

Mjerenje buke na odjelu za fiziku

Knezović, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:757929>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



IVANA KNEZOVIĆ

MJERENJE BUKE NA ODJELU ZA FIZIKU

Diplomski rad

Osijek, 2018.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



IVANA KNEZOVIĆ

MJERENJE BUKE NA ODJELU ZA FIZIKU

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku radi stjecanja
akademske naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE**

Osijek, 2018.

„Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića kao mentora i mr.sc. Darija Varžića kao komentora u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VALOVI	2
2.1. Definicija i vrste valova.....	2
3. POVIJESNI RAZVOJ AKUSTIKE	6
4. OSNOVNI POJMOVI AKUSTIKE	10
4.1. Brzina širenja zvuka	10
4.2. Zvučni tlak.....	14
4.3. Zvučna energija	16
4.4. Razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage	20
5. GRAĐA UHA I SLUŠNI PROCES	22
5.1. Vanjsko uho.....	23
5.2. Srednje uho.....	23
5.3. Unutarnje uho	24
6. SVOJSTVA SLUHA	25
6.1. Prag čujnosti i prag boli.....	25
6.2. Glasnoća	27
7. ANALIZA ZVUČNOG SPEKTRA	30
7.1. Zvučni spektar	30
7.2. Fourierova analiza	32
7.3. Frekvencijski pojasevi	33
7.4. Korekcijski filtri	35
7.5. Statistički percentili i ekvivalentna razina buke	38
8. BUKA I NJEN UTJECAJ NA LJUDE.....	41
9. MJERENJE BUKE ZVUKOMJEROM	45
9.1. Mjerenje buke u hodniku	49
9.1.1. Mjerenje buke u hodniku zvukomjerom	49
9.1.2. Mjerenje buke u hodniku aplikacijom na mobilnom uređaju	51
9.2. Mjerenje buke zvukomjerom u učionici 50 i elektroničkom praktikumu 67	52
9.3. Mjerenje buke servera zvukomjerom u pretprostoriji	54

9.4.	Mjerenje buke servera zvukomjerom u uredima 56 i 61	55
9.5.	Mjerenje buke zvukomjerom u laboratoriju 57	58
9.6.	Mjerenje buke zvukomjerom u studentskoj kantini	62
9.7.	Mjerenje buke zvukomjerom na prednjem i stražnjem ulazu.....	63
10.	METODIČKA OBRADA	65
11.	ZAKLJUČAK	86
12.	LITERATURA.....	88
	ŽIVOTOPIS	92

MJERENJE BUKE NA ODJELU ZA FIZIKU

IVANA KNEZOVIĆ

Sažetak

U uvodnom dijelu diplomskog rada navedeni su razlozi zbog kojih je važno istraživati i analizirati zvuk. Dana je definicija, osnovna podjela valova te povijesni pregled razvoja akustike. Središnji dio rada posvećen je objašnjavanju fizikalnih veličina koje koristimo pri interpretaciji zvuka: brzine širenja zvuka, zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta, zvučne energije, zvučne snage te razine zvučnog tlaka, intenziteta i snage te subjektivnih veličina: razine glasnoće i glasnoće. Također, opisan je slušni proces i uloga pojedinih dijelova uha u tom procesu. Nadalje, objašnjeni su osnovni pojmovi i metode potrebne za analizu zvuka: zvučni spektar, Fourierova analiza, frekvencijski pojasevi, vremensko i frekvencijsko vrednovanje, ekvivalentna, najviša, najniža i vršna razina buke te statistički percentili i kumulativna razdioba buke. Opisan je utjecaj buke na ljude te su prikazani rezultati mjerenja buke zvukomjerom. Na kraju je metodički obrađena nastavna jedinica Zvučni valovi.

(92 stranice, 51 slika, 14 tablica, 62 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: analiza zvuka / buka / sluh / valovi / zvuk / zvukomjer

Mentor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Komentor: mr. sc. Darije Varžić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler, mr. sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 7. ožujka 2018.

