

Kvaliteta računalnih programa za simulaciju akustike prostora

Alilović, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:785976>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 55

**KVALITETA RAČUNALNIH PROGRAMA ZA SIMULACIJU
AKUSTIKE PROSTORA**

Ante Alilović

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 55

**KVALITETA RAČUNALNIH PROGRAMA ZA SIMULACIJU
AKUSTIKE PROSTORA**

Ante Alilović

Zagreb, lipanj 2024.

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 55

Pristupnik: **Ante Alilović (1311029826)**
Studij: Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil: Komunikacijske i svemirske tehnologije
Mentor: prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

Zadatak: **Kvaliteta računalnih programa za simulaciju akustike prostora**

Opis zadatka:

Računalna simulacija akustike prostora ključni je alat za arhitektonski dizajn prostorija različitih namjena koje će imati optimalnu govornu razumljivost i odječnost te odličan akustički komfor. Preduvjet uspješne simulacije su kvalitetan 3D računalni model prostorije i ispravno modelirani akustički parametri svih interijerskih materijala: frekvencijski ovisni koeficijenti zvukoupornosti i koeficijenti raspršenja zvuka. Za jednu stvarnu učionicu ili predavaonicu izradite odgovarajući 3D model prostorije i simulirajte sve njezine bitne akustičke parametre u programu Odeon za simulaciju akustike prostora. Dobivene rezultate usporedite s mjerenjima provedenim u istoj prostoriji te analizirajte razloge za odstupanja koja se pojavljuju između simulacije i mjerenja. Za istu prostoriju napravite auralizaciju za različite govorne i negovorne izvore zvuka te dobiveni rezultat usporedite s odgovarajućom snimkom istih izvora zvuka u stvarnoj prostoriji.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SAŽETAK

Tema diplomskog rada obuhvaća znanstveno područje akustike prostora. Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela u kojima su obrađeni osnovni koncepti akustike prostora i akustičkih parametara. Prvi dio diplomskog rada je teorijska obrada karakteristika zvuka, širenja zvuka unutar zatvorenog prostora i ljudske percepcije zvuka. Isto tako, u prvom dijelu je obrađena i teorijska osnova akustičkih mjerenja, opreme i očekivanih vrijednosti određenih akustičkih parametara ovisno o namjeni prostora. Drugi dio rada rezerviran je za prezentiranje rezultata mjerenja i simulacije određenog prostora, specifično crkve Rođenja Blažene Djevice Marije u Zagrebu. Teorijski dio rada daje dovoljnu količinu informacija o prikazanim akustičkim parametrima te razumijevanje što oni predstavljaju. Konačno, rezultati mjerenja i simulacije se uspoređuju te se komentiraju razlike te potencijalni uzroci razlike u rezultatima.

Ključne riječi: akustika, akustika prostora, simulacija akustike, akustička mjerenja, crkvena akustika, Odeon, Arta, propagacija zvuka

SUMMARY

Diploma thesis encompasses the scientific area of spatial acoustics. The thesis is composed of a theoretical and a practical part, in which fundamental acoustical concepts and parameters are analysed. The first part of the thesis is a theoretical analysis of the characteristics of sound, sound propagation in closed spaces and human perception of sound. Furthermore, fundamental acoustical measurement theory and equipment are also analysed in the first part of the thesis, as well as expected measurement results for certain spaces. The second part of the thesis is reserved for the presentation of measurement and simulation results of the space of interest, specifically Crkva Rođenja Blažene Djevice Marije in Zagreb. The theoretical part of the thesis gives an appropriate amount of information about acoustical parameters

and what they represent. Finally, measurement and simulation results are compared and the differences between them as well as potential reasons as to why they exist are commented.

Key words: acoustics, spatial acoustics, acoustic simulation, acoustic measurement, church acoustics, Odeon, Arta, sound propagation

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Osnovne karakteristike zvuka	2
2.1. Propagacija zvuka u prostoru	5
2.1.1. Zvuk u prostorijama	8
2.2. Ljudska percepcija zvuka	10
2.2.1. Percepcija visine i glasnoće zvuka	10
2.2.2. Fenomen maskiranja, konsonance i disonance	13
2.2.3. Percepcija zvučnih refleksija	14
3. Akustička mjerenja	15
3.1. Akustički parametri prostora	15
3.1.1. Vrijeme odjeka RT_{60} , T_{30} , T_{20} i EDT	16
3.1.2. Jasnoća i definiranost – C_{80} i D_{50}	17
3.1.3. Pojačanje – G	18
3.1.4. <i>Speech Transmission Index</i> – STI	19
3.2. Mjerna oprema	20
3.2.1. Mikrofoni	21
3.2.2. Zvukomjer	24
4. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije akustike prostora	27
4.1. Rezultati simulacije	27
4.2. Rezultati mjerenja	33
4.3. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije akustike prostora	36
5. Zaključak	38
Literatura	39

POPIS OZNAKA I KRATICA

A	amplituda
λ	valna duljina
f	frekvencija
t	vrijeme
P	snaga
I	intenzitet zvučnog vala
Pa	paskal
W	watt
m	metar
m ²	metar kvadratni
m ³	metar kubni
p	tlak
v	brzina zvuka
d	udaljenost
dB	decibel
Hz	Hertz
s	sekunda

POPIS TABLICA

Tablica 2.1: Primjeri zvukova i njihove približne vrijednosti u decibelima

Tablica 3.1: Prikaz vrijednosti vremena odjeka i namijene

Tablica 3.2: Primjeri poželjnih vrijednosti jasnoće C_{80}

Tablica 3.3: Primjeri poželjnih vrijednosti pojačanja zvuka prostorije

Tablica 3.4: Kategorije i vrijednosti STI za različite primjene

Tablica 4.1: Vrijednosti STI po prijemnicima

Tablica 4.2: Simulacija – prosječne vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Tablica 4.3: Simulacija – prosječne vrijednosti T_{30} po frekvencijama

Tablica 4.4: Simulacija – prosječne vrijednosti C_{50} po frekvencijama

Tablica 4.5: Simulacija – prosječne vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Tablica 4.6: Mjerenje – prosječne vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Tablica 4.7: Mjerenje – prosječne vrijednosti T_{30} po frekvencijama

Tablica 4.8: Mjerenje – prosječne vrijednosti C_{50} po frekvencijama

Tablica 4.9: Mjerenje – prosječne vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Tablica 4.10: Simulacija – prosječne vrijednosti akustičkih parametara crkve

Tablica 4.11: Mjerenje – prosječne vrijednosti akustičkih parametara crkve

Tablica 4.12: Apsolutna pogreška simulacije i mjerenja prosječnih vrijednosti akustičkih parametara crkve

POPIS SLIKA

Slika 2.1: Vizualna reprezentacija zvučnog vala

Slika 2.2: Prikaz podijele tonova na oktave kod klavira

Slika 2.3: Sightline pristup dizajniranju dvorane

Slika 2.4: Valne fronte zvučnih valova niskih i visokih frekvencija pri nailasku na prepreku

Slika 2.5: Prikaz spekularne zone i zone raspršenja

Slika 2.6: Prikaz intenziteta zvuka kroz vrijeme

Slika 2.7: Građa ljudskog uha

Slika 2.8: Prikaz pravokutnog i sinusnog vala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Slika 2.9: Fletcher-Munson krivulje ili krivulje jednake glasnoće

Slika 3.1: Neusmjereni zvučni izvor

Slika 3.2: Oblikovani frekvencijski odziv mikrofona Shure SM57

Slika 3.3: Ravni frekvencijski odziv mikrofona Behringer ECM8000

Slika 3.4: Polarni dijagrami mikrofona

Slika 3.5: Vrste vremenskog vrednovanja signala

Slike 3.6: Vrste frekvencijskog vrednovanja signala

Slika 4.1: *Mesh* prikaz mjerene crkve Rođenja BDM

Slika 4.2: Prikaz trodimenzionalnog modela s ulaza

Slika 4.3: Prikaz trodimenzionalnog modela s jednog od stupova

Slika 4.4: Prikaz trodimenzionalnog modela iz kuta

Slika 4.5: Prikaz trodimenzionalnog modela sa stropa

Slika 4.6: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Slika 4.7: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti T_{30} po frekvencijama

Slika 4.8: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti C_{50} po frekvencijama

Slika 4.9: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Slika 4.10: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Slika 4.11: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti T_{30} po frekvencijama

Slika 4.12: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti C_{50} po frekvencijama

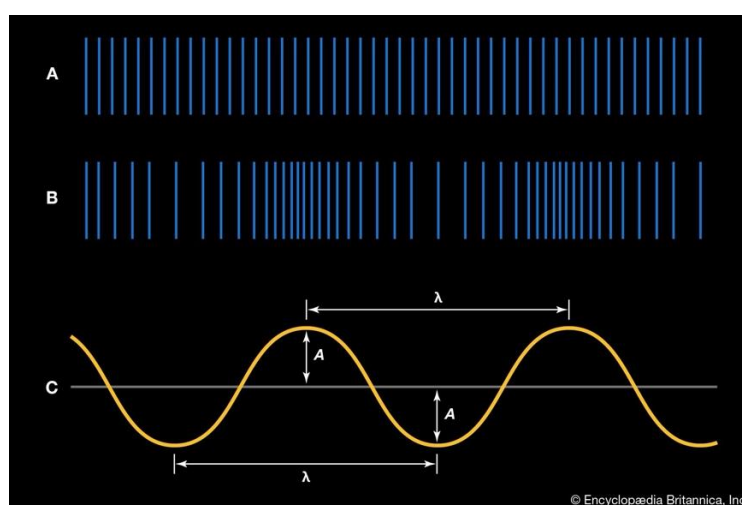
Slika 4.13: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti C_{80} po frekvencijama

1.Uvod

Područje akustike je dobar dio svog postojanja provelo u stanju potpuno iskustvene struke. Odnosno, objekti bi se projektirali i gradili u suradnji s tadašnjim akustičarima koji nisu mogli s potpunom sigurnošću znati što očekivati nakon dovršetka izrade. Marshall Long u svojoj knjizi *Architectural Acoustics*, tvrdi da bi se nerijetko događalo da bi novi glazbeni pravci nastajali kao posljedica tadašnjih građevina koje su se gradile kao i njihovih akustičkih svojstava. Gregorijansko pjevanje je tako nastalo zbog akustičkih svojstava gotičkih crkvi, a barokna glazba je pisana kako bi akomodirala tadašnje moderne crkve. Iako znanstveno područje akustike seže do drevne Grčke i Pitagorinog istraživanja zvukova pomoću vibrirajućih žica i Aristotelove pretpostavke da zvuk propagira kroz čestice zraka, pomaci u razvoju suvremene akustike kao znanosti su se dogodili u 20. stoljeću zahvaljujući fizičaru W. Sabine. Kao predavač na Harvardu, Sabine je imao zadatak smanjenja reverberacije u novootvorenom „Fogg Art Museum“ gdje je otkrio da je umnožak vremena reverberacije i potpune apsorpcije prostora proporcionalan volumenu prostorije. Taj odnos naziva se Sabinov zakon i značajno je pridonio razvoju znanosti akustike prostora jer se unaprijed moglo znati što se od određenog prostora može očekivati. U današnje vrijeme su popularni programi za simulaciju akustike prostora, odnosno mjerenju parametara uz pomoć trodimenzionalnih modela prostora. Simuliranje akustike otvara vrata raznim mogućnostima rješavanja problema akustike prostora. Arhitekti i akustičari mogu surađivati prilikom prvih planova projekata gdje se estetski i akustički dizajn mogu razvijati paralelno i biti usklađeni. Ovakav pristup je najbolji s obzirom da kasnije ne bi bile potrebne veće i neočekivane akustičke intervencije. Čest je slučaj da se akustika ostavlja za trenutak kada je već kasno. Programi za simulaciju su ipak korisni i u tom slučaju jer omogućuju mjerenja stvarnog prostora u trenutnom stanju i mjerenja prostora u stanju nakon akustičkog tretiranja. Cilj ovog diplomskog rada je ocijeniti kvalitetu programa za simulaciju akustike na temelju modela tako što će se usporediti sa stvarnim mjerenjima napravljenim u prostoru.

2. Osnovne karakteristike zvuka

Zvuk se može opisati kao vibracija unutar elastičnog medija poput zraka, vode, materijala poput betona, drveta i ostalih građevinskih materijala. Ako zamislimo česticu zraka u stacionarnom stanju gdje se na nju ne primjenjuje nikakva zvučna energija, tada čestica ne vibrira. Primjenom zvučne energije (promjene tlaka) na česticu zraka uzrokuje vibriranje, odnosno pomak čestice u međusobno suprotnim smjerovima. Put koji čestica prelazi putujući u oba smjera možemo nazvati jednim ciklusom [1]. Točku maksimalnog odstupanja čestice od stacionarne točke nazivamo amplitudom. Put koji zvučni val prijeđe unutar jednog ciklusa vibracije je valna duljina vala. Vrijeme potrebno da čestica napravi jedan ciklus nazivamo periodom, a broj ciklusa u sekundi nazivamo frekvencijom. Čestica se sudara sa susjednim česticama i prenosi energiju dalje duž materijala. Na slici 2.1 možemo vidjeti tri različita prikaza zvučnog vala. Pod prikazom A vidimo zrak (medij kojim val putuje) u stanju gdje nema putujućeg zvučnog vala, dok kod prikaza B imamo kompresije i opuštanja zraka uzrokovane zvučnim valom. Prikaz C predstavlja transverzalnu reprezentaciju zvučnog vala s amplitudom A i valnom duljinom λ . Valja napomenuti da je zvučni val longitudinalni val gdje se vibracije u mediju događaju u smjeru propagacije vala (prikazi A i B).



Slika 2.1: Vizualna reprezentacija zvučnog vala

Izvor: <https://www.britannica.com/science/sound-physics>

Većina zvukova s kojima se susrećemo u stvarnom svijetu su kompleksni zvukovi kao što su govor, glazba i razni oblici buke poput prometa. Važno je razlikovati značenje riječi buka (engl. *noise*) kada se govori o zvučnim valovima, jer se može raditi u buci koja označava neugodan ili iritantan zvuk koji je potencijalno opasan za ljudski sluh i šum koji se koristi za opisivanje nepoželjnog signala ili kvalitete željenog signala u odnosu na šum prilikom određenih mjerenja. Na hrvatskom jeziku se često može čuti izraz da drveće *šumi* što se često uzima kao ugodan zvuk. Bitno je imati na umu kako je percepcija zvuka ipak subjektivan proces gdje se ne može unaprijed znati kakav zvuk smeta kojoj osobi. Postoji poveznica između glasnoće zvuka i njegove neugodnosti, ali ne i sadržaja zvuka i neugodnosti [2].

