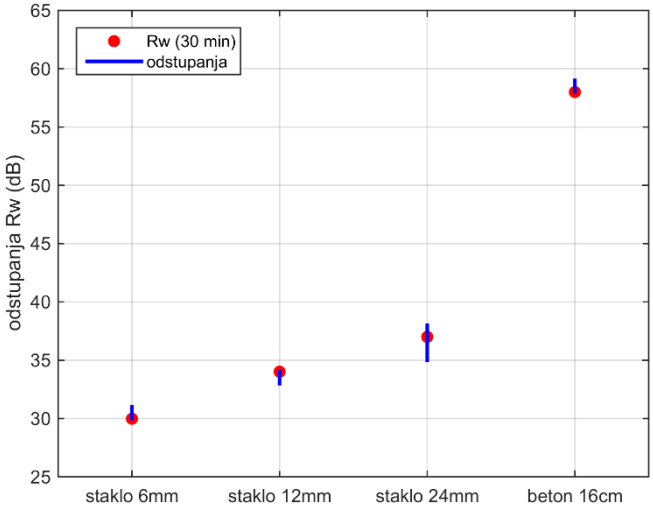
Slika 11.82 Izolaciona moć za staklo 12 mm



Slika 11.83 Izolaciona moć za staklo 24 mm

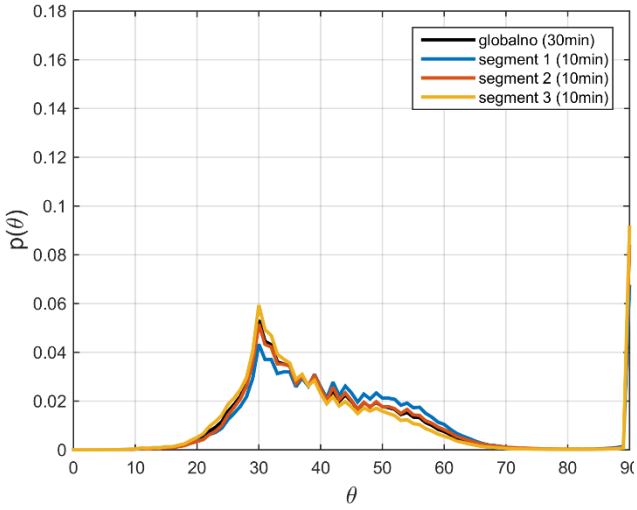


Slika 11.84 Razlika izolacionih moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

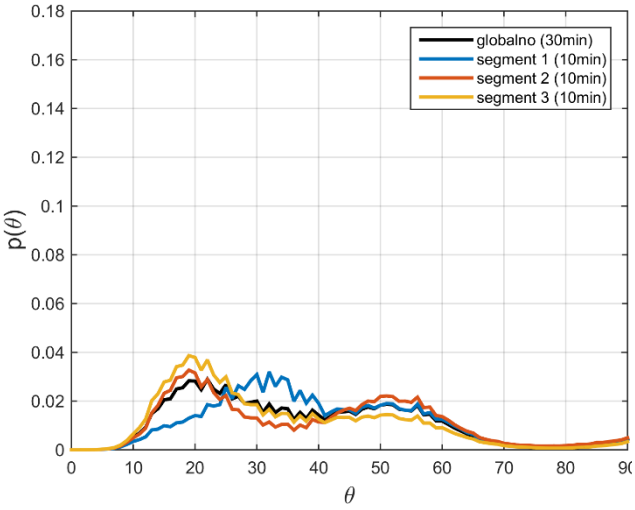


Slika 11.85 Razlika jednobrojne vrednosti izolacione moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