NOISE MEASUREMENT AT DEPARTMENT OF PHYSICS

IVANA KNEZOVIĆ

Abstract

The first part of this thesis presents reasons to make sound measurements and analysis. It includes definition, main types of waves and historical overview of the development of acoustics. The central part of the thesis tends to explain the basic properties of sound waves by defining physical quantities: speed of sound, sound pressure, sound intensity, sound energy, sound power, sound pressure level, sound intensity level, sound power level and subjective quantities: loudness level and loudness. Also, this thesis describes the process of hearing with three distinguishable parts of ear and their functions. Furthermore, basic terms and methods needed for sound analysis as: sound spectrum, Fourier analysis, frequency bands, time and frequency weighting, equivalent continuous, maximum, minimum and peak noise level, percentiles and noise cumulative distribution, are explained. Effects of noise on human health and performance are described and results of measurement with a sound meter are presented in this thesis. Finally, unit “Sound waves” has been methodically processed.

(92 pages, 51 figures, 14 tables, 62 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: hearing / noise / sound / sound analysis / sound meter / waves

Supervisor: Denis Stanić, Ph.D., Darije Varžić, M.Sc.

Reviewers: Maja Varga Pajtler, Ph.D., Slavko Petrinšak, M.Sc.

Thesis accepted: March 7, 2018

1. UVOD

Proučavanje valova ima poseban značaj u fizici. Kada izgovorimo riječ val, prvo pomislimo na valove na vodi. No svakodnevno nas okružuju brojne vrste valova: radiovalovi, mikrovalovi, zvučni valovi. Kako bi si predočili koliko su važni valovi za suvremeni svijet, promotrimo zvučne valove. Zvuk je sastavni dio čovjekova okruženja. Pomoću zvuka komuniciramo s drugim ljudima, saznajemo nove informacije i opažamo svijet oko sebe. Svakodnevno možemo slušati omiljene pjesme zbog toga jer izvođač proizvodi zvučne valove, a mi ih imamo mogućnost opaziti.

Osim opažanja željenih informacija koje nosi zvuk, nažalost sve češće smo izloženi i neugodnim utjecajima zvuka. Neželjena informacija koju nosi zvuk je buka, a ona je jedan od nusproizvoda ubrzanog tehničkog i tehnološkog razvoja. Budući da buka postaje sve veći problem svakodnevnice koji oštećuje čovjekovo zdravlje, velik broj stručnjaka iz različitih područja djelatnosti pokušava odgovoriti na pitanje kako smanjiti buku i njene štetne utjecaje. Osim što oštećuje zdravlje [5, 21, 39, 45, 48], buka djeluje i kao kočnica pri obavljanju svakodnevnih poslova. Istraživanjem buke na radnim mjestima uspostavilo se da se smanjivanjem razine buke za svaki decibel u nedopuštenom području povećava proizvodnost rada za 1%. [55]

Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je izmjeriti razinu buke na određenim lokacijama Odjela za fiziku, analizirati rezultate i na temelju rezultata zaključiti jesu li zaposlenici Odjela za fiziku izloženi dopuštenoj razini buke te dati prijedloge kako smanjiti utjecaj buke na određenim mjestima. Budući da je ovaj rad izrađen kako bih stekla akademski naziv magistra edukacije, na kraju rada nalazi se i metodički obrađena nastavna jedinica Zvučni valovi.

2. VALOVI

Prilikom svakodnevnog korištenja blagodati suvremenih tehnologija uglavnom se ne pitamo što nam omogućuje njihovo korištenje. Odgovor se krije u fizici - fundamentalnoj znanosti koja čini temelj cjelokupne suvremene tehnike i kulture te nam pokušava odgovoriti na brojna zanimljiva pitanja o razumijevanju prirode i svijeta u cjelini.

Pomoću mobitela razgovaramo, šaljemo fotografije, čitamo elektroničku poštu. Svakodnevno slušamo radio, gledamo televiziju, služimo se internetom. Sve to omogućuju nam elektromagnetski valovi, a prvi ih je u svojim pokusima eksperimentalno dobio H. Hertz krajem 19. stoljeća i tako potvrdio ispravnost Maxwelllove teorije.