Zvučni val se može opisati s 3 karakteristike: amplitudom, frekvencijom i smjerom širenja. Amplitudom se može opisati fluktuacija tlaka u mediju kojim se kreće zvučni val u odnosu na stacionarno stanje u kojem se čestica nalazi bez djelovanja vanjske sile [3]. Jedan od načina na koje možemo opisati amplitude vala je pomoću decibela. U akustici, decibel se koristi kako bi se povezao intenzitet mjerenog zvuka u odnosu na minimalni intenzitet zvuka koji čovjek može percipirati [1] koji iznosi oko 10^{-12} W/m^2 . Intenzitet zvuka predstavlja količinu energije koja prostruji kroz plohu površine 1 m^2 postavljenu okomito na smjer širenja zvuka u jednoj sekundi. Gornja granica intenziteta zvuka iznosi 10 W/m^2 i predstavlja vrijednost koja uzrokuje bol kod prosječnog slušatelja. Kao što se može primijetiti, razlike između najniže i najviše vrijednosti intenziteta zvuka kojima čovjek može biti izložen u svakodnevnom životu iznosi oko 10^{12} W/m^2 . Kod tako velikog raspona vrijednosti, praktičnije je vrijednosti prebaciti u decibele. Tada se raspon smanjuje na vrijednosti od 0 dB do 130 dB.

Amplituda zvučnog vala opada s prijađenim putem. Ako za primjer uzmemo idealni točkasti izvor zvuka koji generira zvučni val u slobodnom prostoru bez prepreka, intenzitet ili amplituda vala opada prema jednadžbi:

$$I = \frac{P}{4\pi d^2}$$

U tablici 2.1 prikazane su neke vrijednosti amplituda zvučnog vala s kojima se čovjek redovno susreće i u kojim slučajevima se valovi takvih amplituda stvaraju.

dB	Primjer
120	Sirene hitne pomoći u blizini
100	Motor u prolazu (2 m od slušatelja)
80	Usisavač
60	Normalan razgovor
40	Klima uređaj u kući
20	Šaptanje na 2 metra

Tablica 2.1: Primjeri zvukova i njihove približne vrijednosti u decibelima

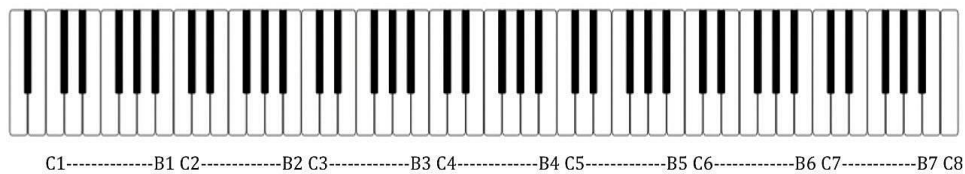
Izvor:

https://www.researchgate.net/publication/305315705_Noise_Prediction_of_a_NACA_0015_Airfoil_with_Gurney_Flap_A_study_based_on_Time-Resolved_Particle_Image_Velocimetry

Frekvencija je učestalost ponavljanja nekog periodičkog događaja [1]. Frekvencija zvuka određena je ukupnim brojem ponavljanja jednog potpunog ciklusa vibriranja molekule medija kojim se val širi unutar jedne sekunde. Ako molekula medija napravi 50 potpunih ciklusa vibriranja oko svoje stacionarne točke, kažemo da je frekvencija vala 50 Hertza (50 Hz). Hertz, nazvana po fizičaru Heinrichu Rudolfu Hertz, je jedinica kojom se označava frekvencija ili broj ciklusa po sekundi [4]. Visina tona nekog zvuka je određena frekvencijom. Prema tome možemo reći da je zvuk visoke frekvencije „visoki ton“ kao što je primjerice pištaljka, a zvuk niske frekvencije je „niski ton“ poput žica na bas gitari. S obzirom da većina zvukova koje čujemo sadrže energiju u više dijelova spektra, tj. sastoje se od više komponenti ili čistih tonova, korisno je zvuk i njegov sadržaj podijeliti na raspone. Česta podjela zvuka s obzirom na frekvenciju je podjela na oktave. Oktava označava omjer frekvencija 2:1 [1]. Primjerice: oktava zvučnog vala frekvencije 220 Hz je 440 Hz. Na slici 2.2 vidimo raspodjelu tonova klavira na 7 oktava. Frekvencijom zvučnog vala se može opisati i valna duljina vala s obzirom da su te dvije

karakteristike povezane brzinom zvuka. Valna duljina se iz brzine zvuka i frekvencije dobiva formulom:

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



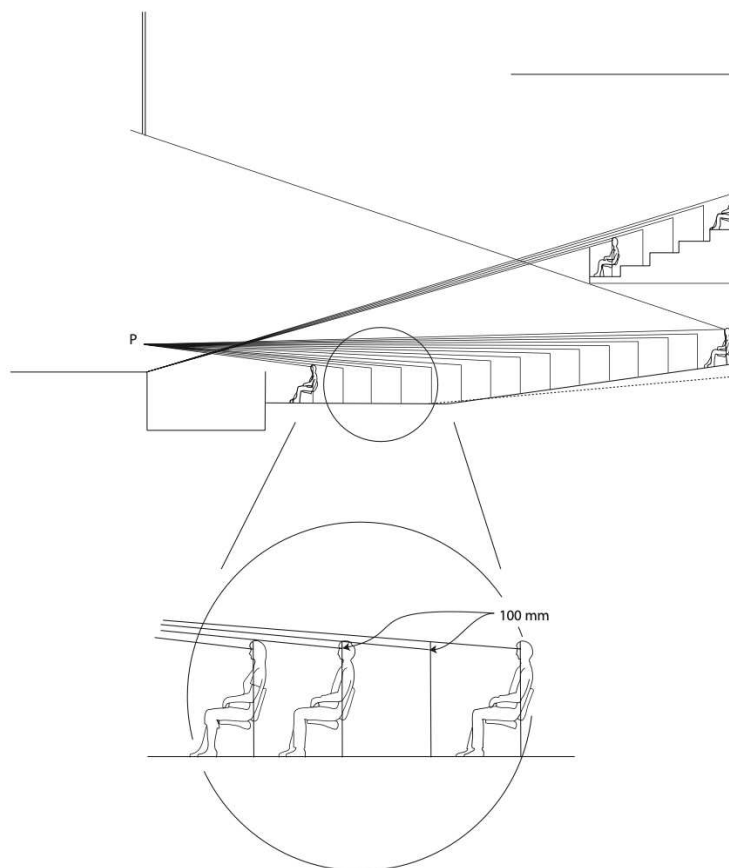
Slika 2.2: Prikaz podjele tonova na oktave kod klavira

Izvor: <https://enthu.com/blog/piano/how-many-octaves-on-a-piano/>

2.1. Propagacija zvuka u prostoru

Kao što je ranije navedeno, razina zvučne energije opada s prijeđenim putom u slobodnom prostoru. Način na koji razina energije opada opisuje se zakonom obrnutog kvadrata, odnosno: energija zvučne energije opada za 6 dB za svako udvostručenje prijeđenog puta. Zakon obrnutog kvadrata vrijedi ako u prostoru nema prepreka između izvora zvuka i odredišta. Isti zakon vrijedi za zatvorene prostore, ali čest problem su prepreke unutar prostora kao i ravni, reflektivni zidovi. U slučaju prepreke, njihov učinak na prostiranje vala se može smanjiti tako da se osigura direktna, neprekinuta linija između izvora i odredišta zvučnog vala. Kazališta su primjer dizajna prostorije gdje se pokušava uspostaviti direktan, neprekidan put kojim val putuje između govornika i slušatelja. Kada se analiziraju sjedala u gledalištu, kao izvor zvuka se uzima točka između 0.6 i 0.9 metara iznad tla, dok se za balkone kao točka izvora zvuka uzima rub pozornice. U obzir se uzima činjenica da se oči kod čovjeka u prosjeku nalaze oko 10 centimetara ispod vrha glave, te se na temelju toga sjedala pokušavaju postaviti na visinu tako da postoji direktan put kojim zvučni val ide od točke odredišta, preko vrha glave osobe ispred do ušiju osobe za koju se slučaj razmatra. Iz samog opisa ovakvog dizajna možemo zaključiti da bi sjedišta dalja od izvora zvuka trebala biti na višoj poziciji od

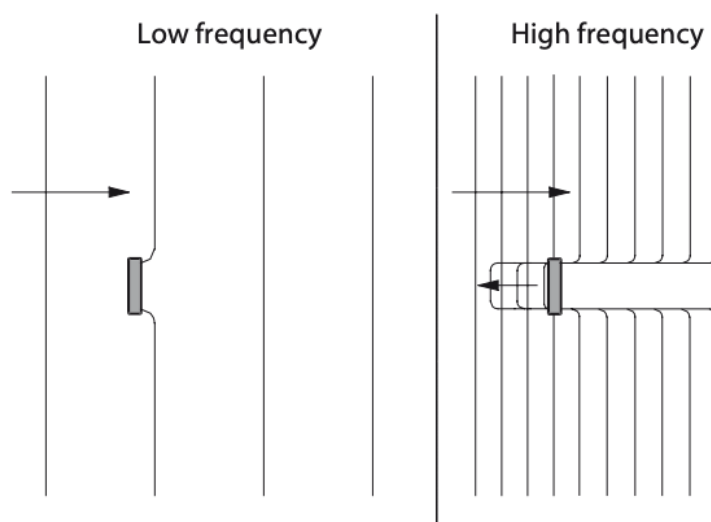
sjedala blizu izvora zvuka. Na slici 2.3 vidimo primjer takvog dizajna gdje je točka P izvor zvučnog vala. Iako ovakav pristup dizajniranju dvorane postaje kompliciraniji kada se razmatra u 3 dimenzije, i dalje daje dobre rezultate kada se primjeni u stvarnim dvoranama.



Slika 2.3: *Sightline* pristup dizajniranju dvorane [3]

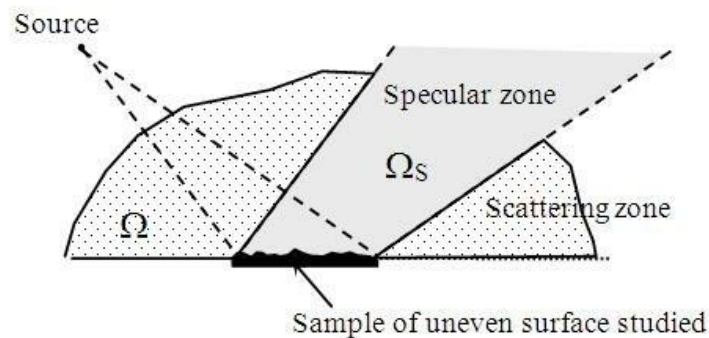
Unatoč dizajnu sjedišta tako da svi gledatelji imaju direktnu liniju s izvorom zvuka, refleksije zvučnog vala od objekte u prostoriji i od zidove prostorije su neizbježne. Nailaskom zvučnog vala na prepreku u prostoru ili zid, ovisno o materijalu prepreke i valnom duljinom vala, mogu se dogoditi četiri slučaja: potpuna refleksija vala, difrakcija vala, raspršenje vala i apsorpcija vala. Potpuna refleksija zvučnog vala se događa kada zvučni val nailazi na prepreku glatke površine koja je veća od valne duljine vala. Val se odbija od prepreku i iza prepreke se stvara „sjena“ u kojoj se zvuk čuje manje ili gotovo nikako. Intenzitet zvuka koji se čuje iza prepreke ovisi o apsorpciji materijala prepreke, dimenzijama prepreke i frekvencijskog sadržaja zvuka. Ako se zvuk

sastoji od više frekvencija, tonovi valne duljine manje od duljine prepreke se neće čuti iza prepreke dok se kod tonova s većom valnom duljinom događa difrakcija. Difrakcija se smatra fenomenom niskih frekvencija, odnosno kada je valna duljina zvuka veća ili usporediva s duljinom prepreke na koju nailazi. Nailaskom na prepreku, val kojem je valna duljina puno veća od prepreke će se ponašati kao da prepreke nije ni bilo odnosno možemo reći da se zvuk „savija“ oko prepreke. Primjer ovakvog ponašanja zvuka prikazano je na slici 2.4. Kada je valna duljina vala usporediva s veličinom prepreke, zvuk se može čuti iza zida, ali smanjenog intenziteta. Primjer korištenja difrakcije, kao i refleksije, su zaštita od buke za stanovnike blizu autocesta. Zvuk auta se širi prema barijeri gdje se dio reflektira, a dio ogiba od nju što rezultira difrakcijom, odnosno zvukom manjeg intenziteta iza barijere. Difrakcija je također slučaj gdje slušatelj može čuti zvuk koji dolazi kroz otvorena vrata iz druge prostorije. Zvuk valne duljine veće od duljine otvora na koji nailazi će proći kroz otvor te će se otvor ponašati kao izvorišna točka zvuka manjeg intenziteta. Kada je valna duljina zvuka približno jednaka duljini otvora, dio zvuka će se širiti kao da je otvor točka izvora zvuka, ali nešto slabijeg intenziteta, a dio će se ogibati od strane vrata te će se s lijeve i desne strane otvora intenzitet zvuka biti znatno slabiji.



Slika 2.4: Valne fronte zvučnih valova niskih i visokih frekvencija pri nailasku na prepreku [3]

Treći slučaj su raspršenje i difuzija zvuka. Nailaskom vala na prepreku grube površine, zvučni val se će se raspršiti u više različitih smjerova. Raspršenje određenih objekata prilikom simulacija je teško predvidjeti pa se raspršenje modelira koeficijentom raspršenja. Koeficijent raspršenja se može definirati kao omjer energije reflektirane izvan spekularne zone i ukupne raspršene energije u cijelom prostoru, kao što je prikazano na slici 2.5 [5]. Spekularna zona predstavlja smjer u kojem bi se val reflektirao od savršeno glatku ili reflektivnu površinu. Razlika između raspršenja i difuzije zvuka je ta što se kod difuzije zvuka pokušava postići jednaka distribucija različitih frekvencija prilikom refleksije od površinu [6]. Apsorpcija je slučaj gdje se energija vala gubi prolaskom kroz medij. Val se prigušuje zbog disipacije energije prilikom trenja koje se javlja zbog vibracija čestica zraka. Apsorpcija zvuka ovisi o frekvenciji, odnosno više frekvencije se brže apsorbiraju prilikom propagacije od nižih frekvencija. Energija se vala dakle apsorbira i u zraku, ali i prilikom nailaska na prepreku. Apsorpcijski materijali mogu biti tkanine, zavjese, tepisi, spužve, drvo i slični materijali. Sama publika unutar nekog auditorija ima apsorpcijski učinak gdje na srednjim frekvencijama apsorbira i do devedeset posto energije zvučnog vala [3].