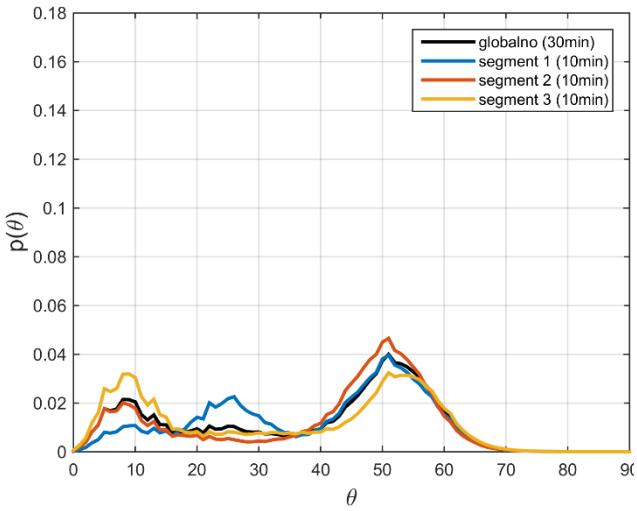
P4.2 Ulica bulevar kralja Aleksandra 73



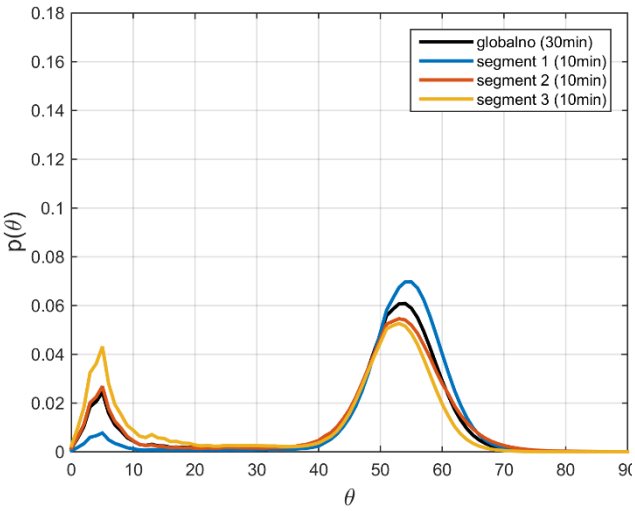
Slika 11.86 Raspodele za tercu 250 Hz



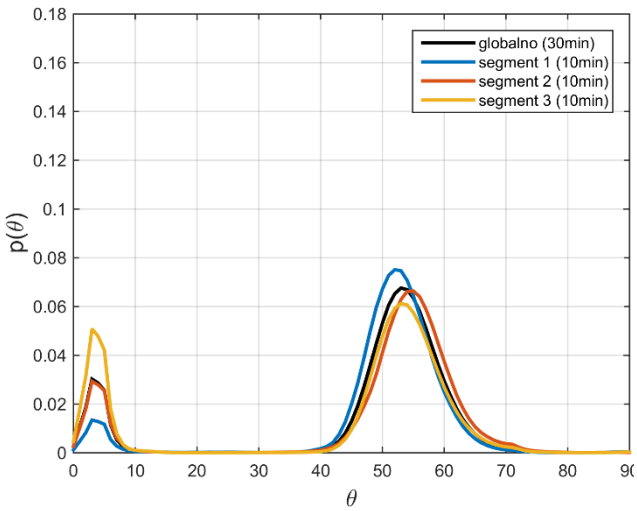
Slika 11.87 Raspodele za tercu 315 Hz



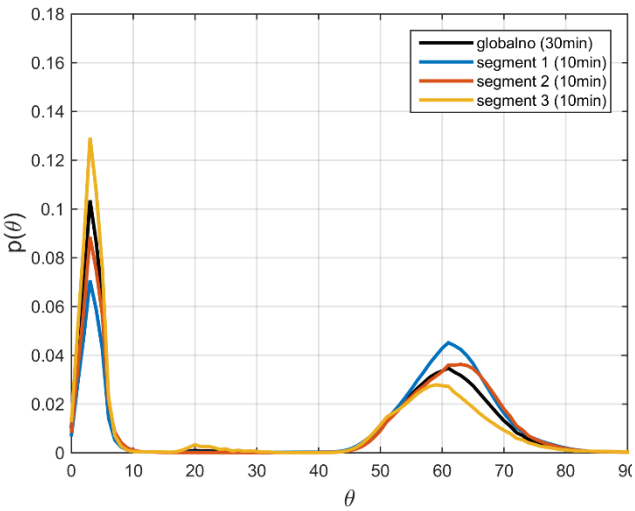
Slika 11.88 Raspodele za tercu 400 Hz



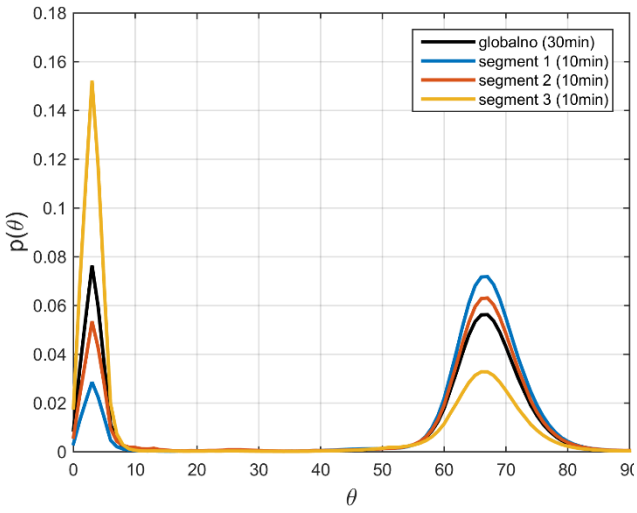
Slika 11.89 Raspodele za tercu 500 Hz



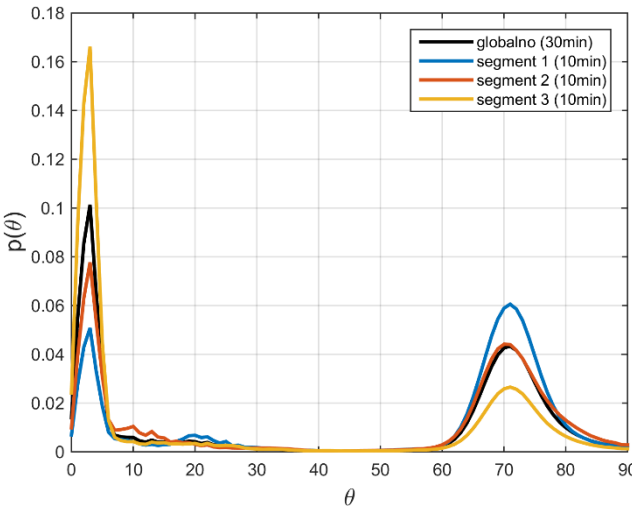
Slika 11.90 Raspodele za tercu 630 Hz



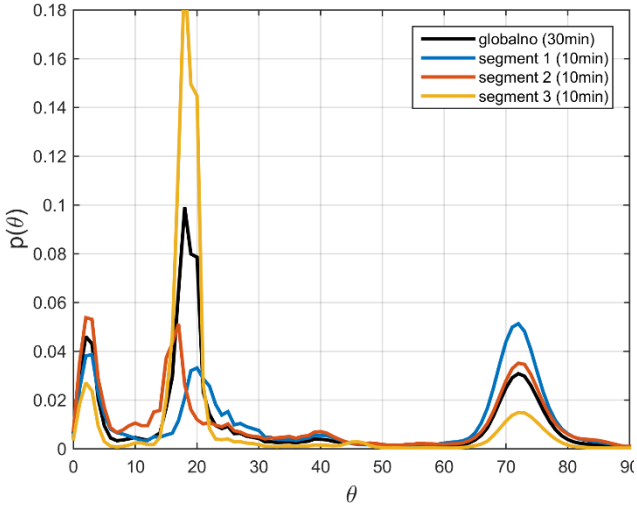
Slika 11.91 Raspodele za tercu 800 Hz



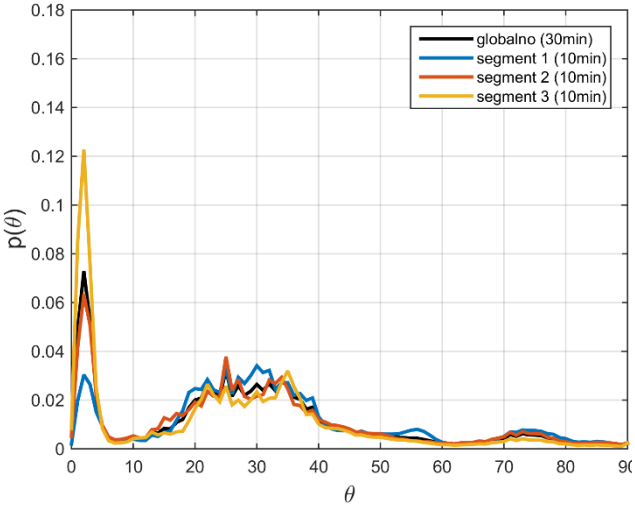
Slika 11.92 Raspodele za tercu 1000 Hz



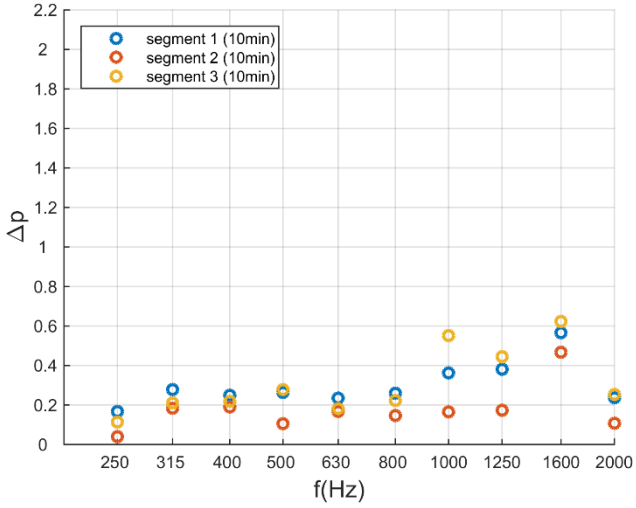
Slika 11.93 Raspodele za tercu 1250 Hz



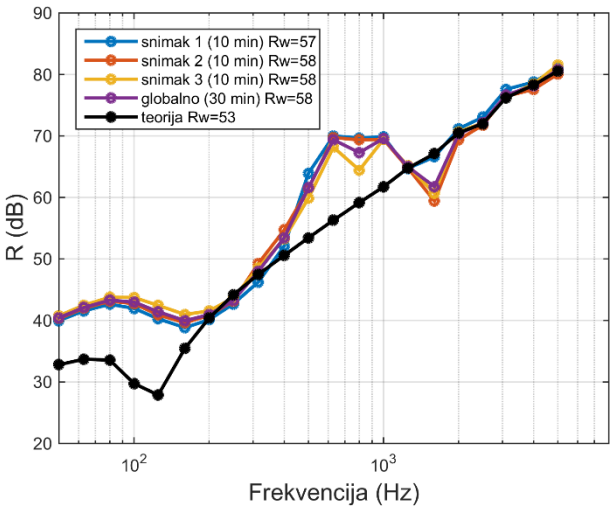
Slika 11.94 Raspodele za tercu 1600 Hz