11. veljače 2016. objavljena je vijest o otkriću gravitacijskih valova: nabora u prostor-vremenu koji se šire brzinom svjetlosti. Ova vijest izazvala je veliku pozornost fizičara i ljudi diljem svijeta jer je njome potvrđena Einsteinova opća teorija relativnosti te nam daje nove mogućnosti pri promatranju svemira i širenju naših spoznaja o svemiru.

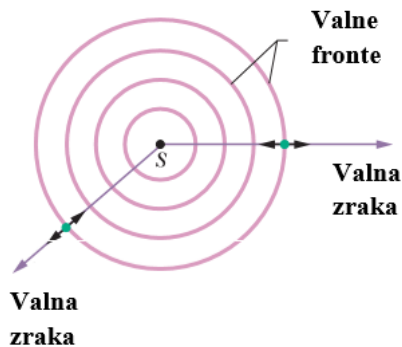
Većini ljudi omiljeni su valovi na vodi ili pak zvučni valovi jer upravo nastankom i širenjem zvučnih valova možemo slušati glazbu koja nas opušta i zabavlja.

Elektromagnetski, gravitacijski, zvučni valovi, valovi na vodi – svi ti valovi imaju neka zajednička svojstva, ali ipak nisu identični. Saznajmo što je to val, koje su vrste valova te u koju od tih vrsta spada zvuk i buka koja je glavna tema ovog rada.

2.1. Definicija i vrste valova

Val definiramo kao poremećaj koji se širi kroz prostor i vrijeme, a prati ga prijenos energije i količine gibanja. Treba primjetiti da se pri valnom gibanju iz jedne točke prostora u drugu ne prenosi tvar, nego energija i količina gibanja. Svako valno gibanje mora imati uzrok. Općenito, val se javlja kada se sustav poremeti iz stanja ravnoteže.

Pretpostavimo da je u početku elastično sredstvo¹ bilo u ravnoteži. Elastično sredstvo se opire kompresiji tj. dilataciji pa teži zauzeti početno stanje nakon što uzrok promjena počne djelovati. Kada na mali dio sredstva djeluje promjenjiva sila u kratkom vremenu, na tom mjestu dolazi do elastične deformacije sredstva koju nazivamo valni puls. Budući da je taj mali dio sredstva u dodiru sa susjednim djelovima sredstva, on će djelovati na njih i valni puls će se pomicati kroz sredstvo. Kažemo da će se valni puls ili poremećaj širiti sredstvom u obliku vala.



Slika 1. Širenje zvučnog vala iz izvora S kroz medij. Valne fronte su koncentrične sfere sa središtem u izvoru S, a valne zrake su okomite na njih. Dvosmjerne strelice naznačavaju da elementi medija titraju u smjeru valnih zraka. [61]

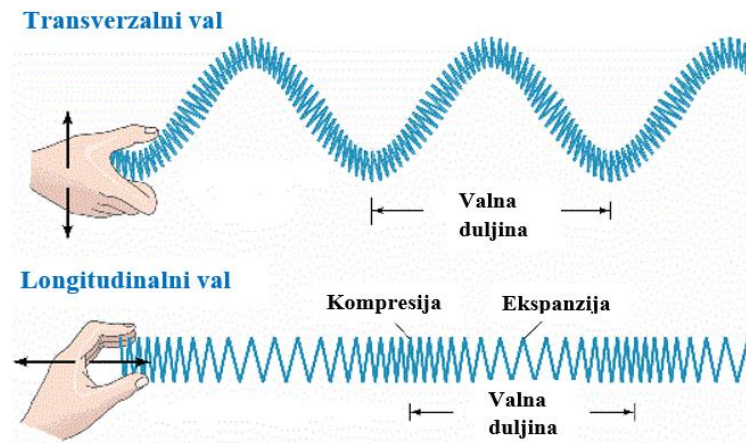
Postoje brojne podjele valova, ali glavna od njih je podjela valova na: [61]

- i. mehaničke valove
- ii. elektromagnetske valove
- iii. valove materije

Mehanički valovi su valovi za čije je širenje potrebno sredstvo: plin, tekućina ili krutina. Primjeri mehaničkih valova su: zvuk, valovi na vodi i seizmički valovi. Prema načinu širenja mehanički valovi dijele se na longitudinalne i transverzalne. Kod longitudinalnog vala čestice sredstva titraju u smjeru širenja vala, a kod transverznog okomito na smjer širenja vala, kao što možemo vidjeti na slici 2.