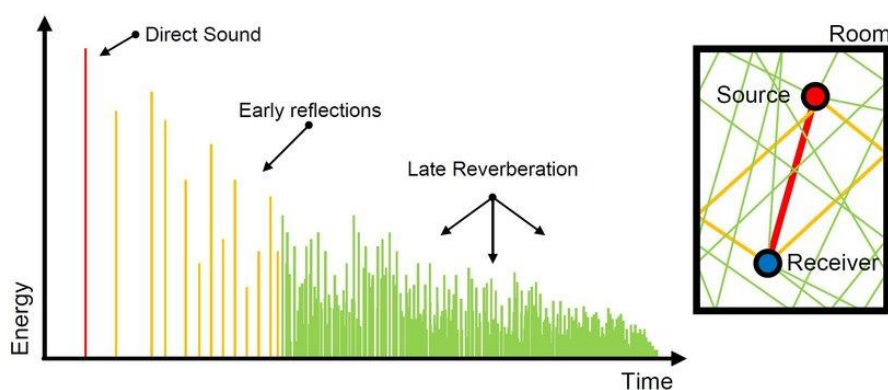


Slika 2.5: Prikaz spekularne zone i zone raspršenja [5]

2.1.1. Zvuk u prostorijama

Slušatelj u prostoriji poput kazališta ili auditorija ne čuje samo direktan zvuk koji dolazi od izvora. Osim direktnog zvuka, slušatelj čuje rane i kasne refleksije zvuka, odbijene od zidove i prepreke unutar prostora [3]. Rane refleksije dolaze do slušatelja unutar otprilike 100 milisekunde kasnije od

direktnog zvuka i svaka refleksija se može pojedinačno raspoznati. Skup kasnijih refleksija koje se ne mogu raspoznati kao pojedinačni zvukovi može se zvati i reverberacijom. Vrijeme reverberacije opisuje vrijeme opadanja intenziteta kasnijih refleksija. Način na koji možemo mjeriti kako ova tri različita zvuka utječu na percepciju slušatelja je impulsni odziv prostoriije. Impulsni odziv se može dobiti mjerenjem intenziteta kratkog i intenzivnog zvuka na određenom mjestu u prostoriiji, primjerice pucanja balona ili puštanjem bijelog šuma na razglas prostoriije. Impulsni odziv će se iscrtati kao intenzitet kroz vrijeme, gdje će se vremenski najprije prikazati direktan zvuk, zatim rane refleksije te konačno kasne refleksije ili reverberacija.



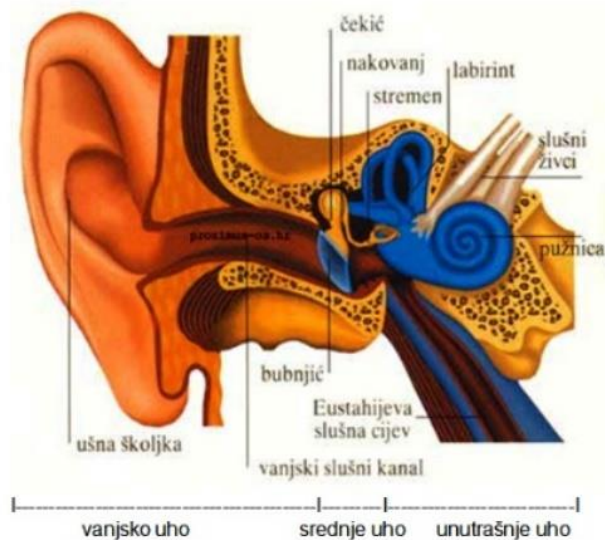
Slika 2.6: Prikaz intenziteta zvuka kroz vrijeme

Izvor: [https://www.researchgate.net/publication/273321677 Integrating Real-Time Room Acoustics Simulation into a CAD Modeling Software to Enhance the Architectural Design Process](https://www.researchgate.net/publication/273321677_Integrating_Real-Time_Room_Acoustics_Simulation_into_a_CAD_Modeling_Software_to_Enhance_the_Architectural_Design_Process)

Ovisno o namijeni prostoriije, potrebno je dobro analizirati karakteristike prostoriije i vrijeme reverberacije. Ako je vrijeme reverberacije predugo, ranije reproducirani zvukovi mogu biti prekriti ili zasjeniti kasnije, ali tiše reproducirane zvukove. U drugu ruku, prekratko vrijeme reverberacije u prostoriijama za glazbu može slušanje učiniti nepotpunim, kao u gluhim komorama. Vrijeme reverberacije za simfonijsku glazbu se uzima oko 2 sekunde, a za govor oko 1 sekunde [3].

2.2. Ljudska percepcija zvuka

Ljudsko uho je organ koji služi za recepciju zvučnih valova. Ulaskom u ušni kanal, zvučni val nailazi na bubnjić koji vibrira te se ta vibracija šalje u unutarnje uho preko tri sitne kosti: čekić, nakovanj i stremen [5]. Bubnjić i kosti čine srednje uho, dok uška i ušni kanal čine vanjski dio uha. Titranje izazvano zvučnim valom se nakon stremena prenosi do pužnice u unutarnjem uhu. Pužnica sadrži tekućinu koja se pomiče u skladu sa zvučnim valom. Nastali valovi tekućine se prenosi do bazilarne membrane na kojoj su osjetne stanice koje na svojim vrhovima imaju dlačice. Titranjem bazilarne membrane, dlačice osjetnih stanica se savijaju te se stvara živčani impuls koji se šalje do mozga [6]. Uho mlade i zdrave osobe može registrirati zvučne valove u rasponu od približno 20 Hz do 20 kHz [1]. Ovaj raspon se smanjuje s godinama života i potencijalnim oštećenjima zvuka stečenim vremenom. Osim sluha, uho ima i funkciju ravnoteže. Polukružni kanalići u unutarnjem dijelu uha su ispunjeni tekućinom i receptorima koji, kada se tekućina u kanalićima pomiče, šalju impulse mozgu gdje se percipiraju kao informacija o balansu [7].



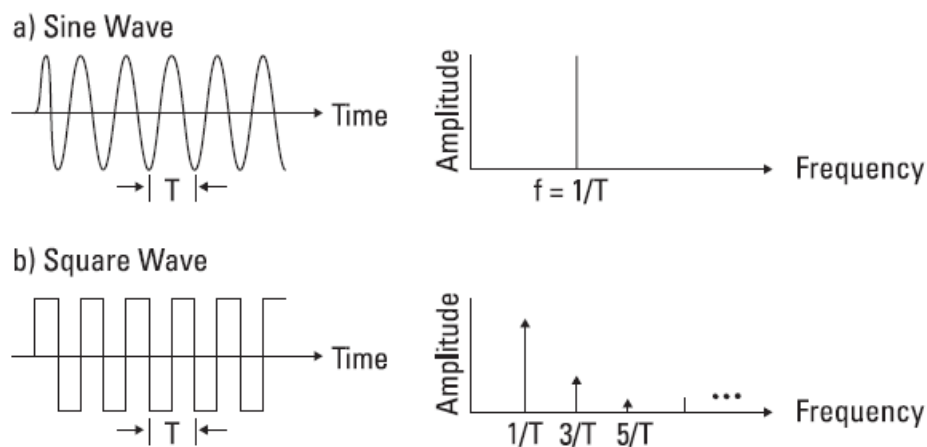
Slika 2.7: Građa ljudskog uha

Izvor: <http://ordinacija-zeljkaroje.com/service/poremecaji-sluha-i-ravnoteze/>

2.2.1. Percepcija visine i glasnoće zvuka

Ljudsko uho sposobno je razlikovati tri karakteristike zvuka: visinu, glasnoću i takozvanu boju zvuka [8]. Boja nekog zvuka je vezana s

prepoznavanjem visine tona s obzirom da ovisi o njegovom spektralnom sadržaju, odnosno svim frekvencijama od kojih je neki zvuk sačinjen. Primjerice, zvuk saksofona i klavira prilikom sviranja istog tona od 440 Hz neće biti isti i može se lako odrediti koji zvuk dolazi od kojeg instrumenta iako sviraju isti ton. Razlog tome je što nemaju iste frekvencijske komponente iako imaju istu temeljnu frekvenciju od 440 Hz. Isti slučaj se može promatrati i na elektronički generiranim valovima pomoći oscilatora. Zvuk pravokutnog i sinusnog signala se lako može razlikovati zbog svog frekvencijskog sadržaja. Na slici 2.7 vidimo kako pravokutni signal zauzima puno veći dio spektra za razliku od sinusnog vala koji u idealnom slučaju zauzima samo jednu, temeljnu frekvenciju. Razlika u boji zvuka koju će ta dva signala proizvesti se vidi u njihovim spektrima.



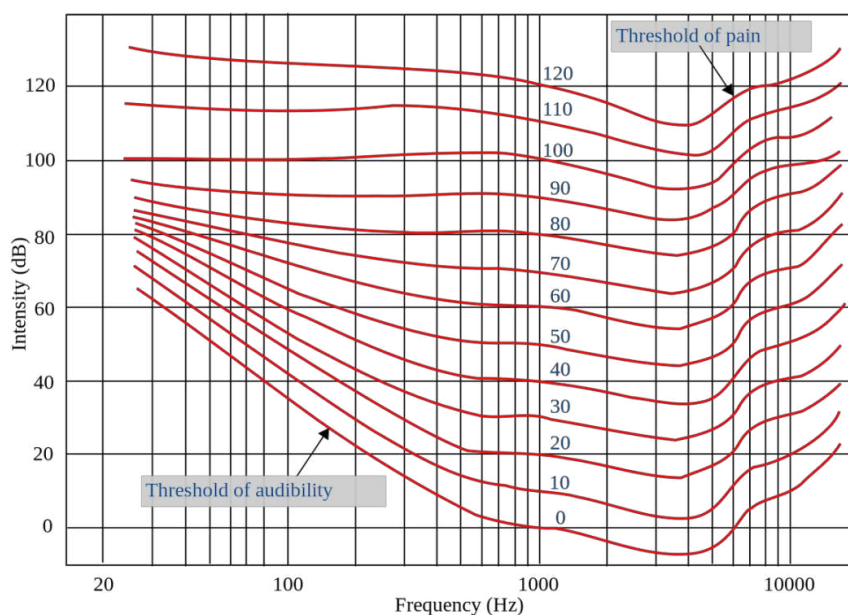
Slika 2.8: Prikaz pravokutnog i sinusnog vala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Izvor: <https://zhuanlan.zhihu.com/p/299576718>

Način na koji čovjek percipira visinu tonu prvobitno ovisi samom izvoru, odnosno o frekvenciji zvučnog vala kojeg neki izvor generira. Što je frekvencija zvuka veća, to je visina percipiranog tona viša i obratno. Raspoznavanje frekvencija omogućeno je bazilarnom membranom koja sadrži različite receptore za različite frekvencije. Za potrebe računalnog modeliranja, bazilarna membrana se gleda kao cjelina od 24 filtarska niza, svaki duljine oko 1.3 mm i svako područje sadrži otprilike 1300 neurona [9]. Svaki niz unutar membrane služi kao pojasno-propusni filtra koji ulazni zvuk dijeli na

pojedinačne frekvencijske komponente od kojih se zvuk sastoji. Kao i elektronički filtri, svaki filter ima svoje područje filtriranja koje se preklapa s područjem filtriranja susjednih filtera. Ako dva susjedna filtra primaju dvije međusobno bliske frekvencije i ako se njihovo područje filtriranja znatno preklapa, tada to područje nazivamo kritičnim pojasom [9]. Kritični pojasevi su bitna stavka prilikom razmatranja konsonance i disonance tonova kao i za razumijevanje fenomena frekvencijskog maskiranja koje se događa u ljudskom uhu.

Magnitudu zvučnog vala koju čovjek percipira nazivamo glasnoćom zvuka [9]. Ranije je spomenuto kako se za označavanja glasnoće zvuka koristi logaritamska skala odnosno mjerna jedinica decibel kojom se može dovoljno detaljno opisati glasnoća nekog zvuka. Neki od ranijih načina za označavanje zvuka postojali su u glazbenoj notaciji gdje su se koristili nazivi *piano-pianissimo, pianissimo, piano, mezzo piano, mezzo forta, forte, fortissimo i forte-fortissimo* kako bi se opisala potrebna glasnoća instrumenta od najtišeg do najglasnijeg. Ljudska percepcija glasnoće zvuka ipak nije tako jednostavna jer osim što ovisi o količini impulsa koji dolaze do mozga u određenom vremenu, također ovisi o psihološkom i fiziološkom stanju slušatelja. Čak i ako pojedinac čuje isti zvuk pri istom intenzitetu u kratkom vremenu, ne mora značiti da će ih percipirati kao zvukove jednake glasnoće. Uho je prilagođeno na način gdje neće sve frekvencije čuti jednako već će neke čuti bolje pri jednakom intenzitetu u odnosu na drugo. Za generalnu populaciju vrijedi da je uho najosjetljivije za frekvencije oko 4000 Hz [10]. Osjetljivost ljudskog uha na različite frekvencije prikazuje se krivuljama jednake glasnoće, gdje su iscrtane linije koje prikazuju potreban intenzitet zvuka na različitim frekvencijama kako bi ih prosječan slušatelj percipirao kao zvukove jednake glasnoće.



Slika 2.9: Fletcher-Munson krivulje ili krivulje jednake glasnoće

Izvor: <https://producelikeapro.com/blog/fletcher-munson-curve/>

2.2.2. Fenomen maskiranja, konsonance i disonance

Fenomen konsonance i disonance, u svojoj knjizi *On the Sensation of Tone*, Hermann von Helmholtz objašnjava kao posljedice određenih udaljenosti dvaju tonova. Pretpostavlja da udaljenost između 30 i 40 Hz između dva tona kod slušatelja uzrokuje *grubost* prilikom slušanja. Daljim istraživanjem utvrđeno je da se maksimalna disonanca pojavljuje prilikom 25% kritičnog pojasa. Maksimalna disonanca se percipira kao niz udaraca, dok se nešto blaža disonanca percipira kao *grub* zvuk [11].