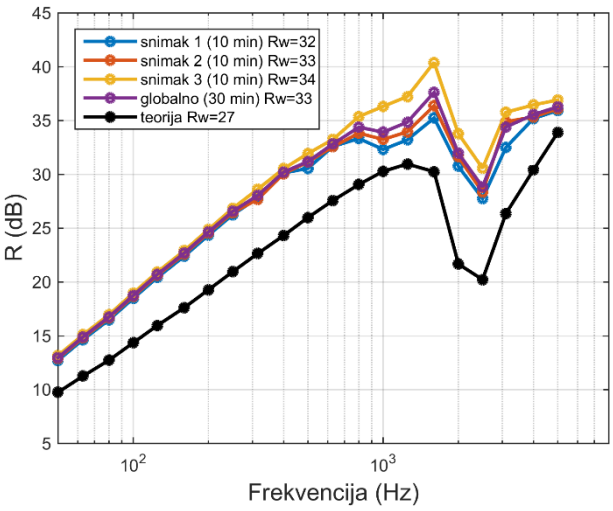
Slika 11.95 Raspodele za tercu 2000 Hz



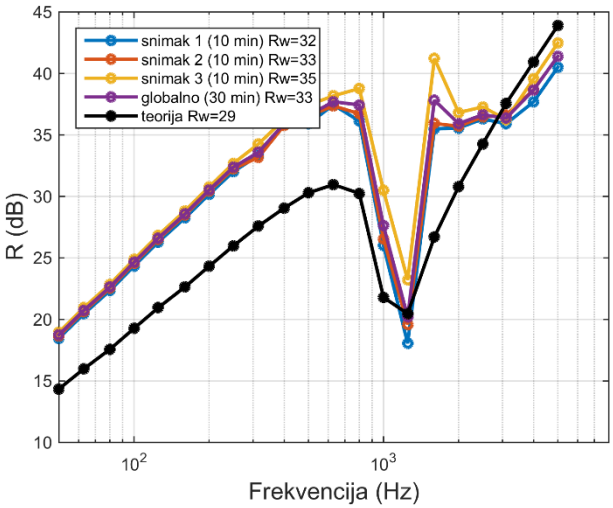
Slika 11.96 Razlika funkcija gustina verovatnoća u odnosu na globalnu funkciju gustine verovatnoće



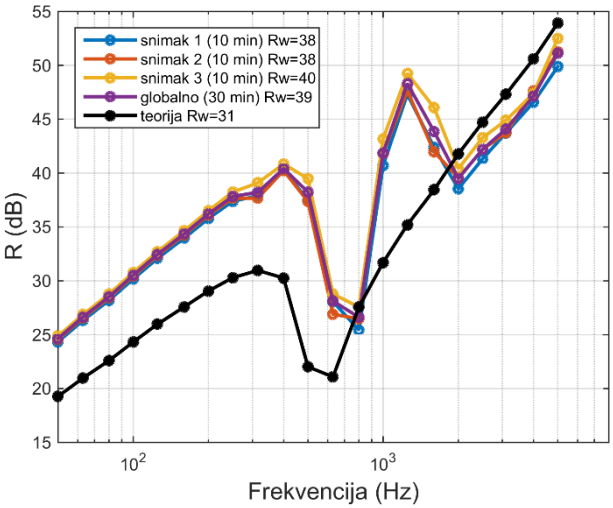
Slika 11.97 Izolaciona moć za beton 16 cm



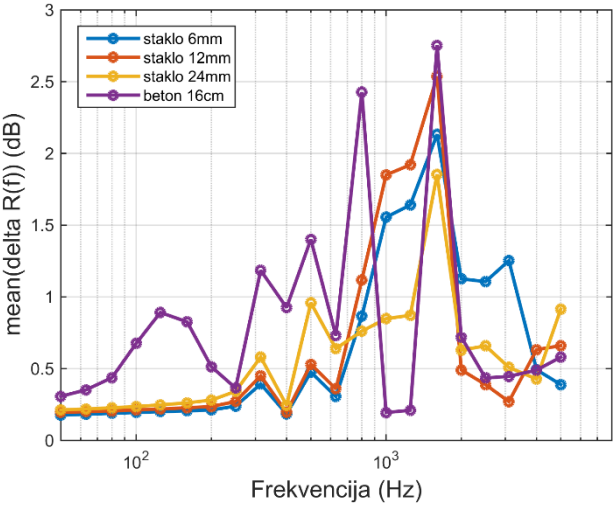
Slika 11.98 Izolaciona moć za staklo 6 mm



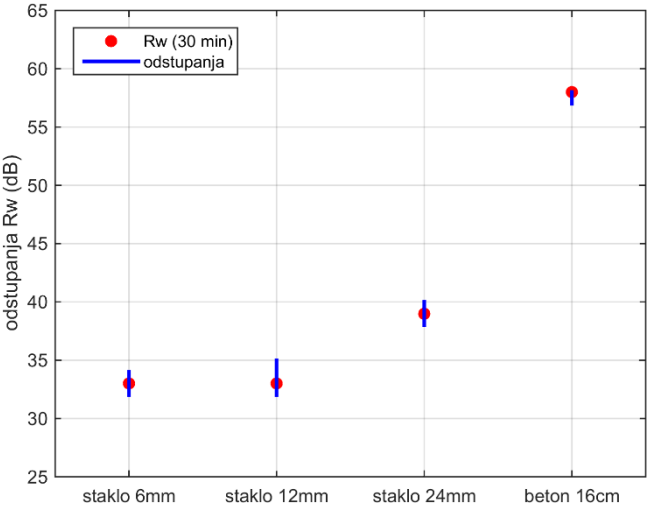
Slika 11.99 Izolaciona moć za staklo 12 mm



Slika 11.100 Izolaciona moć za staklo 24 mm

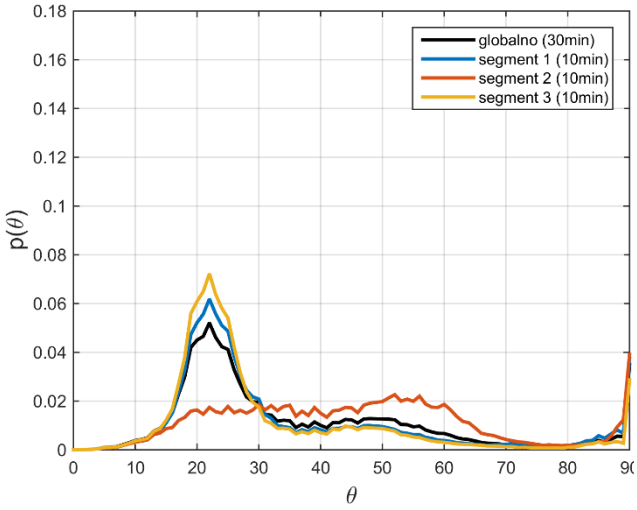


Slika 11.101 Razlika izolacionih moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

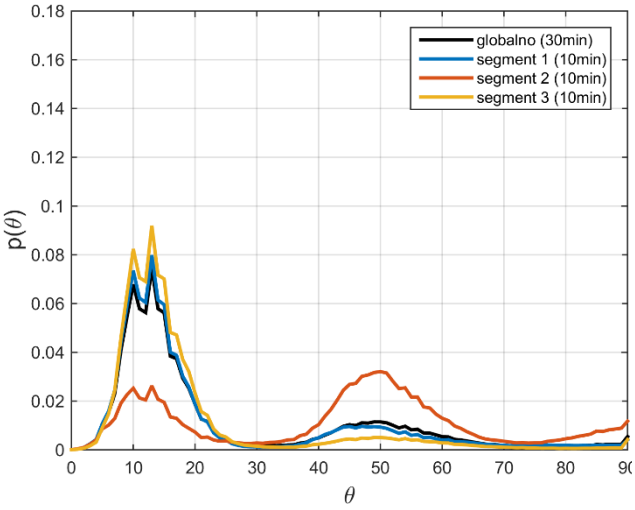


Slika 11.102 Razlika jednobrojne vrednosti izolacione moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