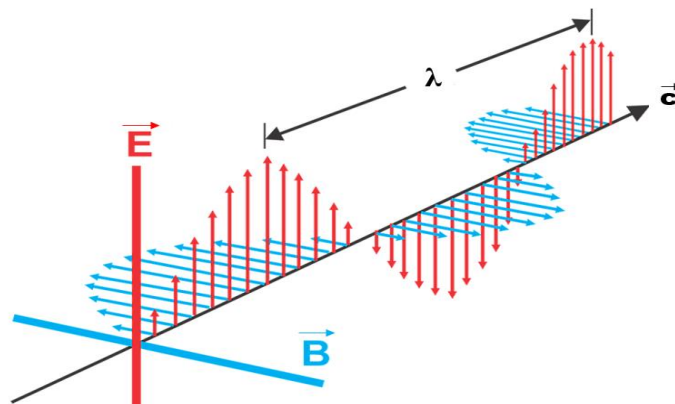
¹ Elastično sredstvo je bilo koja tvar u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju. U našem slučaju elastično sredstvo je zrak.

Transverzalni valovi mogući su samo u tijelima čvrstog stanja, a longitudinalni valovi se mogu širiti u sredstvima svih agregatnih stanja.



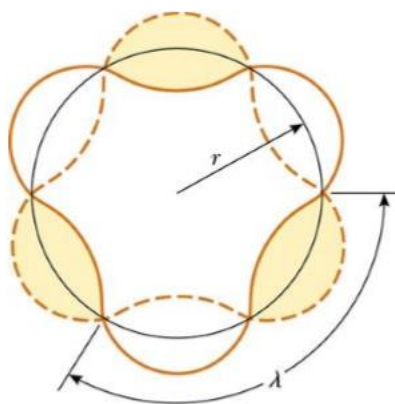
Slika 2. Transverzalni i longitudinalni val [59]

Elektromagnetskim valovima smo svakodnevno okruženi, a u njih spadaju: vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, infracrveno zračenje, radiovalovi i mikrovalovi. Njima za širenje nije potrebno sredstvo, pa tako valovi svjetlosti od zvijezda do nas putuju kroz vakuum. Svima im je zajednička karakteristika da se u vakuumu uvijek šire jednakom brzinom koja iznosi $c=299\,792\,458$ m/s.



Slika 3. Širenje elektromagnetskog vala pri čemu su električno polje \vec{E} , magnetsko polje \vec{B} i smjer širenja vala \vec{c} međusobno okomiti [9]

Valovi materije povezani su s elektronima, protonima i ostalim fundamentalnim česticama koji tvore materiju i otuda im potječe i naziv. Još se nazivaju i de Broglijevi valovi jer je Louise de Broglie 1924. pretpostavio da, s obzirom da zračenje ima i valna i čestična svojstva, možda i svi oblici materije imaju dualna svojstva.



Slika 4. De Broglijevi valovi u atomu vodika [6]

Zvuk sada možemo definirati kao longitudinalni mehanički val koji se može širiti u plinovima, tekućinama i krutinama.