Valja spomenuti i fenomen frekvencijskog maskiranja zvuka s obzirom da on ovisi i o glasnoći i o frekvencijskog udaljenosti između dva zvuka. Naime, osjetljivost ljudskog uha na određeni zvuk prikazan na Fletcher-Munson grafu vrijedi u slučaju kada se sluša samo jedan zvuk. Percepcija glasnoće zvuka jedne frekvencije također ovisi o prisustvovanju drugog zvuka koji je frekvencijski blizu prvom zvuku. Pretpostavimo da prag čujnosti (najmanji potreban intenzitet zvuka koji čovjek percipira) izmjeren na 10 dB za ton A. Ako isti taj zvuk mjerimo opet, ali s prisutnim tonom B, može se dogoditi da prag

čujnosti skoči na, primjerice, 26 dB. Fenomen gdje prisustvo jednog zvuka podiže prag čujnosti drugog zvuka nazivamo frekvencijsko maskiranje [12]. Iako se maskiranje može smatrati manom ljudskog sluha, ono predstavlja prednost kod dizajniranja digitalnih formata zvuka jer se upravo zbog maskiranja mogu izbaciti redundantni podaci iz zvučnog zapisa. Ako je jedna frekvencija u zvučnom zapisu znatno glasnija od njenih susjednih frekvencija, onda će te frekvencije biti maskirane i mogu se zanemariti prilikom kodiranja. Ovakav način kodiranja signala gdje se iskorištavaju mane ljudskog sluha naziva se percepcijsko kodiranje i njime se može postići značajno smanjivanje potrebne memorije sustava za zapis zvučnih signala. Primjer takvog kodiranja je i MP3 [13].

2.2.3. Percepcija zvučnih refleksija

U velikim koncertnim dvoranama, slušatelj prima oko 8000 zvučnih refleksija unutar jedne sekunde [3]. Svaka refleksija do slušatelj dolazi u različitom vremenu, različitog intenziteta i iz različitog smjera. Unatoč velikoj količini zvučnih valova koje slušatelj u kratkom vremenu primi, uho je dovoljno prilagođeno da može raspoznati iz kojeg smjera dolazi direktni zvuk bezobzira na to je li slabiji od sume intenziteta svih refleksija. Razlozi tome su evolucijski kao mehanizam upozorenja od potencijalne opasnosti. S obzirom na visinu frekvencije koja se lokalizira, koriste se dva različita mehanizma. Za lokalizaciju niskih frekvencija se koristi različito vrijeme dolaska zvuka do uha te njegova percepcija, dok se za visoke frekvencije koristi razlika u intenzitetu vala.

Akustička svojstva prostorije se mogu postaviti na način gdje će refleksije zvuka pridonositi razumljivosti govora ili glazbe. Naime, s obzirom da direktan zvučni val opada s povećanjem udaljenosti, a ljudsko uho može energiju dovoljno ranih refleksija zvuka zbrojiti s direktnim valom, poželjno je dizajnirati prostorije u kojima dolazi do većeg broja ranih refleksija. Poželjno vrijeme ranih refleksije za bolju razumljivost govora iznosi oko 50 ms, dok za glazbu iznosi oko 80 ms. Kasnije refleksije imaju štetan utjecaj na razumljivost, ali bitne su kako bi slušatelj imao osjećaj prostora u kojem se nalazi.

3. Akustička mjerenja

Temelje akustičkih mjerenja postavio je Wallace Clement Sabine krajem 19. stoljeća uvođenjem parametra vremena reverberacije prostora T_{60} . Vrijeme reverberacije definirao je kao vrijeme potrebno da zvučna energija opadne milijun puta ili 60 dB od trenutka kada je zvuk proizveden u zatvorenom prostoru [14]. Osim vremena reverberacije postoji još niz drugih akustičkih parametara prostora koja se određuju akustičkim mjerenjima. Pod akustička mjerenja ulaze sva mjerenja koja se obavljaju u svrhu određivanja akustičkih parametara prostora [15].

3.1. Akustički parametri prostora

Prema normi ISO 3382 akustički parametri, kao i njihovi simboli i mjerne jedinice, koji se određuju mjerenjima su sljedeći:

- Vrijeme odjeka – RT_{60} , T_{30} , T_{20} [s]
- Vrijeme ranog opadanja – EDT [s]
- Centralno vrijeme – T_s [s]
- Jasnoća – C_{80} , C_{50} [dB]
- Definiranost – D_{50} [%]
- Pojaćanje – G [dB]
- Udio boćne energije – LF, LFC [%]
- Interauralni koeficijent krićne korelacije IACC

Osim navedenih parametara, za procjenu akustićkih osobina prostorije ćesto se uzimaju u obzir i parametri razumljivosti govora: STI (*Speech Transmission Indeks*). Na razumljivost govora utjeću svi vanjski faktori prijenosnog medija zvućnog vala poput prevelikog vremena reverberacije, pozadinske buke, atenuacije zvuka zbog udaljenosti izmeću izvora i odredišta zvuka. U prostorima u kojima se koriste razglasni sustavi, na razumljivost govora mogu utjecati elektroakustićki faktori sustava poput frekvencijskog odziva korištenih zvućnika ili pojaćala

3.1.1. Vrijeme odjeka RT_{60} , T_{30} , T_{20} i EDT

Jedan od najvažniji mjerenih parametara akustike prostora je vrijeme odjeka ili *reverberation time*. Odjekom uzimamo određeni broj refleksije koje se u prostoru odbijaju od zidove i ostale prepreke na koje zvučni val nailazi. Metrika korištena za dobivanje vremena odjeka je RT_{60} koji se definira kao vrijeme potrebno da razina zvučnog signala opadne za 60 dB [14]. 60 dB se uzima kao prosječni dinamički raspon prosječnog koncerta orkestralne glazbe, odnosno, najveća razina zvuka takvog koncerta iznosi otprilike 100 dB, dok 40 dB predstavlja prihvatljivu razinu pozadinske buke prilikom slušanja glazbe [16]. Zadovoljavajuće vrijeme odjeka ovisi o namjeni prostorije u kojoj se ono mjeri. U nastavku su navedene približne željene vrijednosti RT_{60} ovisno o namijeni prostorije.

RT_{60} [s]	Pogodno za:
[0.4, 0.7]	Učionice
[0.5, 1.1]	Ured
[1, 2]	Koncertne dvorane
[2, 10]	Crkve

Tablica 3.1: prikaz vrijednosti vremena odjeka i namijene

Izvor: <https://svantek.com/academy/rt60-reverberation-time/>

Vrijeme odjeka RT_{60} se mjeri pomoću posebnih mjerača glasnoće s opcijama mjerenje akustičkih parametara osim glasnoće. Kao izvor zvuka, idealno je koristiti kratki, ali glasni zvuk kako bi se što više približili idealnom impulsu. Dobar primjer su pljesak rukama ili pucanje napuhanog balona. RT_{60} se ne mjeri direktno već se mjeri vrijeme potrebno da razina zvuka padne za 20 dB ili 30 dB, odnosno T_{20} ili T_{30} . Nakon dobivenih rezultata mjerenja, vrijednost T_{20} se množi s 3, odnosno T_{30} se množi s 2 kako bi se dobila približna vrijednost RT_{60} . Odabir između 20 dB i 30 dB metode ovisi o prostoriji koja se mjeri. Metoda mjerenja T_{20} koristi se ako je maksimalna glasnoća proizvedenog zvuka u prostoriji veća za barem 35 dB od razine pozadinske buke, dok se T_{30} koristi kada je maksimalna glasnoća proizvedenog zvuka u prostoriji veća za barem 45 dB od pozadinske buke prostorije. Bez obzira na

odabir parametra, mjerenja započinju nakon prvih opalih 5 dB razine glasnoće zvuka [14].

Vrijeme ranog opadanja ili EDT, slično vremenu odjeka, opisuje koliko brzo rana energija zvuka opada unutar nekog prostora. Što je EDT kraći, to energija brže opada. Za razliku od vremena odjeka T_{20} i T_{30} , EDT se označava kao vrijeme potrebno da energija zvuka opadne za 10 dB od inicijalne vrijednosti [17]. Kao što je prethodno navedeno, pravilna vrijednost EDT-a ovisi o namijeni prostorije za koju se on mjeri.

3.1.2. Jasnoća i definiranost – C_{80} i D_{50}

Jasnoća i definiranost koriste se kako bi se što objektivnije mogle specificirati karakteristike zvuka u prostoru koje se mogu smatrati subjektivnima. Jasnoća C_{80} određuje jasnoću glazbenih performansi unutar nekog prostora, dok definiranost D_{50} opisuje razumljivost ljudskog govora unutar prostora. Obje metrike se baziraju na usporedbi rane zvučne energije i kasne ili potpune zvučne energije na određenoj točki prijema. Jasnoća C_{80} definira se kao razlika rane zvučne energije unutar 80 ms od inicijalnog zvuka i zvučne energije nakon 80 ms. Jasnoća zvuka se uzima za 3 različite frekvencije te se uzima prosječna vrijednost kao vrijednost parametra C_{80} . Te frekvencije iznose 500, 1000 i 2000 Hz [17].

Tip glazbe	Poželjna vrijednost C_{80} [dB]
Simfonijska glazba	[-3, 0]
Komorna glazba	[-2, 2]
Opera	[1, 3]

Tablica 3.2: primjeri poželjnih vrijednosti jasnoće C_{80}

Izvor: <https://ateliercrescendo.ac/sound-reverberation-part-2-specialist-indices/>

Definicija D_{50} definira se kao razlika rane zvučne energije unutar 50 ms od inicijalnog zvuka i potpunog trajanja zvuka. Definicija nema mjernu jedinicu i poželjne vrijednosti su između 0.3 i 0.7 [17].

Parametri jasnoće i definicije nam pokazuju da je bitan balans između rane zvučne energije i ostatka zvučne energije. Što je veća vrijednost rane

energije, veća je jasnoća zvuka prilikom slušanja glazbenih performansi, odnosno veća je razumljivost govora. Prema tablici 3.2 vidimo da je vrijednost parametra jasnoće veća kod opernih izvedbi nego kod simfonijske ili komorne glazbe. Ovakve vrijednosti imaju smisla jer je kod operne glazbe, osim što je bitan zvuk glazbe, bitno i razumjeti tekst koji pjevači pjevaju. Dakle, kod operne glazbe je poželjno imati više rano reflektirane zvučne energije u odnosu na simfonijsku i komornu glazbu. Suprotno tome, kod simfonijske i komorne glazbe je poželjnije ugodno spajanje različitih zvuka pa nam nije potrebno toliko veća energija ranih refleksija.

3.1.3. Pojačanje – G

Pojačanje zvuka prostorije označava koliko će glasnije ili tiše zvuk s određene točke biti percipiran na strani slušatelja. Pojačanje zvuka prostorije mjeri se pomoću neusmjerenog izvora zvuka i usporedbom akustičke energije u točki na udaljenosti n unutar mjerenog prostora i akustičke energije na istoj udaljenosti n u prostoriji bez refleksivnih površina. Dobiveno pojačanje se izražava u decibelima i varira s obzirom na namjenu prostorije. Tablica 3.3. prikazuje poželjne vrijednosti pojačanja G s obzirom na tip glazbe, procijenjeno za 500 Hz i 1000 Hz.

Tip glazbe	Poželjne vrijednosti G [dB]
Simfonijska glazba	[1.5, 5.5]
Komorna glazba	[9, 13]
Opera	[-1, 2]

Tablica 3.3: Primjeri poželjnih vrijednosti pojačanja zvuka prostorije

Izvor: <https://ateliercrescendo.ac/sound-reverberation-part-2-specialist-indices/>

S obzirom da se vrijednosti uglavnom pozitivne, vidimo da je poželjno da prostor pojačava zvuk kako bi slušatelji u udaljenijim sjedalima čuli približno jednako kao slušatelji u bližim sjedalima. S obzirom na tip glazbe, ne želimo imati ista pojačanja za sve tipove. S obzirom da u komornim izvedbama imamo tiše izvedbe u odnosu na simfonijske izvedbe, za prostore u kojima će se

izvoditi komorna glazba želimo imati veće pojačanja u odnosu na prostor u kojem se izvodi simfonijske glazba [17].

3.1.4. *Speech Transmission Index – STI*

Za prostore namijenjene govoru poput učionica, predavaonica, kazališnih pozornica ili crkve, osim prethodno navedenih parametara, bitno je da slušatelj dobro razumije informaciju koju neki govornik prenosi u prostoru. Iz tog razloga se još često mjeri i STI koji opisuje razumljivost govora u mjerenom prostoru. STI je kompleksan za mjerenje jer ovisi o glasnoći govora, frekvencijskom sadržaju poruke (riječi), pozadinskoj buci u prostoru, kvaliteti elektroakustičke opreme koja se koristi (ako je ima) i refleksijama unutar prostora. Unatoč kompleksnosti mjerenja, STI predstavlja način mjerenja koji daje relevantne i ponovljive rezultate prilikom mjerenja [18]. Tablica 3.4. prikazuje vrijednosti STI-a u rasponu od 0 do 1 gdje je 0 najgora, a 1 najbolje ocjena STI-a [19]. IEC 60268-16 ed4 2011 standard definira kategorije u koje se rasponi STI vrijednosti mogu postavljati s obzirom prema primjeni i kvaliteti razumljivosti govora. Oznake su od A+ do U, od najbolje do najgore kategorije [20].