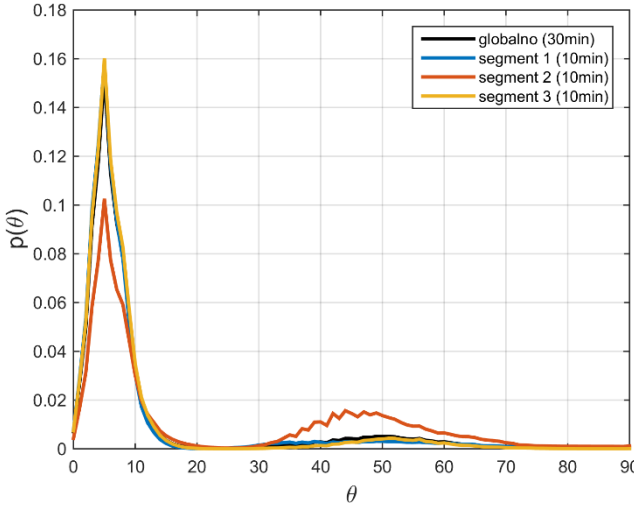
P4.3 Molerova



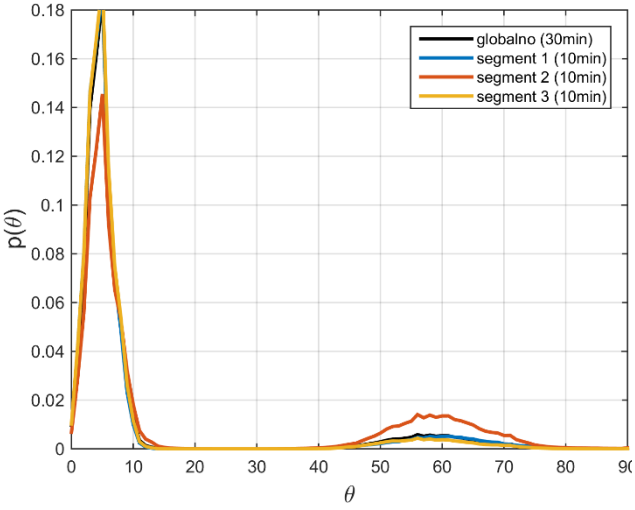
Slika 11.103 Raspodele za tercu 250 Hz



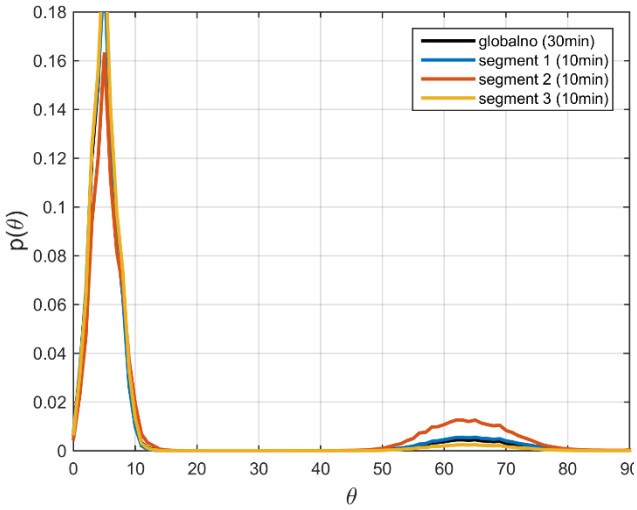
Slika 11.104 Raspodele za tercu 315 Hz



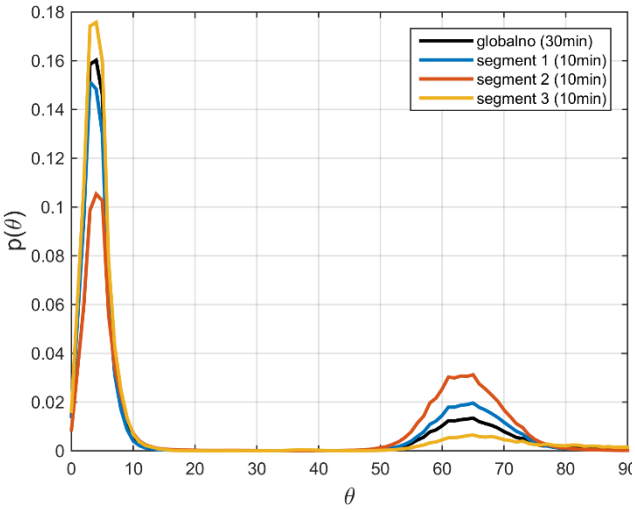
Slika 11.105 Raspodele za tercu 400 Hz



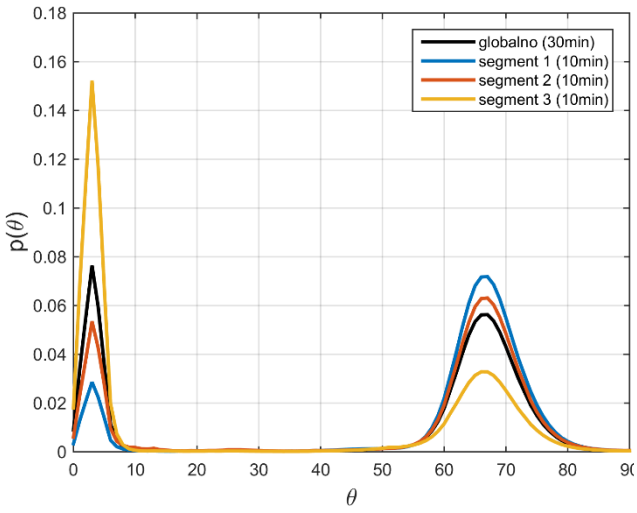
Slika 11.106 Raspodele za tercu 500 Hz



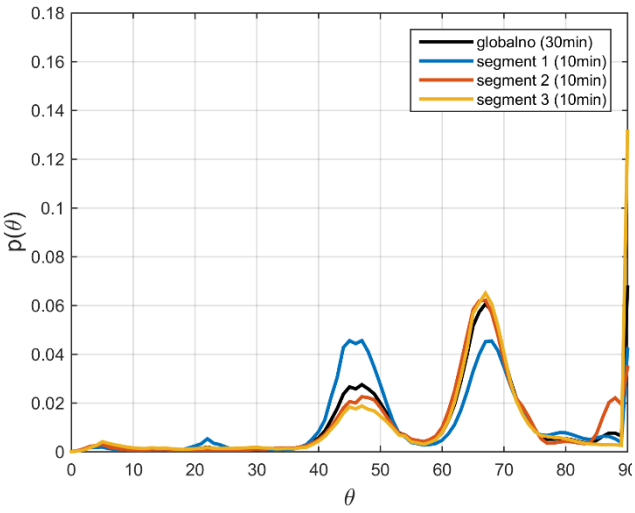
Slika 11.107 Raspodele za tercu 630 Hz



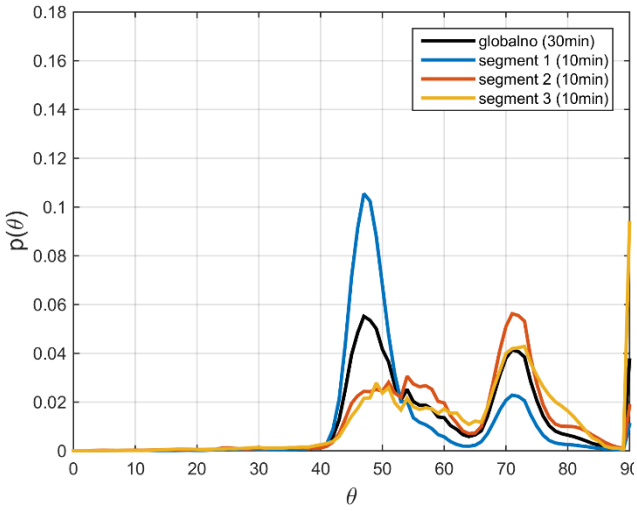
Slika 11.108 Raspodele za tercu 800 Hz



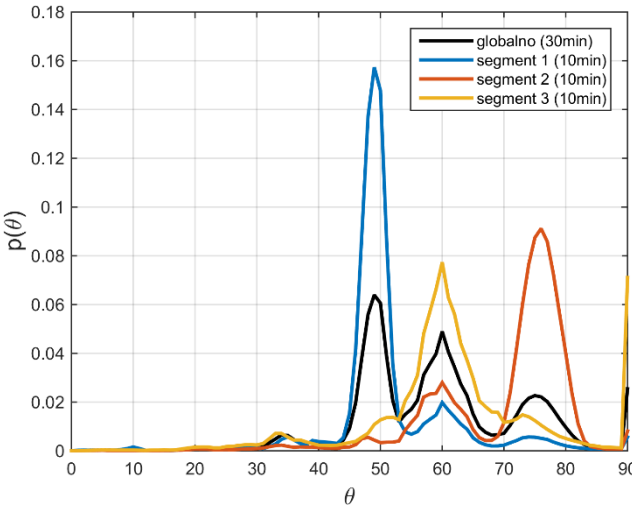
Slika 11.109 Raspodele za tercu 1000 Hz