3. POVIJESNI RAZVOJ AKUSTIKE

Akustika je grana fizike koja proučava načine nastanka te zakone širenja zvuka. S povijesnog stajališta, akustika je imala važnu ulogu u proučavanju elastičnih vibracija tijela, što je dovelo do osnovnih pojmova fizike: vibratornog stanja, širenja vala blizinskim djelovanjem, dužine vala, valne plohe, progresivnih valova, stacionarnih valova, longitudinalnih i transverzalnih valova. Pojmovi preuzeti iz akustike koriste se u Maxwellovoj teoriji elektromagnetizma, ali i u de Broglievoj valnoj mehanici. Fazna brzina, grupna brzina i brzina širenja energije su samo neki od pojmova valne mehanike koji su prvobitno bili uočeni u akustici. [47]

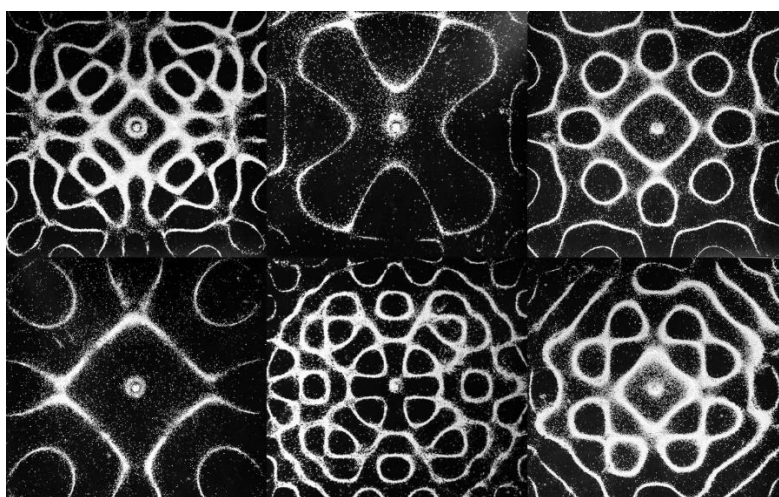
Već u antici raspravljalo se o zvučnim pojavama, a prvi značajniji pokus u tom vremenu izveo je grčki matematičar i filozof Pitagora (6. st. pr. Kr.). Izvedeći pokus sa žicama različitih duljina došao je do zaključka da će žice koje titraju proizvoditi ugodne (konsonantne) suzvuke ako se njihove duljine odnose kao brojevi: 12:9:8:6. Tako je na temelju pokusa postavio vezu između visine tona i duljine žice. Aristotel (4. st. pr. Kr.) je prvi objasnio širenje zvuka kroz zrak zgušnjavanjem i razrjeđivanjem zraka koje je izazvano izvorom zvuka. Također, znao je i da se zvuk reflektira kada naiđe na neku prepreku. [49, 51, 53, 54]

Sve do 17. stoljeća nije bilo značajnijeg napretka pri proučavanju zvuka. Tada su postavljeni temelji akustike, a bitnu ulogu u tome imao je francuski fizičar i matematičar Marin Mersenne. Prvi je definirao ton i dao točan opis instrumenata poznatih u njegovo doba. Istraživao je akustičke fenomene kao što su titranje napete žice, zvučna rezonancija i mjerio je brzinu zvuka, a rezultate svojih istraživanja objavio je u radu *Opća harmonija*. Za brzinu zvuka u zraku mjerenjem je dobio rezultat od 414 m/s. Nakon Mersennea koji je eksperimentalno mjerio brzinu zvuka, Isaac Newton je teorijski na osnovu zakona mehanike prvi izračunao brzinu zvuka u zraku. Njegov rezultat se nije slagao s rezultatima mjerenja jer je umjesto elastičnosti zraka uzeo tlak zraka bez da je uzeo u obzir adijabatsko širenje zraka. Zbog toga što eksperimentalni rezultati nisu bili u skladu s teorijskim, Newton je potaknuo daljnja mjerenja brzine zvuka. [49, 51, 53, 54]

Prvo uspješno mjerenje brzine zvuka u zraku izvršili su članovi Francuske akademije znanosti 1738. godine. Na jednom brijegu ispaljen je topovski hitac, a na drugom brijegu udaljenom 23 km od prvog mjereno je vrijeme između pojave bljeska i dolaska zvučnog praska. Dobivena srednja brzina zvuka

bila je 332 m/s, a pogriješka mjerenja potječe od neodređenosti temperature zraka na cijelom putu zvuka. [27, 54]