Kategorija	Raspon STI-a	Primjena
A+	>0.76	Studio
A	0.74 – 0.76	Kazalište
B	0.70 – 0.74	Auditoriji
C	0.66 – 0.70	Telekonferencije
D	0.62 – 0.66	Učionice
E	0.58 – 0.62	Moderne crkve
F	0.54 – 0.58	Javni razglas
G	0.50 – 0.54	Uredi
H	0.46 – 0.50	Javni razglas u teškim akustičkim uvjetima
I	0.42 – 0.46	Javni razglas u jako teškim akustičkim uvjetima

J	0.38 – 0.42	Nedovoljno dobro za javni razglas
U	<0.36	Nedovoljno dobro za javni razglas

Tablica 3.4: Kategorije i vrijednosti STI za različite primjene

Izvor: <https://xiengineering.com/speech-intelligibility-index-sti-stipa-speech-intelligibility-measurements/>

STI se može mjeriti pomoću STIPA (*Speech Transmission Indeks for Public Address Systems*) metode u prostorima s dostupnim razglasima poput crkve ili auditorija. Prvi korak prilikom STIPA mjerenja je mjerenje pozadinske buke u tipičnim uvjetima očekivanim za mjereni prostor [18]. Primjerice, STI javnog razglasa za željeznički kolodvor bi se mjerio preko dana uz svu buku očekivanu uz takav prostor. Pozadinska buka se računa kako bi se svaki netipično glasan zvuk snimljen za vrijeme mjerenja mogao odbaciti, odnosno odbacuje se cijelo mjerenje te se isto mora ponoviti. Nakon uspostavljanja tipične razine pozadinske buke, na razglas se pušta testni STIPA signal kojeg čini ružičasti šum moduliran s dva modulacijska sinusna signala u rasponu od 125 Hz do 8 kHz. Modulacija i frekvencijski raspon oponašaju ljudski govor s različitim intenzitetom kroz vrijeme govora [21]. Testni signal se može reproducirati kroz postojeći sustav za razglas ili iz odvojenih, prethodno kalibriranih zvučnika koji reproduciraju zvuk jačine 60 dB na udaljenosti od 1 metra. Drugi način se koristi kada u prostoru nema sustava za razglas kao što je predavaonica. Mjerenja treba ponoviti na više mjernih točki unutar prostorije gdje svako mjerenje traje 15 sekundi. Na kraju se uzima jedna prosječna STI vrijednost za cijelu prostoriju [21].

3.2. Mjerna oprema

U akustičkim se mjerenjima koristi čitav niz mjerne opreme kojom se mogu odrediti parametri određenog prostora. Najčešća korištena oprema su mikrofoni u kombinaciji sa zvučnom karticom i odgovarajućim software-om za analizu zvuka i zvukomjeri. Osim uređaja kojima se mjeri zvuk, potrebno je

imati i podražaj kojim ćemo izmjeriti karakteristike prostora. Kao izvor zvuka se može koristiti skup zvučnika koji su postavljeni na način gdje predstavljaju neusmjereni izvor zvuka.



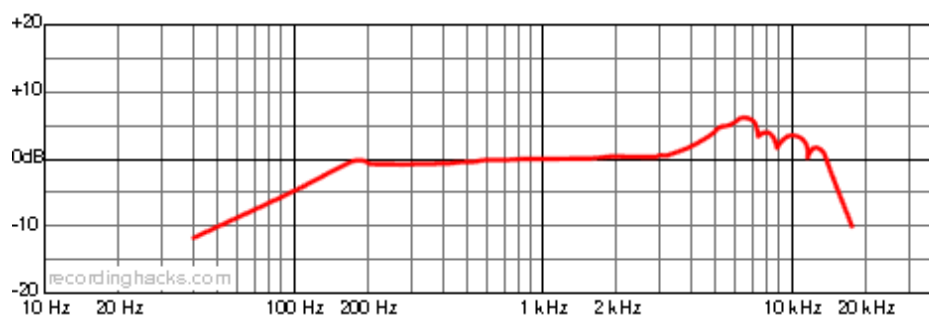
Slika 3.1: Neusmjereni zvučni izvor

Izvor: <https://akustikadesign.eu/mjerenje-u-akustici.html>

3.2.1. Mikrofoni

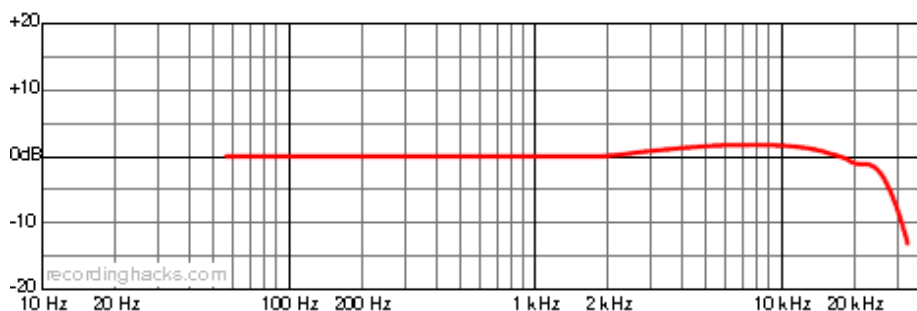
Mikrofon je elektromehanički uređaj koji pretvara dolazeći zvučni val u električni signal koji se prenosi dalje elektroakustičkim sustavom [9]. Iako se svi tipovi mikrofona sastoje od pomične membrane koja se miče s obzirom na nadolazeći zvučni val, mikrofone dijelimo s obzirom na način njihove konstrukcije. Najčešći tipovi mikrofona su dinamički, kondenzatorski, elektretski, kristalni (keramički) i vrpčasti (*ribbon*) mikrofoni. Glavna karakteristike mikrofona su frekvencijski odziv, usmjerenost i osjetljivost mikrofona. Osjetljivost mikrofona se može definirati kao napon induciran na mikrofonu kada do njega dolazi zvučni val.

Frekvencijski odziv mikrofona definira frekvencijski raspon zvuka koji mikrofona može reproducirati i kako će se izlazni signal mikrofona varirati duž frekvencijskog raspona [22]. Frekvencijski odziv se prikazuje grafom na logaritamskoj skali od 20 Hz do 20 kHz, iako rasponi mogu biti i veći. Takav prikaz nam može puno značiti prilikom odabira mikrofona za različite primjene. Odziv mikrofona može biti „ravan“ ili oblikovan. Mikrofona ravne karakteristike je jednako osjetljiv na sve frekvencije unutar određenog raspona. Signal takvog mikrofona dobro prikazuje pravi zvuk koji bi osoba čula da se nalazi u prostoriji u kojoj je i mikrofona. Takav tip mikrofona može biti dobar za snimanje instrumenata i ambijentalnog zvuka prostora, ali za snimanje vokala je bolje imati oblikovanu karakteristiku. Mikrofona oblikovane karakteristike je više, odnosno manje osjetljiv na neke frekvencije unutar cijelog raspona. Većina mikrofona imaju oblikovanu karakteristiku na način gdje su manji osjetljivi na niže tonove što umanjuje čujnost zvuka prilikom rukovanja mikrofonom [22]. Bez obzira na tip korištene karakteristike, odziv ne bi trebao imati velike skokove ili padove unutar frekvencijskog raspona jer tada može zvučati neprirodno.



Slika 3.2: Oblikovani frekvencijski odziv mikrofona Shure SM57

Izvor: <http://recordinghacks.com/microphones/Shure/sm57>

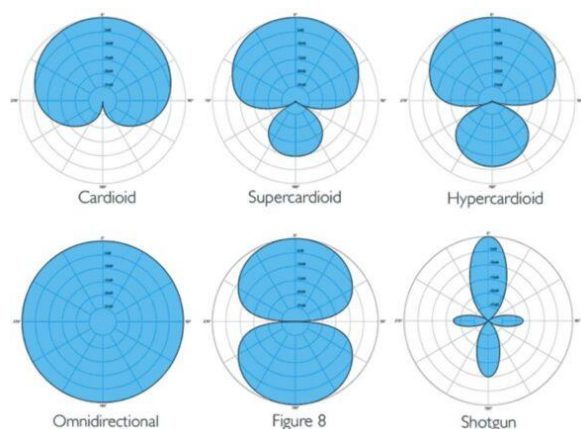


Slika 3.3: Ravni frekvencijski odziv mikrofona Behringer ECM8000

Izvor: <http://recordinghacks.com/microphones/Behringer/ECM8000>

Usmjerenost mikrofona daje informaciju o osjetljivost mikrofona s obzirom na njegovu orijentaciju u odnosu na izvor zvuka. Usmjerenost mikrofona prikazuje se polarnim dijagramom na kojem je prikazan odziv mikrofona u decibelima s obzirom na smjer dolaska zvučnog vala [23]. Na dijagramu se mogu iscrtavati usmjerenosti za jednu ili više frekvencija. Usmjerenost mikrofona može biti:

- Kardioidna, superkardioidne, hiperkardioidna – osjetljivost najveća s prednje strane, manja s bočnih i najmanja sa stražnje strane mikrofona
- Oblik osmice – osjetljivost velika s prednje i stražnje strane, mala s bočne strane mikrofona
- Neusmjerena – osjetljivost jednaka u svim stranama (ovisi o frekvenciji)
- *Shotgun* – iznimno usmjerena karakteristika samo u jednom smjeru



Slika 3.4: Polarni dijagrami mikrofona

Izvor: <https://chrissoundlab.com/what-is-a-polar-pattern/>

Kod dinamičkog mikrofona, unutar mikrofona se nalazi membrana koja se pomiče s obzirom na nadolazeći zvučni val. Za opnu je spojena zavojnica koja se nalazi unutar magnetskog polja. Pomicanjem zavojnice inducira se struja unutar zavojnice koja predstavlja izlazni električni signal mikrofona. Zavojnica i opna moraju biti vrlo lagani kako bi što ispravnije reproducirali visoke frekvencije. Dinamičke mikrofone karakterizira manja preciznost od kondenzatorskih, ali puno veća čvrstoća i otpornost na mehaničke udarce.

Kondenzatorski mikrofoni sastoje se od dvije tanke, čelične, paralelne ploče između kojih se nalazi uski prostor ispunjen zrakom. Primjenom istosmjernog napona na ploče koje čine opnu, one postaju kondenzator kojem se kapacitivnost mijenja ovisno o zvučnom tlaku koji dolazi do mikrofona. Upravo ta promjena kapacitivnosti predstavlja izlazni signal iz mikrofona. Ovakav tip mikrofona je vrlo osjetljiv i precizan, ali osjetljiviji na mehaničke udarce i zahtijeva polarizirajući napon za pravilno funkcioniranje. Elektretski mikrofoni su vrsta kondenzatorskih mikrofona unutar kojeg se nalazi tanka polimerska opna između metalnih ploča koja daje stalan naboj, te uklanja potrebu za vanjskim polarizirajućim naponom. Kondenzatorski i dinamički mikrofoni predstavljaju većinu mikrofona korištenih u studijskim okruženjima i nastupima uživo.

Keramički ili kristalni mikrofoni su mikrofoni gdje je opna mikrofona spojena na piezoelektrični materijal. Opna na koju se primjenjuje zvučni tlak stvara izobličenja na piezoelektričnom materijalu koji mehaničku energiju pretvara u električnu [24]. Ovakav tip mikrofona se koristi kao kontaktni mikrofoni na instrumentima i nisu precizni poput kondenzatorskih, ali su čvršći.

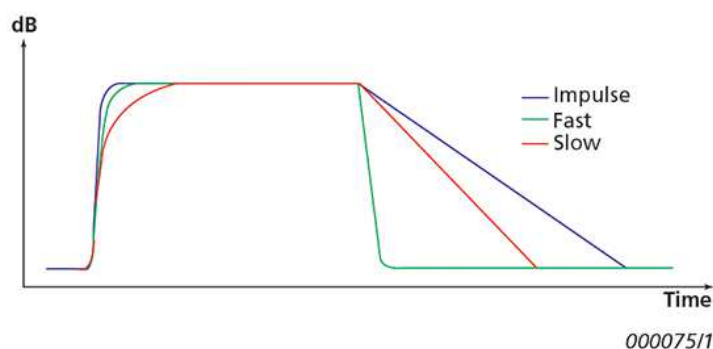
Vrpčasti (*ribbon*) mikrofoni se sastoje od tanke metalne folije koja se nalazi u magnetskom polju. Magnet se nalazi s dvije strane folije, što znači da su druge dvije strane mikrofona otvorene, dajući ovoj vrsti mikrofona usmjerenost u obliku osmice ili bi-direkcionalnu usmjerenost. Ovakva vrsta mikrofona je vrlo osjetljiva na mehaničke podražaje, uključujući i glasne zvučne podražaje.

3.2.2. Zvukomjer

Zvukomjer služi za mjerenje buke i ostalih zvučnih izvora kao i njihovih karakteristika. Ovakav instrument sadrži sve potrebne komponente koje odmah mogu prikazati rezultate mjerenja te se nakon proučavanja isti mogu kontrolirati i regulirati. Zvukomjer se sastoji od mikrofona, pretpojačala, dijela za procesuiranje signala i zaslona za prikaz rezultata [25]. Kao što je prethodno objašnjeno, mikrofoni pretvaraju zvučni signal u električni koji se šalje u pretpojačalo te se nad pojačanim signalom vrši daljnja obrada kako bi se

dobili traženi podaci. Najčešće korišten tip mikrofona u zvukomjerima je kondenzatorski.

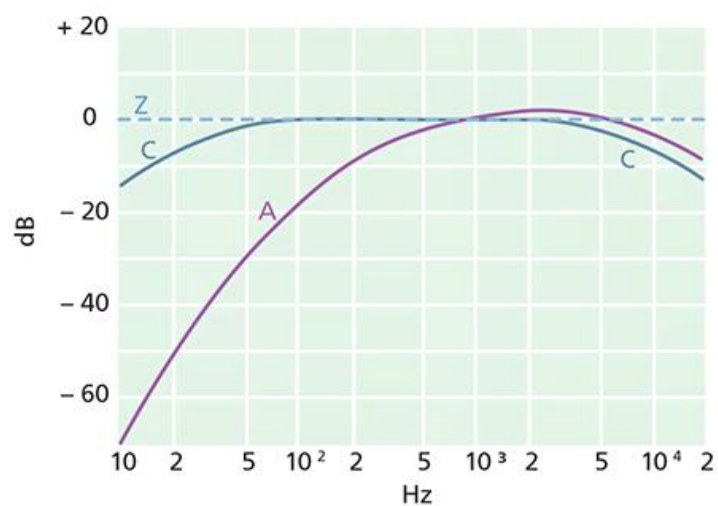
Obradu signala kod zvukomjera čine vremensko i frekvencijsko vrednovanje (engl. *weighting*) signala. Vremensko vrednovanje signala specificira kako zvukomjer reagira na promjenu zvučnog tlaka, a ono može biti brzo, sporo i impulsno [25]. Lakši način za shvatiti ova vrednovanja je kao vrijeme otklona igle na analognom mjernom instrumentu. Kod brzog vrednovanja bi se igla brzo dizala, ali sporo spuštala dok bi se kod sporog vrednovanja igla sporo spuštala i dizala što olakšava očitavanje rezultata. Impulsno vrednovanje ima brži otklon od brzog, ali igla sporo opada nakon otklona.