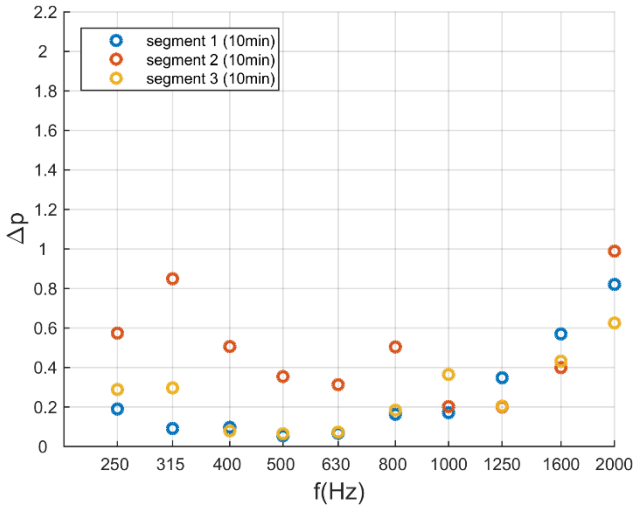
Slika 11.110 Raspodele za tercu 1250 Hz



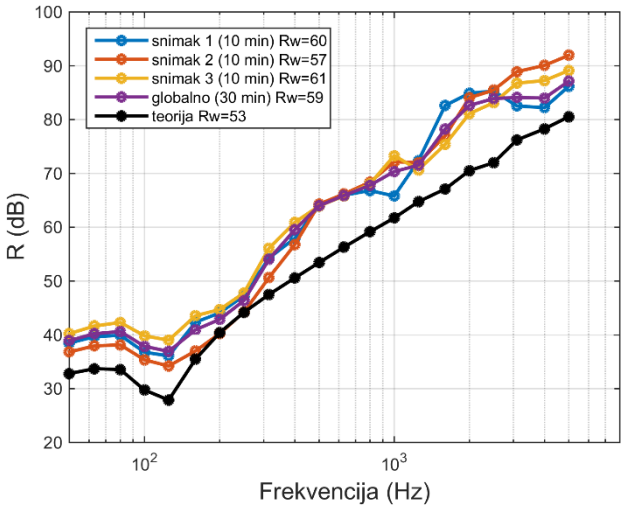
Slika 11.111 Raspodele za tercu 1600 Hz



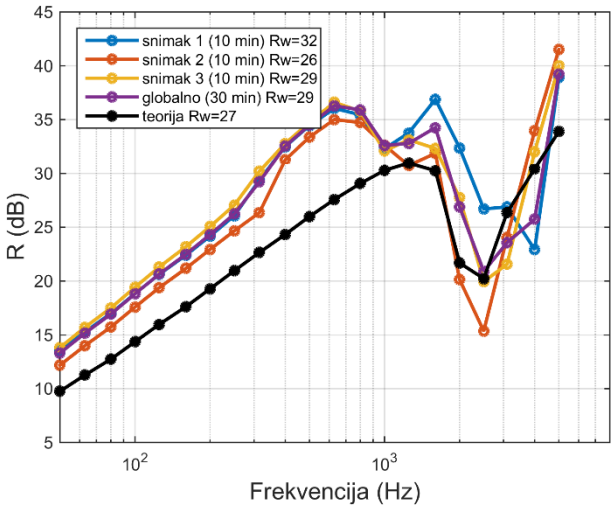
Slika 11.112 Raspodele za tercu 2000 Hz



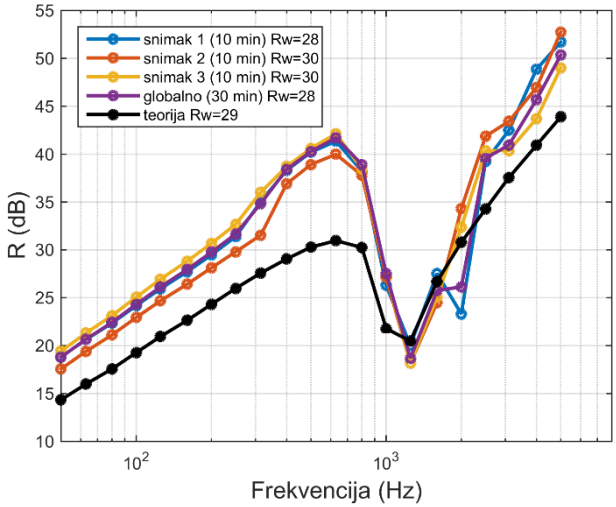
Slika 11.113 Razlika funkcija gustina verovatnoća u odnosu na globalnu funkciju gustine verovatnoće



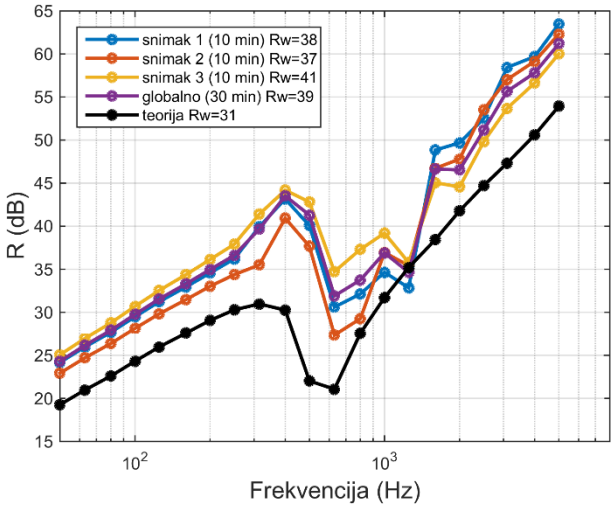
Slika 11.114 Izolaciona moć za beton 16 cm



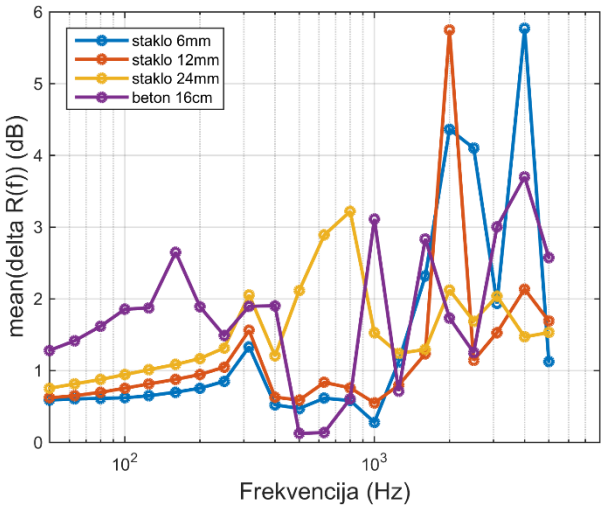
Slika 11.115 Izolaciona moć za staklo 6 mm



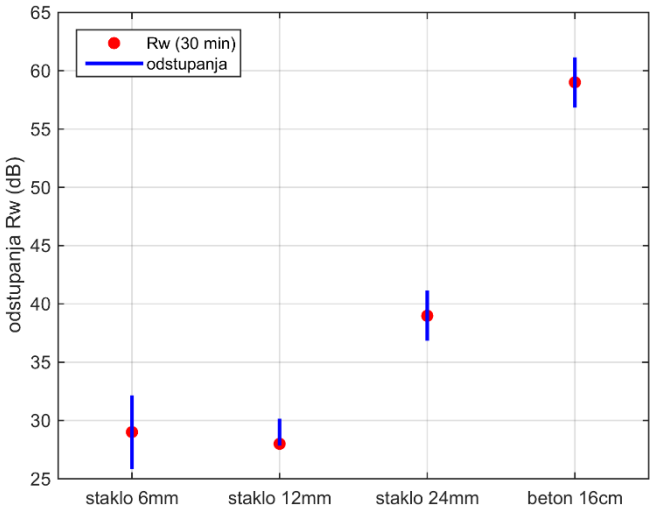
Slika 11.116 Izolaciona moć za staklo 12 mm