Osnivačem eksperimentalne akustike smatra se njemački fizičar Ernst Chladni. On je krajem 18. stoljeća otkrio longitudinalna titranja žica. Izvodio je pokuse u kojima je istraživao titranje ploča i promatrao zvučne slike koje su njemu u čast nazvane Chladnijeve figure². Mjerenjem je odredio brzinu zvuka u čvrstim tijelima u odnosu prema brzini zvuka u zraku, a rezultate je objavio u radu Akustika. [3, 13, 17]



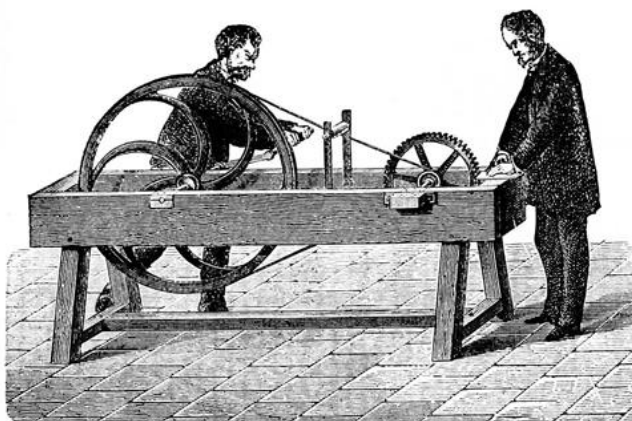
Slika 5. Chladnijeve figure [13]

Početak 19. stoljeća Pierre–Simon Laplace ispravlja Newtonovu formulu za određivanje brzine zvuka u zraku i uvodi adijabatski koeficijent zbog adijabatskog širenja zraka. Nekoliko godina kasnije Francois Arago mjerenjem dolazi do rezultata da brzina zvuka u zraku iznosi 331,2 m/s, što je u skladu s Laplaceovom formulom. [17]

Značajnu ulogu u razvoju akustike imao je i Thomas Young koji je pokusima prvi otkrio interferenciju zvučnih valova. Naime, do tada se smatralo da su zvučni valovi koji dolaze iz raznih smjerova neovisni i da ne djeluju jedni na druge. Rezultate pokusa objavio je početkom 19. stoljeća u radu

² Ukoliko ravnu ploču posutu pijeskom pobudimo gudalom ili na nju usmjerimo zvučne valove, na njoj će doći do rezonancija pri čemu će segmenti ploče titrati u različitim smjerovima. Na mjestima koja ne titraju nastaju čvorne linije i na njima se prikupljaju čestice pijeska tj. nastaju Chladnijeve figure.

Pokusi i istraživanja zvuka i svjetlosti. Felix Savart dolazi do zaključka da se zvuk na jednak način rasprostire i u tekućinama i čvrstim tijelima. Na osnovi pokusa pomoću uređaja nazvanog Savartov kotač³ utvrđuje da donja granica čujnosti ljudskog uha između 14 i 16 Hz, a gornja granica 24 000 Hz. [17, 54]



Slika 6. Savartov kotač [54]

Austrijski matematičar, fizičar i astronom Christian Johann Doppler sredinom 19. stoljeća otkriva pojavu promjene promatrane frekvencije vala zbog međusobnog udaljavanja ili približavanja izvora i promatrača koja po njemu nosi ime Dopplerov efekt. On pretpostavlja da ta pojava vrijedi i za svjetlosne valove pa predlaže mjerenje brzine gibanja zvijezde na osnovi promjene njene frekvencije. Njemački fizičar August Kundt primjenjuje metodu zvučnih slika s piljevinom kako bi odredio valnu duljinu zvučnih valova i brzinu zvuka. Georg Quincke je načinio uređaj za mjerenje valne duljine zvučnih valova, a njegov rad je bio temeljen na interferenciji zvučnih valova i danas je poznat pod nazivom Quinckeova cijev. [17]

Pokuse iz akustike izvodio je i Vinko Dvorak, prvi profesor fizike na Zagrebačkom sveučilištu. Istraživao je titranje zraka u cijevima i otkrio cirkulaciju – pojavu da se pokretna pločica nastoji postaviti okomito na smjer širenja zvučnih valova. Teorijski ju je objasnio Lord Rayleigh, a na tom