Slika 3.5: Vrste vremenskog vrednovanja signala

Izvor: https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/sound/what-is-a-sound-level-meter#!ref_bksv.com

Frekvencijskim se vrednovanjem signala namješta kako zvukomjer reagira na različite frekvencije unutar spektra. Različitim vrednovanjima se pokušavaju simulirati različite karakteristike ljudskog uha. Standard IEC 61672-1 definira A-vrednovanje, C-vrednovanje i Z-vrednovanje kao standardne za zvukomjere [25]. A-vrednovanje mijenja frekvencijski sadržaj signala umjerene razine na način na koji bi ga ljudsko uho čulo. C-vrednovanje mijenja frekvencijski sadržaj signala visoke razine na način na koje bi ga ljudsko uho čulo. Z-vrednovanje predstavlja ravan frekvencijski odziv od 10 Hz do 20 kHz.



Slike 3.6: Vrste frekvencijskog vrednovanja signala

Izvor: https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/sound/what-is-a-sound-level-meter#!ref_bksv.com

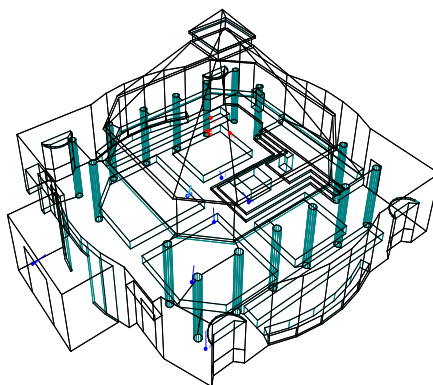
4. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije akustike prostora

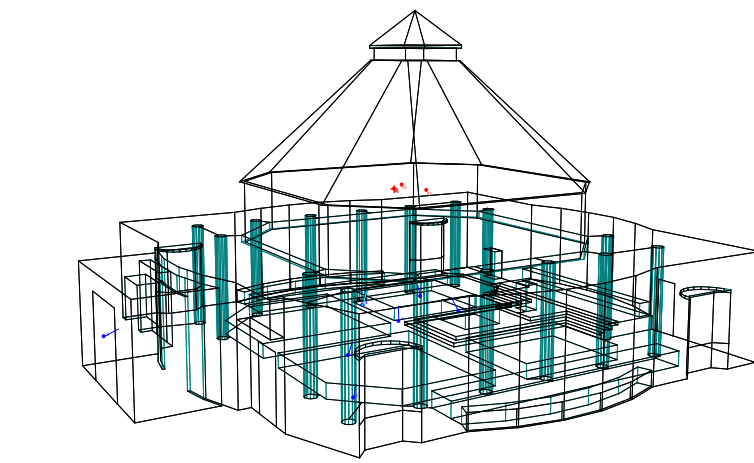
Kako bismo mogli na što objektivniji način ocijeniti kvalitetu programa za simulaciju akustike prostora, potrebno je imati referentne vrijednosti akustičkih parametara konkretnog prostora. Iz tog razloga su napravljena mjerenja akustičkih parametara crkve Rođenja Blažene Djevice Marije u Zagrebu. Rezultati mjerenja će se u kasnijem dijelu rada uspoređivati s dobivenim rezultatima simulacije gdje je isti prostor 3D modeliran i simuliran u programu *Odeon*. Prvo će se iznijeti i analizirati rezultati simulacije, nakon toga rezultati mjerenja i na posljepku će se oba skupa rezultata usporediti.

4.1. Rezultati simulacije

Simulacija mjerenja akustičkih parametara prostora obavljena je u programu *Odeon*. *Odeon* je jedan od programa korištenih za simulacije i mjerenje akustičkih parametara zatvorenih prostora koristeći 3D modele istih. Osim što se parametri mogu mjeriti i pretpostaviti, rezultati mjerenja se mogu ilustrirati i slušati koristeći vlastite zvukove [26].

Prije samog izvođenja simulacija i analize dobivenih rezultata, potrebno je napraviti dovoljno precizan trodimenzionalni model prostora za kojeg će mjerenja biti obavljena. Trodimenzionalni model crkve Rođenja BDM napravljen je u programu *SketchUp*. *Mesh* prikaz crkve prikazan je u nastavku.



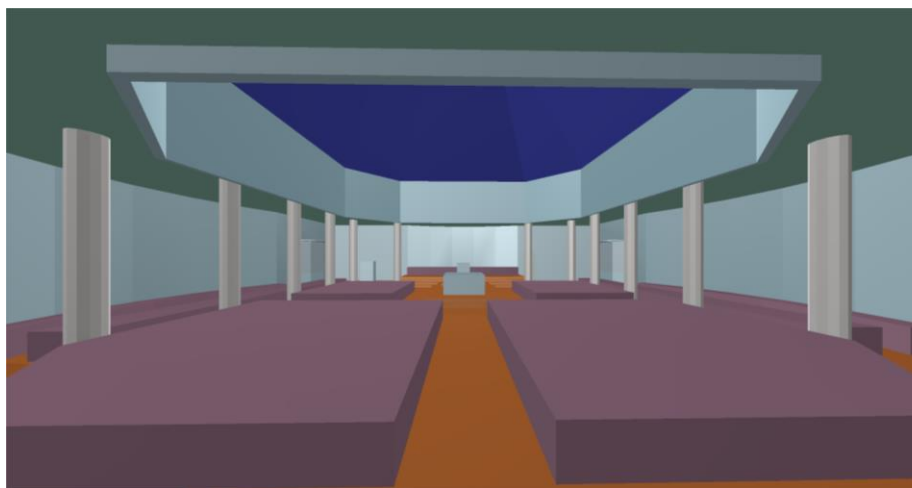


Slika 4.1: *Mesh* prikaz mjerene crkve Rođenja BDM

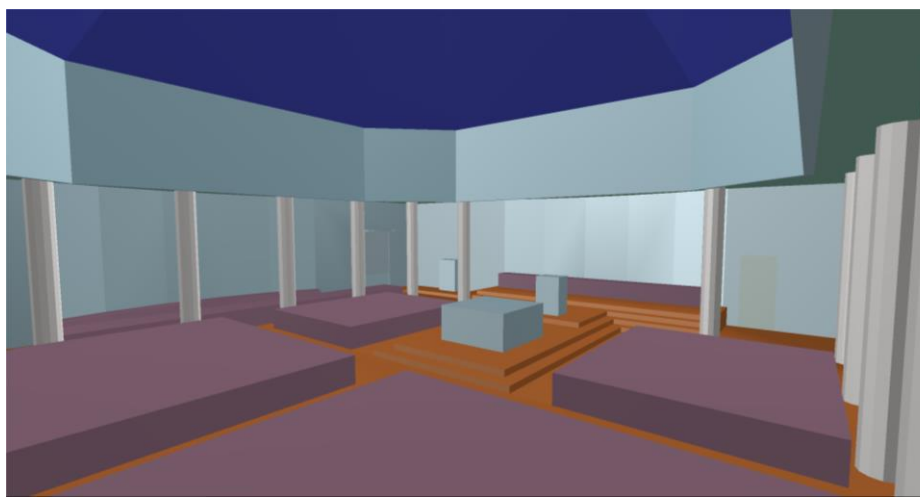
Kao što se vidi na slikama, crkva je modelirana realistično s obzirom na pravu građevinu. Svakoj površini u trodimenzionalnom modelu se u *Odeon*-u mogu dodijeliti odgovarajući materijali kojima su unaprijed upisane akustičke osobine. Primjerice, gornji dio stropa (nalik piramidi) imat će svojstva drvene površine dok će prozori imati svojstva stakla i tako dalje. Slike unutrašnjosti trodimenzionalnog modela bolje prikazuju na kojem dijelovima objekta je korišteni koji materijal. Svakom materijalu se dodjeljuje određena boja. Isto tako, valja napomenuti da su objekti poput klupa prikazani kao jedan veliki objekt (na slici 4.2 prikazan purpurnom bojom). Razlog tomu je činjenica da bi modeliranje svih pojedinih klupa oduzelo značajnu količinu vremena prilikom modeliranja i prilikom računanja, a rezultati ne bi bili znatno točniji. Većini materijala od kojih je prostor napravljen pridodana je relativno niska vrijednost raspršenja nadolazećeg zvučnog vala od 0.05. Jedini izuzetak su klupe koje zbog svog oblika imaju veći faktor raspršenja zvučnog vala, procijenjen oko 0.5.

Zakrivljeni objekti poput stupova modelirani su kao skup međusobno povezanih manjih površina. Jedan od problema kod takvih modela je što bi se događala rubna difrakcija zvučnog vala od rub svake manje površine od kojih je stup modeliran. Posljedica toga bi bilo pretjerano raspršenje vala. Iz tog razloga se kod stupova koristi svojstvo frakcijskog tipa površine. Frakcijski tip tretira niz međusobno spojenih ravnih površina kao jednu zaobljenu površinu i sprječava pojavu prekomjernog raspršenja [27].

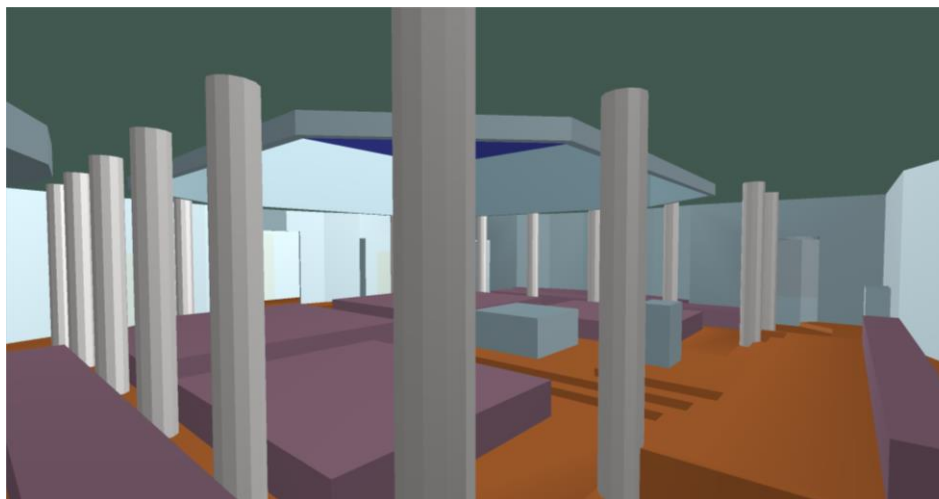
Prilikom simuliranja korišteno je šest zasebnih prijemnih točaka i tri odašiljačke točke ili zvučnika, smještenih u središtu crkve 5 metara iznad tla. Zvučnici u simulaciji nisu usmjereni, odnosno odašilju zvučni signal jednako u svim smjerovima. Trodimenzionalni model napravljen je od sveukupno 490 elemenata ili površina. Unutrašnjost trodimenzionalnog modela prikazana je u nastavku.



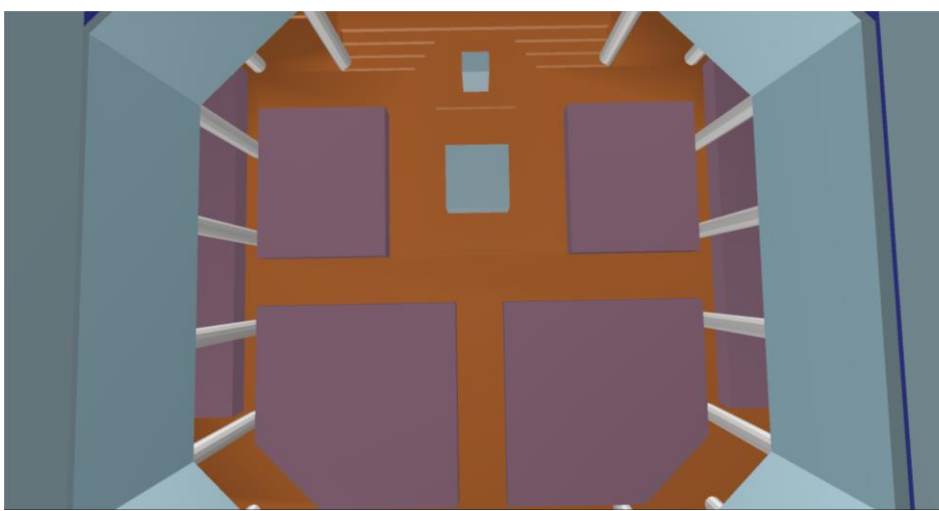
Slika 4.2: Prikaz trodimenzionalnog modela s ulaza



Slika 4.3: Prikaz trodimenzionalnog modela s jednog od stupova



Slika 4.4: Prikaz trodimenzionalnog modela iz kuta



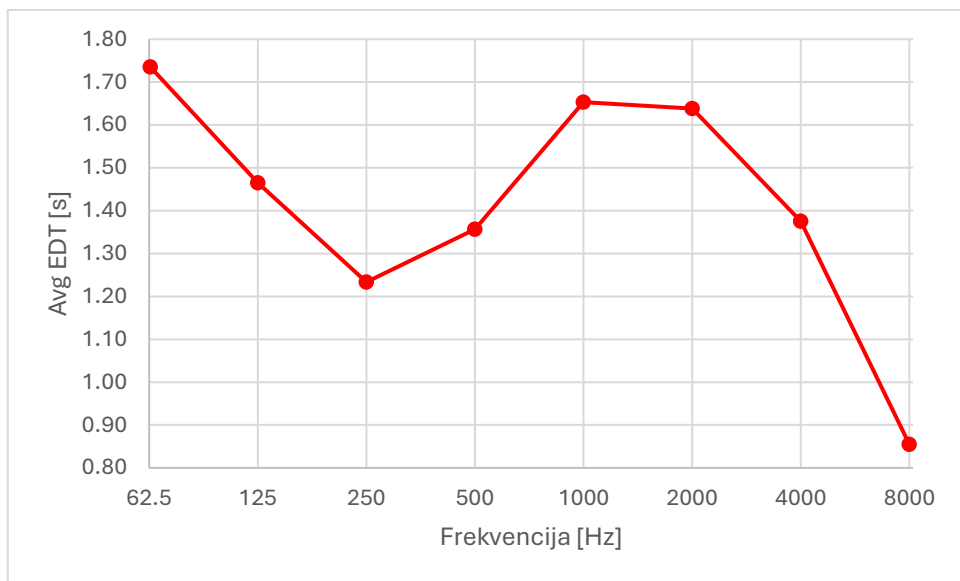
Slika 4.5: Prikaz trodimenzionalnog modela sa stropa

Dobivene vrijednosti akustičkih parametara prostora su originalno zabilježene kao zasebne vrijednosti za svih šest mjernih točaka. S obzirom da nas zanimaju općenite vrijednosti parametara za prostor, sve izmjerene vrijednosti za svih šest točaka su uzete i izračunate su prosječne vrijednosti za svaki parametar. Rezultati u obliku grafova i tablica su prikazani.