Slika 11.117 Izolaciona moć za staklo 24 mm

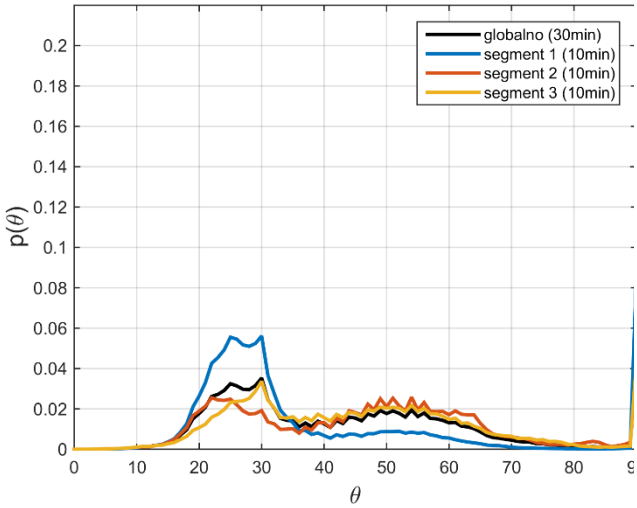


Slika 11.118 Razlika izolacionih moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

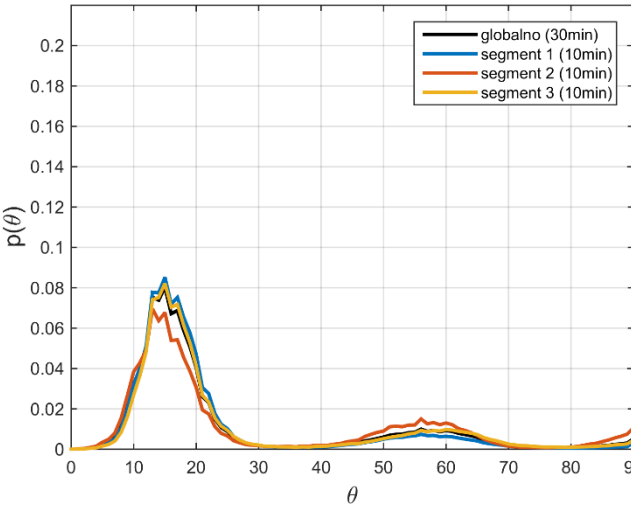


Slika 11.119 Razlika jednobrojne vrednosti izolacione moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