Prijemnik	1	2	3	4	5	6
STI (Male)	0.53	0.47	0.5	0.53	0.54	0.54

Tablica 4.1: Vrijednosti STI po prijemnicima

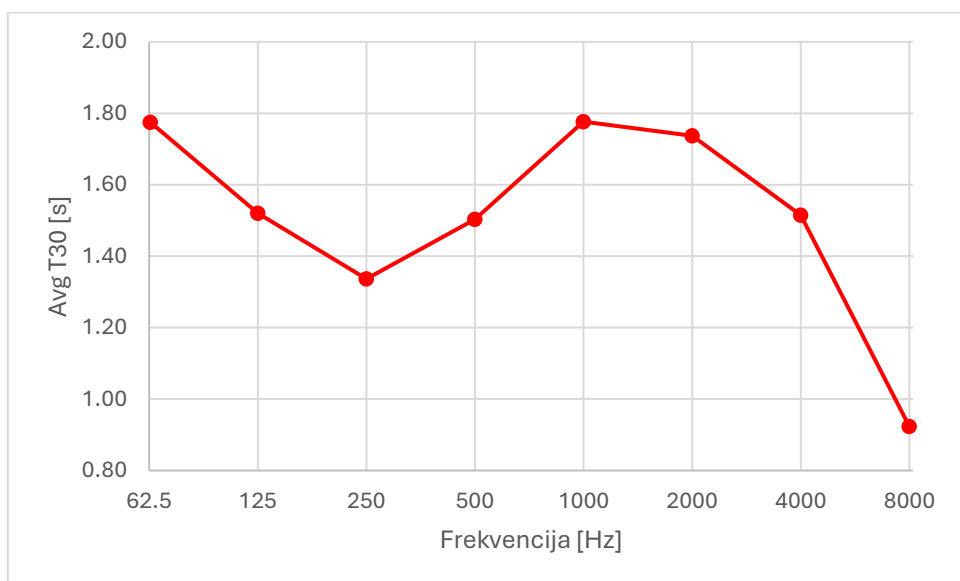
Prosječna **STI** vrijednost crkve iznosi **0.52** za muški glas. Referirajući se na tablicu 3.4 vidimo da bi crkva spadala u kategoriju G po vrijednosti STI. Blizu je očekivane vrijednosti od 0.58 do 0.62 za moderne crkve.



Slika 4.6: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg EDT [s]	1.74	1.47	1.23	1.36	1.65	1.64	1.38	0.86

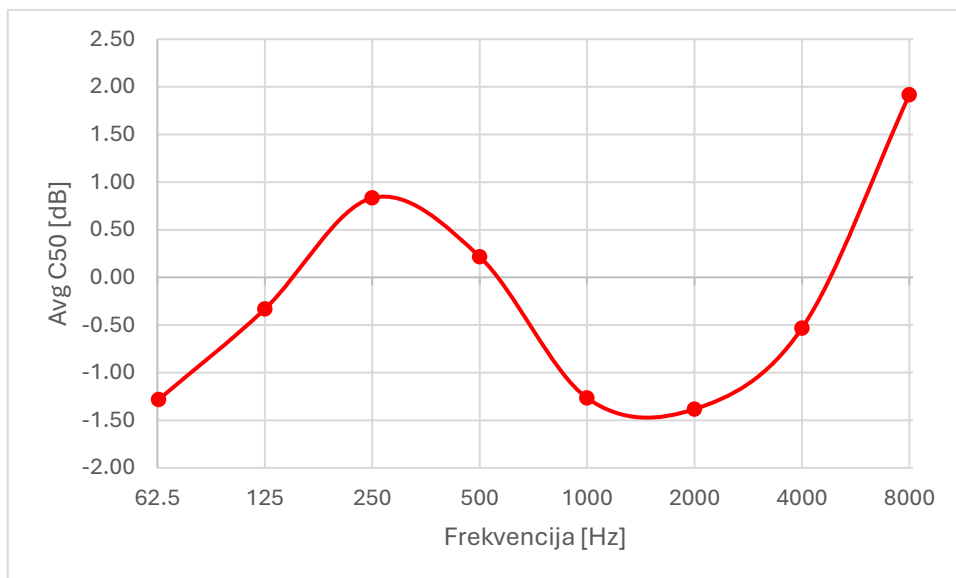
Tablica 4.2: Simulacija – prosječne vrijednosti EDT-a po frekvencijama



Slika 4.7: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti T_{30} po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg T_{30} [s]	1.78	1.52	1.34	1.50	1.78	1.74	1.52	0.92

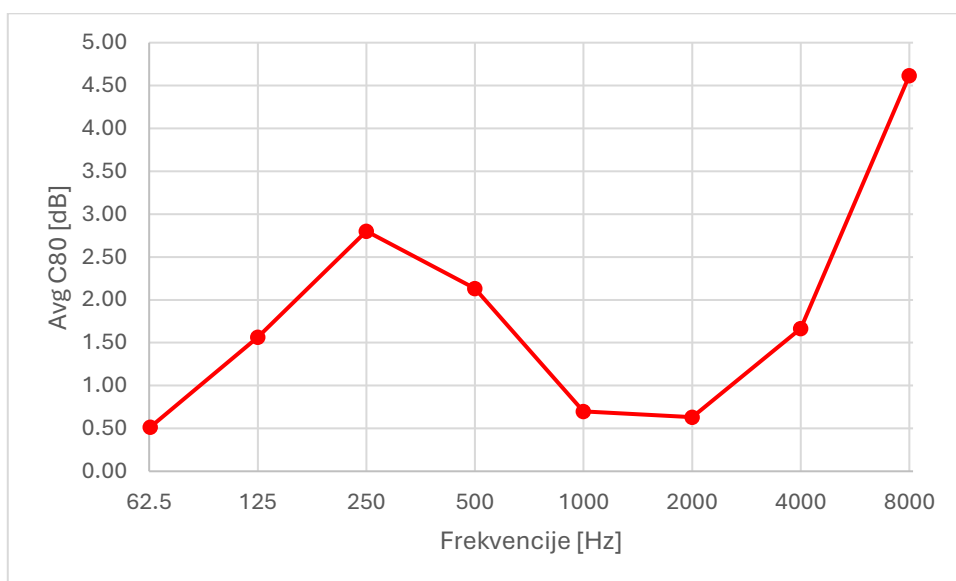
Tablica 4.3: Simulacija – prosječne vrijednosti T_{30} po frekvencijama



Slika 4.8: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti C_{50} po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg C_{50} [dB]	-1.28	-0.33	0.83	0.22	-1.27	-1.38	-0.53	1.92

Tablica 4.4: Simulacija – prosječne vrijednosti C_{50} po frekvencijama



Slika 4.9: Simulacija – graf prosječnih vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg C_{80} [dB]	0.52	1.57	2.80	2.13	0.70	0.63	1.67	4.62

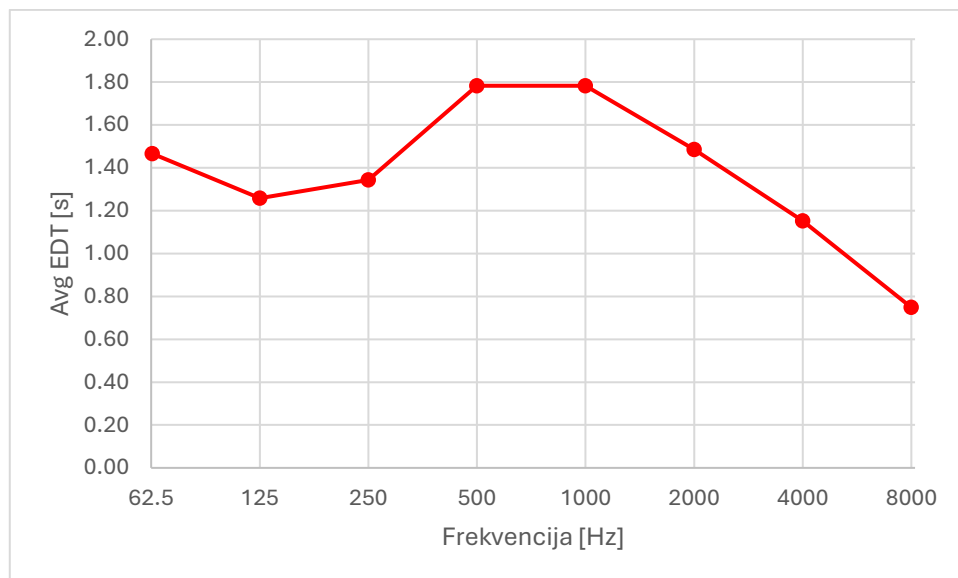
Tablica 4.5: Simulacija – prosječne vrijednosti C_{80} po frekvencijama

4.2. Rezultati mjerenja

Mjerenja akustičkih parametara crkve Rođenja Blažene Djevice Marije odrađena su pomoću programa Arta. Arta je program korišten za mjerenje i analiziranje zvuka u akustičkim i komunikacijskim sustavima [28]. Program omogućuje korisnicima mjerenja akustičkih parametara prostora uz mal broj instrumenata i relativno jeftine opreme. Za potrebe mjerenja korišten je laptop s instaliranim programom Arta, vanjska zvučna kartica ili audio sučelje i mjerni mikrofoni. Kao mjerni mikrofoni se koriste kondenzatorski mikrofoni s izrazito ravnom frekvencijskom karakteristikom. U našem slučaju to je bio Behringer ECM8000 čija karakteristika je prikazana na slici 3.3.

Dolaskom u prostor, određena je najefikasnija metoda mjerenja prosječnih vrijednosti parametara prostora: tlocrt prostora (oblik kvadrata) podijeljen je na raster ili matricu 5x5. Na svaku od pozicija unutar matrice bi se prvo postavio mikrofoni (prva pozicija je 1,1), a zatim bi se pustio frekvencijski *sweep*, odnosno zvučni zapis koji prolazi kroz sve frekvencije u nekoliko sekundi. Umjesto *sweep*-a se mogao koristiti i šum koji je frekvencijski bogat, a može se koristiti i vanjska pobuda poput pljeska ili pucanja balona. Kad zvučni *sweep* završi, mikrofoni se pomiče na sljedeću lokaciju, primjerice 1,2. Postupak se ponavlja dok se ne obrade sve prijemne točke, odnosno točke rastera. Nakon spajanja mjerne opreme i provjere funkcionalnosti sustava, mikrofoni se pomiče na prvu poziciju i započinje postupak mjerenja.

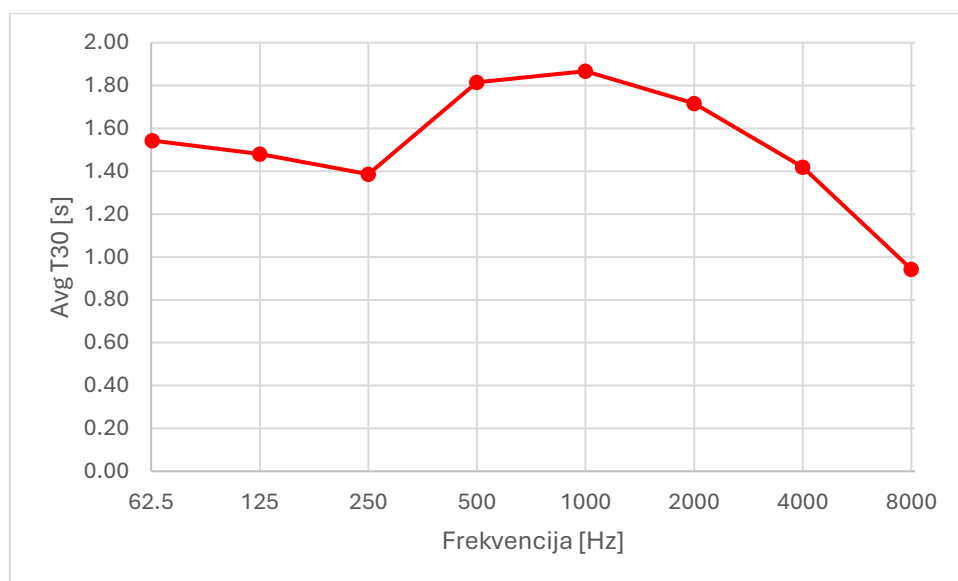
Nakon mjerenja svih točki postavljenog rastera, podaci su spremljeni i spremni za obradu. S obzirom da bi prikaz svih prikupljenih podataka za svaku pojedinačnu točku rastera zauzelo velik dio rada, podaci od interesa su naknadno obrađeni u Excel-u. Svaka točka ima izmjerene parametre EDT, T_{30} , C_{50} , C_{80} za frekvencije 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz. Sve vrijednosti istog parametra i iste frekvencije, ali različitih točaka rastera su izdvojeni te se računa njihova prosječna vrijednost.



Slika 4.10: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti EDT-a po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg EDT [s]	1.47	1.26	1.34	1.78	1.78	1.49	1.15	0.75

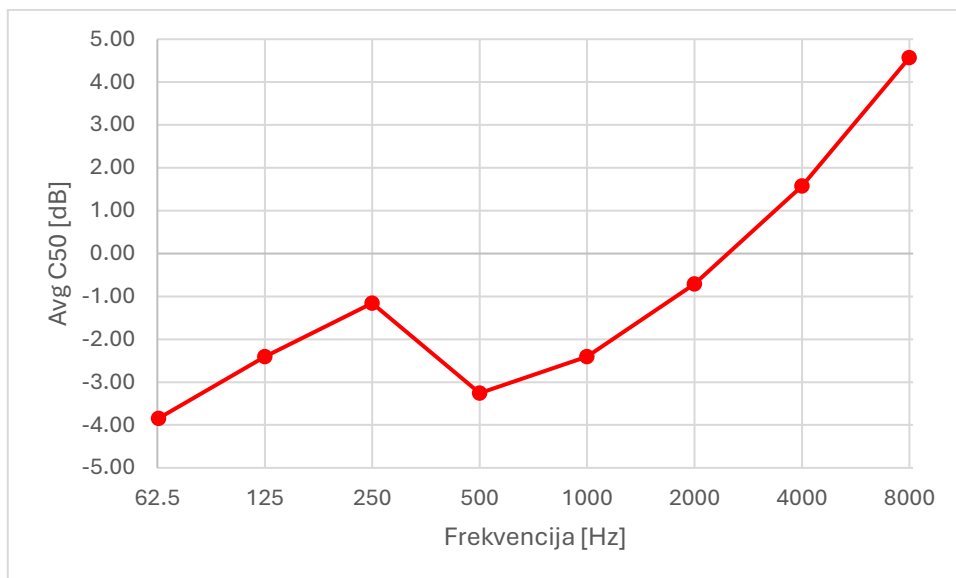
Tablica 4.6: Mjerenje – prosječne vrijednosti EDT-a po frekvencijama



Slika 4.11: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti T₃₀ po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg T ₃₀ [s]	1.54	1.48	1.39	1.81	1.87	1.72	1.42	0.94

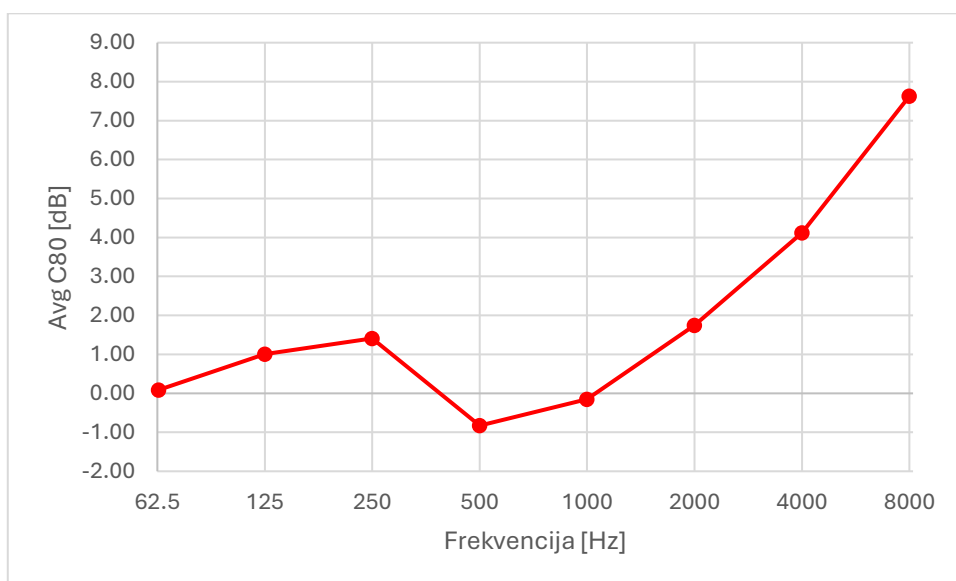
Tablica 4.7: Mjerenje – prosječne vrijednosti T₃₀ po frekvencijama



Slika 4.12: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti C_{50} po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg C_{50} [dB]	-3.84	-2.41	-1.16	-3.26	-2.4	-0.71	1.57	4.57

Tablica 4.8: Mjerenje – prosječne vrijednosti C_{50} po frekvencijama



Slika 4.13: Mjerenje – graf prosječnih vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg C_{80} [dB]	0.09	1.01	1.41	-0.83	-0.15	1.75	4.12	7.63

Tablica 4.9: Mjerenje – prosječne vrijednosti C_{80} po frekvencijama

Prosječna **STI** vrijednost crkve iznosi **0.55** za muški glas.

4.3. Usporedba rezultata mjerenja i simulacije akustike prostora

Kako bismo lakše mogli uspoređivati prosječne vrijednosti akustičkih parametara simulacije i mjerenja, potrebno je ispisati tablice s vrijednostima.

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg EDT [s]	1.74	1.47	1.23	1.36	1.65	1.64	1.38	0.86
Avg T₃₀ [s]	1.78	1.52	1.34	1.50	1.78	1.74	1.52	0.92
Avg C₅₀ [dB]	-1.28	-0.33	0.83	0.22	-1.27	-1.38	-0.53	1.92
Avg C₈₀ [dB]	0.52	1.57	2.80	2.13	0.70	0.63	1.67	4.62

Tablica 4.10: Simulacija – prosječne vrijednosti akustičkih parametara crkve

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Avg EDT [s]	1.47	1.26	1.34	1.78	1.78	1.49	1.15	0.75
Avg T₃₀ [s]	1.54	1.48	1.39	1.81	1.87	1.72	1.42	0.94
Avg C₅₀ [dB]	-3.84	-2.41	-1.16	-3.26	-2.4	-0.71	1.57	4.57
Avg C₈₀ [dB]	0.09	1.01	1.41	-0.83	-0.15	1.75	4.12	7.63

Tablica 4.11: Mjerenje – prosječne vrijednosti akustičkih parametara crkve

Frek. [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Error EDT [s]	0.27	0.21	0.11	0.43	0.13	0.15	0.22	0.11
Error T₃₀ [s]	0.23	0.04	0.05	0.31	0.09	0.02	0.10	0.01
Error C₅₀ [dB]	2.56	2.08	1.99	3.47	1.14	0.67	2.10	2.65
Error C₈₀ [dB]	0.43	0.56	1.39	2.96	0.85	1.11	2.46	3.01

Tablica 4.12: Apsolutna pogreška simulacije i mjerenja prosječnih vrijednosti akustičkih parametara crkve

Usporedbom EDT-a simulacije i mjerenja, kao i T₃₀ vidimo da su rezultati obje metode međusobno slični. Odstupanja EDT-a su u rasponu od 0.11 do 0.43 s. Za T₃₀ razlika između mjerenih vrijednosti i vrijednosti simulacije su u rasponu od 0.01 i 0.31 s. Razlike između rezultata mjerenja i

simulacije za EDT i T_{30} su zadovoljavajuće i možemo reći da je simulacija dovoljno točno aproksimirala spomenute parametre crkve. Razlike između izmjerenih i simuliranih vrijednosti za C_{50} i C_{80} su nešto veće u rasponu od 0.67 do 3.27 dB i od 0.43 do 3.01 dB, zasebno. Potencijalni razlog razlike između mjerene i simulacijske vrijednosti su volumen prostorije i udaljenost prijemnika od zvučnog izvora. Kod mjerenja, prijemnici su bili rašireni po 5x5 rasteru, dok su u simulaciji prijemnici bili pseudo-nasumično postavljeni i bilo ih je ukupno šest. Aproksimirani volumen prostorije prema simulaciji iznosi 2447 m³. Vrijednosti jasnoće kod mjerenja i simulacije su zadovoljavajući.

S obzirom da je trodimenzionalni model crkve izgrađen prema originalnoj građevini, povećana je sličnost rezultata mjerenja i simulacije. Male razlike ipak moraju postojati jer će geometrija modela uvijek biti samo aproksimacija originalne građevine. Svojstva materijala od kojih je prostor izgrađen su također aproksimirani u modelu. Svojstva materijala mjerene građevine su takva kakva jesu, odnosno u realnom prostoru su potpuno definirana. Aproksimacije u modelu, iako mogu biti detaljne pomoću mjerenja apsorpcije i raspršenja, će opet biti aproksimacije. Na razlike u rezultatu će uvelike utjecati i fenomeni propagacije zvučnog vala unutar prostora. Informacije o fazi vala kao i difrakcija vala unutar prostora će u prostoru biti onakva kakva jesu, dok će u simulaciji biti aproksimirani uz ograničenu preciznost. Apsorpcija zraka se također mora pretpostaviti kod simulacije dok u prostoru ovisi o temperaturi i vlažnosti tijekom mjerenja. Na rezultate također utječu karakteristike poput usmjerenosti zvučnog izvora. Kod programa *Odeon*, zvučni izvori su savršeno omnidirekcionalni dok su zvučnici korišteni prilikom mjerenja imali određenu usmjerenost. Isto tako, dinamički raspon zvučnika u prostoru, kao i frekvencijska karakteristika nisu savršeni. Kod simulacije nema ovakvih problema. Prilikom obrade podataka, kod mjerenja je potrebno filtriranje traženih frekvencija (63, 125, 250...) što mijenja originalni signal.

5. Zaključak

Mjerenja, kao i simulacija, imaju svoje prednosti i svoje mane. Obje metode određivanja akustičkih parametara prostora treba uspoređivati, ali ne iz razloga kako bi odredili koja metoda je bolja ili lošija, već da bi utvrdili preciznost jedne ili druge metode. Odnosno, izmjerene vrijednosti uspoređujemo s vrijednostima simulacije kako bi vidjeli gdje možemo poboljšati simulaciju kako bi bila što vjerniji prikaz prave građevine. Obje metode su jednako važne. Simulacijom možemo relativno brzo i uz male troškove unaprijed određivati akustičke parametre prostorije nakon akustičkog tretiranja. Na ovakav način se može dobro isplanirati postupak budućeg akustičkog tretiranja prostorije. Isto tako, simulacija pruža veliku prednost gotovo savršene ponovljivosti ispitivanja jer su uzastopna mjerenja rađena u identičnim uvjetima. Osim planiranja akustičkog tretiranja prostora koji je tek u izradi, simulacije mogu pomoći i kod akustičkog tretiranja već postojećeg prostora. U ovakvim situacijama, mjerenje je ključan element prilikom početka planiranja akustike prostora. Mjerenjima možemo dobiti prave vrijednosti akustičkih parametara prostorije na temelju kojih možemo izraditi model koristeći materijale približno jednakih akustičkih svojstava poput onih u pravoj građevini. U ovakvoj primjeni se najbolje vidi međusobno potpomaganje rezultata mjerenja i simulacije. Usporedbom rezultata simulacije programa *Odeon* i pravih mjerenja u crkvi Rođenja BDM zaključeno je da su rezultati dovoljno slični te da bi se, ako je to potrebno, buduće planiranje akustičkog tretiranja prostora moglo relativno brzo i jeftino izvoditi u *Odeon*-u prije nego se dođe do konačnog rješenja. Nakon zadovoljavajućih rezultata dobivenih simulacijom, može se krenuti s akustičkim tretiranjem prostora. Upravo u takvoj primjeni simulacije i mjerenja leži njihova najveća vrijednost.

Literatura

1. Egan, David: *Architectural Acoustics, Illustrated Edition*, J. Ross Publishing, February 1, 2007.
2. Steele, Daniel L.; Chon, Song Hui: *A Perceptual Study of Sound Annoyance*, January 2007.
3. Barron, Michael: *Auditorium Acoustics and Architectural Design, 2nd Edition*, Spon Press, September 24, 2009.
4. „hertz“. (1992). *American Heritage Dictionary of the English Language* (3rd ed.), Boston: Houghton Mifflin.
5. Faiz, A.; Ducourneau, J; Khanfir, A.; Chatillon, J.: *Measurement of sound diffusion coefficients of scattering furnishing volumes present in workplaces*, Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, April, 2012.
6. Lyd & akustikk: *Difference between diffusion and scattering*, s Interneta, <https://www.lydogakustikk.no/difference-between-diffusion-and-scattering/>, 25.4.2024.
7. Cleveland Clinic: *Ear: Anatomy, Facts & Function*, s Interneta, <https://my.clevelandclinic.org/health/body/24048-ear>, 25.4.2024.
8. sluh. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024.
9. Long, Marshall: *Architectural Acoustics, 2nd Edition*, Academic Press, March 17, 2014.
10. Robinson, D. W.; Dadson, R. S.: *A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones*, British Journal of Applied Physics; Volume 7; Number 5, IOP Publishing Ltd, 1956.
11. Plomp, R.; Levelt, W. J. M.: *Total Consonance and Critical Bandwidth*, The Journal of the Acoustical Society of America; Volume 38; Issue 4, AIP Publishing, October 1965
12. Gelfand, Stanley A.: *„Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics. 5th Edition“*, CRC Press, Boca Raton, December 18, 2009.

13. Library of Congress: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections: MP3 File Format, s Interneta, <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000105.shtml>, 27.4.2024.
14. Lewers, T. H.; Anderson, J. S.: *Some acoustical properties of St Paul's Cathedral, London*, Journal of Sound and Vibration; Volume 92; Issue 2; Pages 285-297, Elsevier, January 22, 1984.
15. Svantek: *Acoustic Measurements*, s Interneta, <https://svantek.com/services/acoustic-measurements/>, 2.5.2024.
16. Nave, C. R.: *HyperPhysics*, s Interneta, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>, 3.5.2024.
17. Atelier Crescendo: *Sound Reverberation – Part 2: Specialist indices*, s Interneta, <https://ateliercrescendo.ac/sound-reverberation-part-2-specialist-indices/>, 3.5.2024.
18. NTi Audio: *Speech Intelligibility STI*, s Interneta, <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/how-do-we-measure-speech-intelligibility-sti>, 4.5.2024.
19. Xi Engineering Consultants: *Speech Intelligibility Indeks (STI) & STIPA | Speech Intelligibility Measurements*, s Interneta, <https://xiengineering.com/speech-intelligibility-index-sti-stipa-speech-intelligibility-measurements/>, 14.5.2024.
20. International Electrotechnical Commission: *IEC 60268-16:2011*, June 28, 2011.
21. NTi Audio: *Speech Intelligibility STI*, s Interneta, <https://www.nti-audio.com/en/applications/evacuation-systems/speech-intelligibility-stipa>, 18.5.2024.
22. Rochman, David: *Mic Basics: What is frequency response?*, s Interneta, <https://www.shure.com/en-US/performance-production/louder/mic-basics-frequency-response>, 30.5.2024.
23. Truax, Barry: *Handbook for Acoustic Ecology*, Cambridge Street Publishing, 1999.

24. Nanomotion: *The Piezoelectric Effect*, s Interneta, <https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/the-piezoelectric-effect/>, 4.6.2024.
25. Hottinger Brüel & Kjær: *What is a Sound Level Meter*, s interneta, https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/sound/what-is-a-sound-level-meter#!ref_bksv.com, 12.6.2024.
26. Odeon Room Acoustics Software: *What is ODEON?*, s Interneta, <https://odeon.dk/product/what-is-odeon/>, 22.6.2024.
27. Odeon Room Acoustics Software: *Tutorials about Materials and Wall Types*, s Interneta, <https://odeon.dk/learn/video-tutorials/materials-and-wall-types/>, 22.6.2024
28. Artalabs: *Artalabs software*, s Interneta, <https://www.artalabs.hr/>, 22.6.2024.