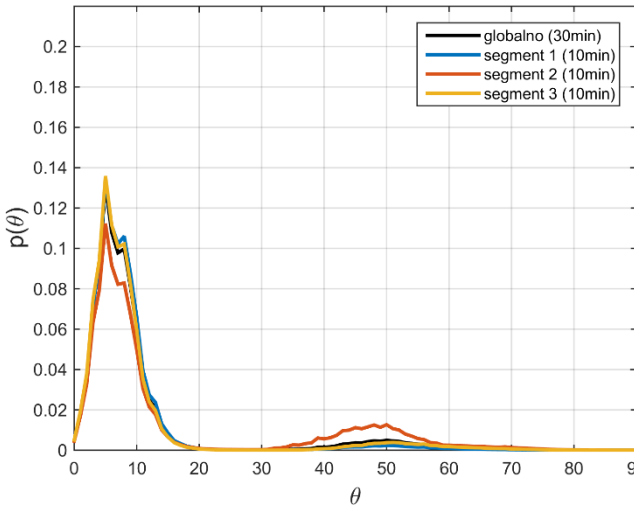
P4.4 Ulica Ilije Garašanina



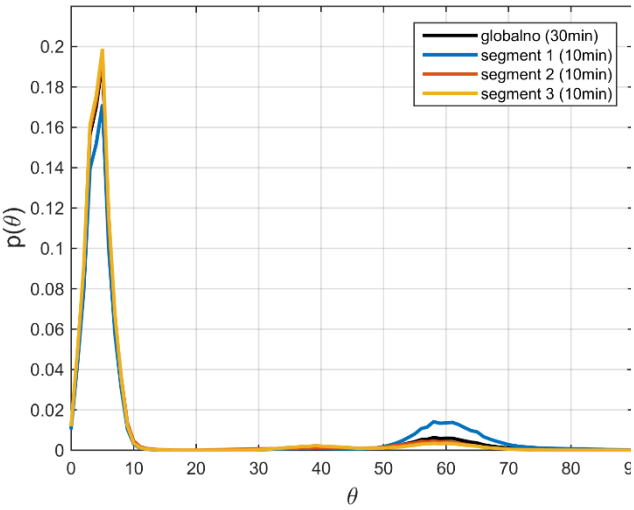
Slika 11.120 Raspodele za tercu 250 Hz



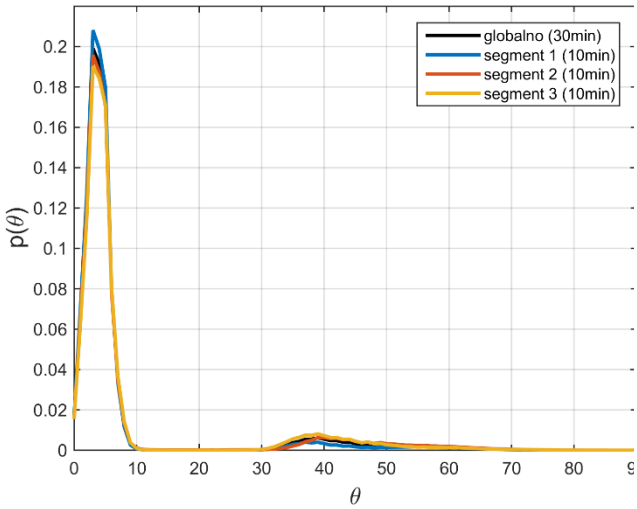
Slika 11.121 Raspodele za tercu 315 Hz



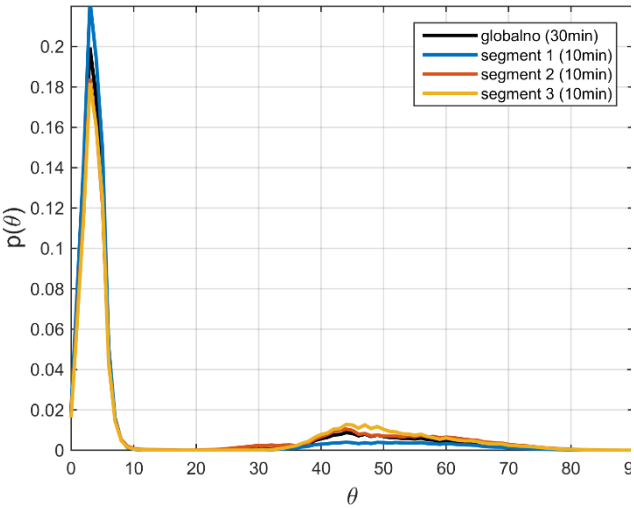
Slika 11.122 Raspodele za tercu 400 Hz



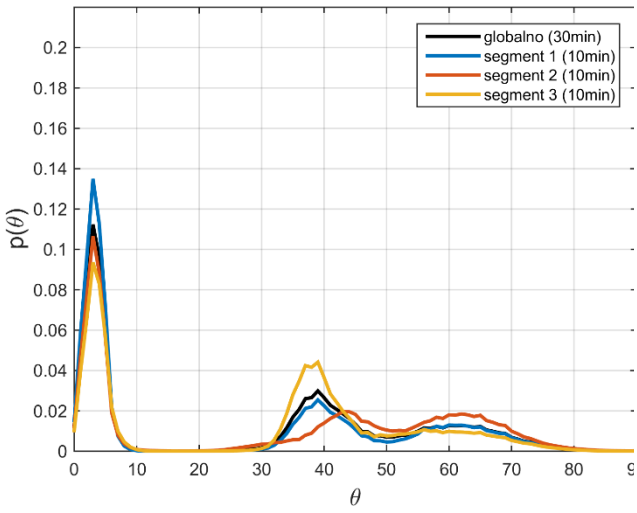
Slika 11.123 Raspodele za tercu 500 Hz



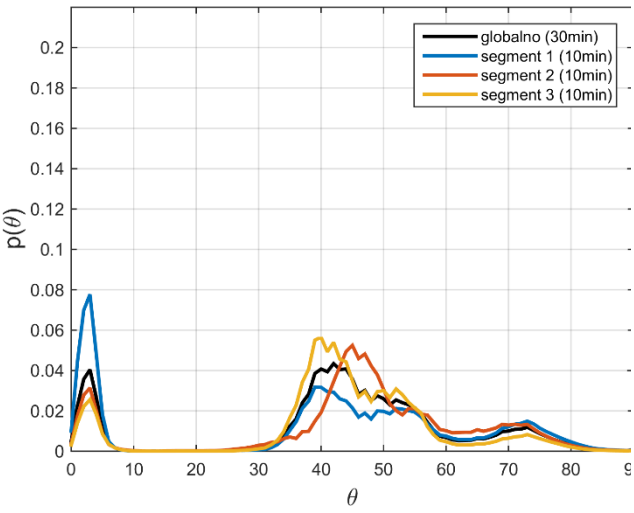
Slika 11.124 Raspodele za tercu 630 Hz



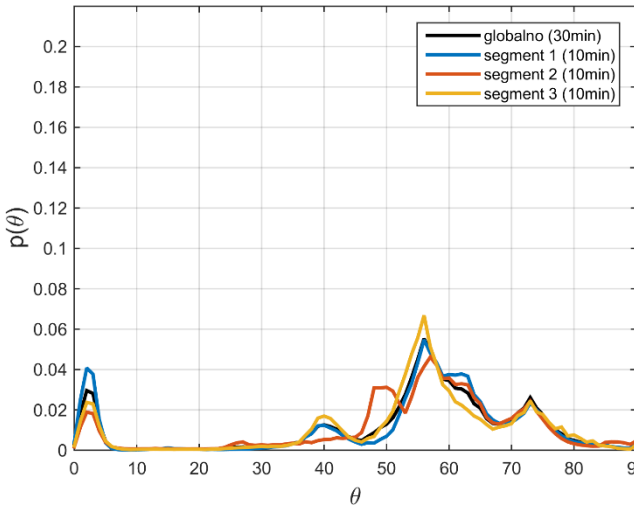
Slika 11.125 Raspodele za tercu 800 Hz



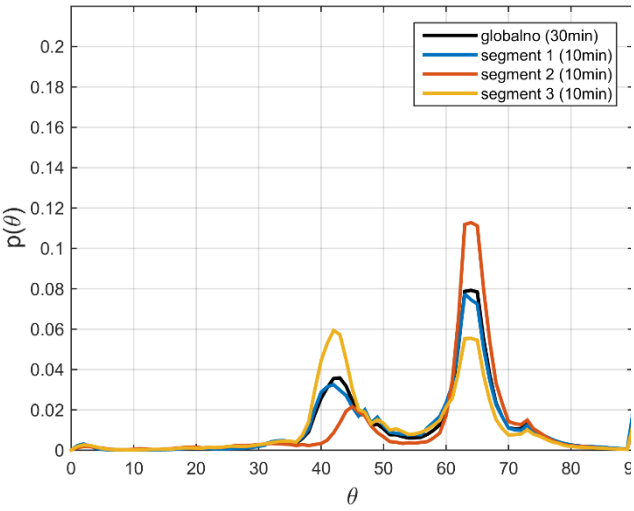
Slika 11.126 Raspodele za tercu 1000 Hz



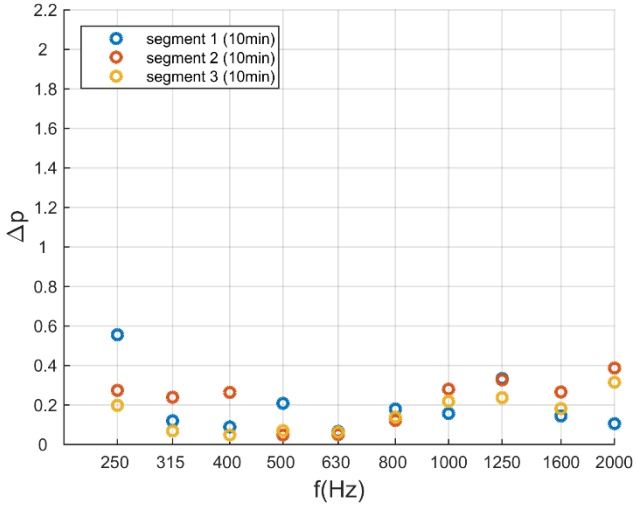
Slika 11.127 Raspodele za tercu 1250 Hz



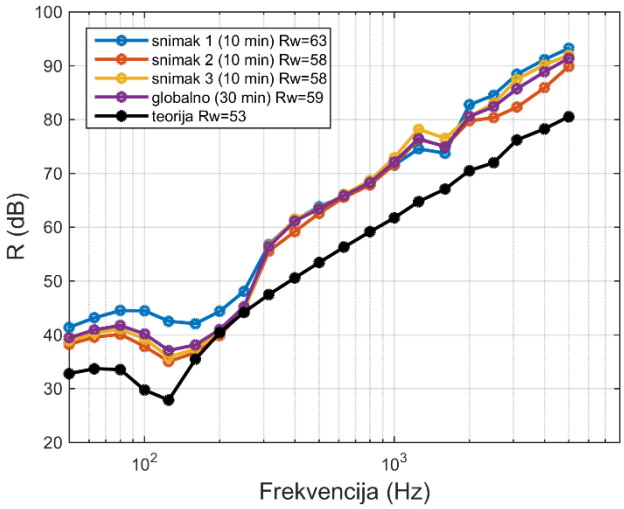
Slika 11.128 Raspodele za tercu 1600 Hz



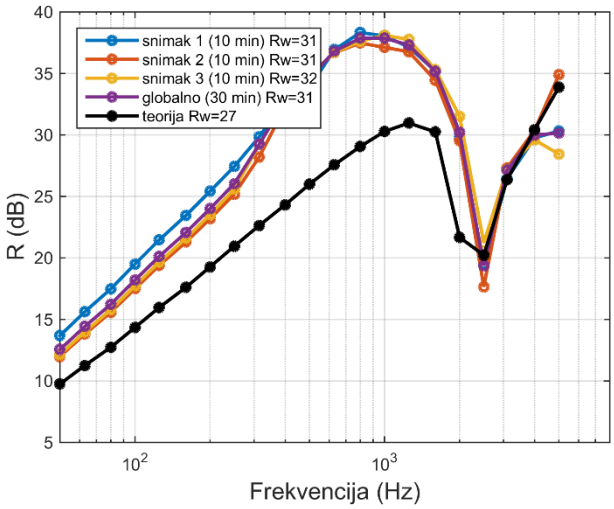
Slika 11.129 Raspodele za tercu 2000 Hz



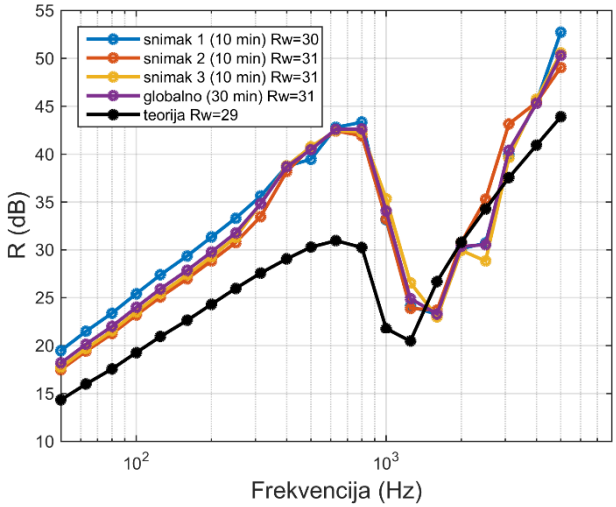
Slika 11.130 Razlika funkcija gustina verovatnoća u odnosu na globalnu funkciju gustine verovatnoće



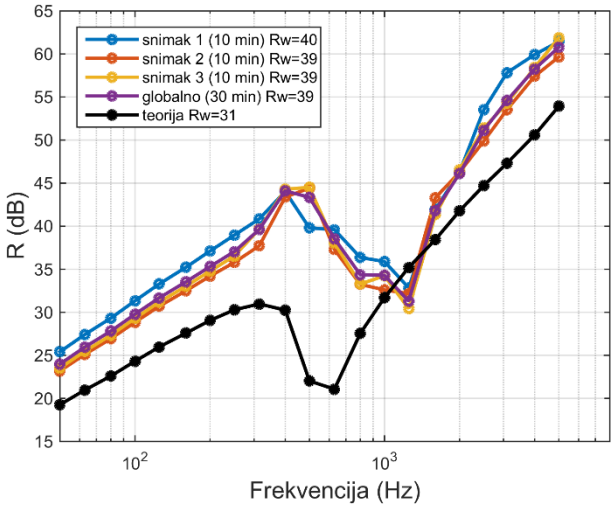
Slika 11.131 Izolaciona moć za beton 16 cm



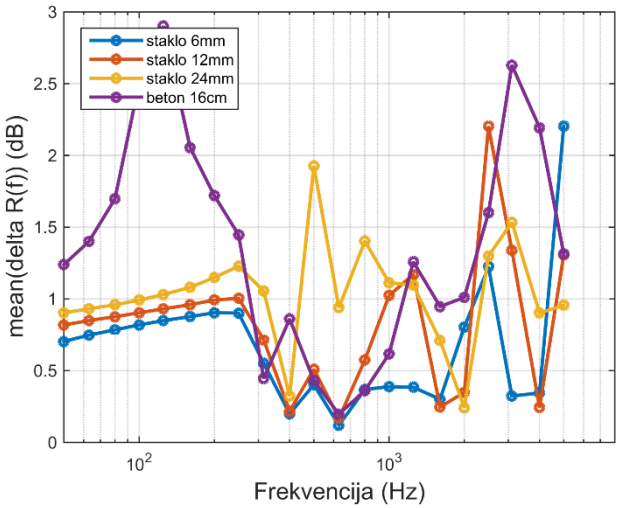
Slika 11.132 Izolaciona moć za staklo 6 mm



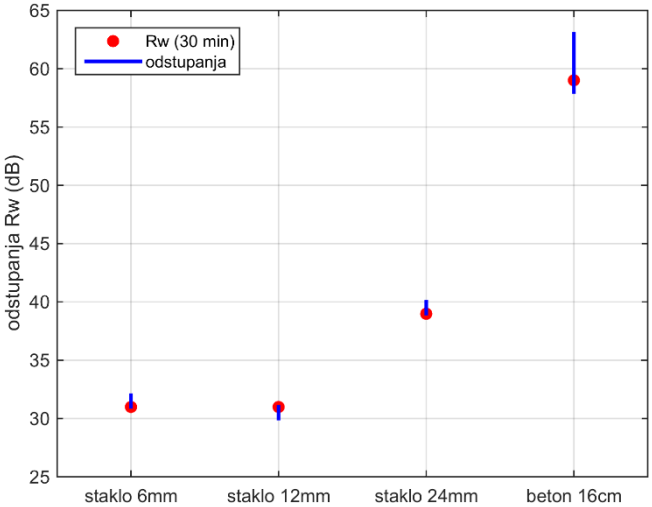
Slika 11.133 Izolaciona moć za staklo 12 mm



Slika 11.134 Izolaciona moć za staklo 24 mm



Slika 11.135 Razlika izolacionih moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći



Slika 11.136 Razlika jednobrojne vrednosti izolacione moći u odnosu na globalnu vrednost izolacione moći

Biografija autora

Miodrag S. Stanojević rođen je 22.09.1989. godine u Zvorniku, Bosna i Hercegovina. Osnovnu i srednju školu završio je u Beogradu sa odličnim uspehom Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2008. godine. U toku osnovnih studija na Odseku za telekomunikacije i informacione tehnologije, smer Audio i video tehnologije, ostvario je prosečnu ocenu 8,89. Diplomirao je 2012. godine sa ocenom 10. na temu "Zvučnik sa električnim lukom". Tokom osnovnih studija izlagao je jedan svoj rad na međunarodnoj konferenciji TELFOR 2011, za koji je dobio nagradu „Ilija Stojanović" kao najbolji studentski rad na konferenciji.

Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, modul Audio i video tehnologije, upisao je 2012. godine, a završio 2013. godine sa prosečnom ocenom 10,00. Naslov master rada je bio „Izrada i izvođenje projekta kućnog bioskopa". Tokom osnovnih i master studija bio je stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. U četvrtoj godini studija boravio je na dvomesečnoj praksi u Radio Televiziji Srbije, kao i dvomesečnu praksu u kompaniji "VIP Mobile". Oktobra 2013. godine upisao je doktorske akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, modul Telekomunikacije.

Od marta 2013. godine do danas zaposlen je kao inženjer razvoja u kompaniji "Bit Projekt d.o.o.", na poslovima projektovanja i izvođenja telekomunikacionih sistema. Učestvovao je u više projekata iz oblasti audio i video sistema kao što su: sistem za ozvučavanje Hrama Sv. Save, sistem zvučnog maskiranja za poslovni objekat kompanije „NCR" u Beogradu, projekat telekomunikacionih i signalnih instalacija za objekat hotela „Gorski" na Kopaoniku, projekt multimedijalnih sistema za objekat Ustanova „Kultura", Bajina Bašta, projekat multimedijalnih sistema koncertne sale i pratećih prostora u okviru rekonstrukcije zgrade SANU, i druge. Miodrag Stanojević je do sad objavio 3 rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste i 2 rada u nacionalnim časopisima. U zbornicima sa međunarodnih skupova objavio je 9 radova, a u zbornicima nacionalnih konferencija 11 radova. Za jed rad u časopisu iz kategorije M22 dobio je 2018. godine nagradu za značajni naučni doprinos iz oblasti telekomunikacija u vrhunskom svetskom časopisu. Takođe je dobio nagradu za najbolji rad i prezentaciju na međunarodnom skupu *International Congress on Acoustics,* ICA 2019. godine u Ahenu. Nagradu dodeljuje *European Acoustics Association, EAA.*

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Миодраг Станојевић

Број индекса 2013/5020

Изјављујем

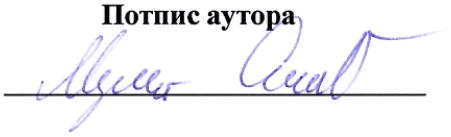
да је докторска дисертација под насловом

Процена индекса приватности у зградама на основу угаоне расподеле инцидентне енергије

- 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 другихлица.

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2023.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторскограда

Име и презиме аутора Миодраг Станојевић

Број индекса 2013/5020

Студијски програм Телекомуникације

Наслов рада Процена индекса приватности у зградама на основу угаоне расподеле инцидентне енергије

Ментор др Драгана Шумарац Павловић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања 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, 28.03.2023

Изјава о коришћењу

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

Процена индекса приватности у зградама на основу угаоне расподеле инцидентне енергије

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, 28.03.2023

1. **Ауторство**. Дозвољавате 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**. Дозвољавате 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**. Дозвољавате 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**. Дозвољаватеумножавање, 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 дозвољавакомерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада**. Дозвољавате 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**. Дозвољавате 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.