³ Uređaj koji je prvotno osmislio Robert Hooke. Radio je na principu da je kartica pričvršćena na rub kotača proizvodila tonove čija se visina mijenjala ovisno o brzini vrtnje kotača. Hooke je mehanizam ove vrste izradio pomoću mjedenih kotača 1681. kako bi pokazao Kraljevskom društvu kako se visina tona odnosi na frekvenciju. Savart je preuzeo Hookeove ideje i uspio izraditi kotače koji proizvode frekvencije do 24 kHz.

načelu načinjen je i uređaj za mjerenje jakosti zvuka koji je dobio naziv Dvorak – Rayleigheov radiometar. [17, 23]

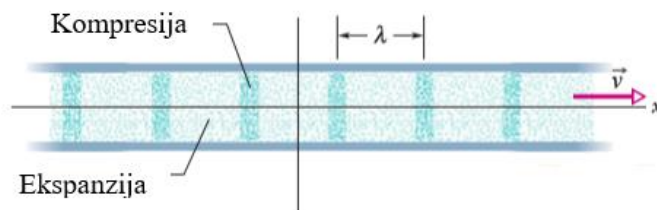
Kroz povijest su se dugo vremena zvučne pojave proučavale kroz glazbu. Fizičari su se stoljećima bavili određivanjem brzine, valne duljine i frekvencije zvučnih valova u različitim medijima. Značajnijem razvoju akustike uvelike je doprinio razvoj elektrotehnike pa se tako u 19. stoljeću pojavljuju prvi uređaji za mjerenje intenziteta zvuka.

Prvi uređaj za mjerenje razine glasnoće konstruirao je 1926. godine njemački fizičar Heinrich Barkhausen. Postupak se izvodio na usporedbi mjerenog zvuka s onim što ga je proizvodilo zujalo, a primao se preko slušalice. Regulatorom s podjeljcima od po 5 fona i opsegom od 0 do 100 fona ugađala se glasnoća tona proizvedenog u uređaju. Prvi je za zvučni tlak koristio logaritamsku skalu i uveo mjernu jedinicu za razinu glasnoće - fon. [27]

Danas postoje precizni mjerni instrumenti, normirane metode mjerenja zvuka te kriteriji za ocjenjivanje buke. Oni iz dana u dan sve više napreduju, a nagli razvoj tehnologije i računala omogućava brzo analiziranje i optimiziranje primjene različitih mjera i postupaka zvučne zaštite.

4. OSNOVNI POJMOVI AKUSTIKE

Riječ zvuk ima dva značenja: subjektivno ili psihološko i objektivno ili fizikalno. Prema subjektivnoj definiciji zvukom se naziva sve ono što zamjećujemo sluhom, dok s druge strane fizikalna definicija govori da je zvuk longitudinalni mehanički val koji se širi u plinovitim, tekućim i krutim elastičnim tvarima. Dakle, fizikalna definicija govori da se širenjem zvuka prenosi energija i onda kada nema uha koje bi je otkrilo. Širenje zvuka podrazumijeva titranje čestica fluida pa se zvuk može širiti samo u području gdje ima tvari i molekula, a ne giba se kroz vakuum. U ovom poglavlju opisat ćemo osnovne fizikalne veličine koje vežemo uz zvuk.



Slika 7. Zvučni val brzinom v putuje kroz cijev ispunjenu zrakom uz naizmjenična zgušnjenja i razrjeđenja zraka [61]

4.1. Brzina širenja zvuka

Iz iskustva znamo da prvo vidimo munju, a tek naknadno čujemo grom. Razlog tomu je što se zvuk širi puno sporije od svjetlosti. Naš zadatak je dobiti izraz za brzinu širenja zvuka i provjeriti o kojim fizikalnim veličinama ovisi brzina širenja zvuka.

Već smo napomenuli da je zvuk longitudinalni val i da se prilikom širenja zvuka elementi fluida pomiču u smjeru širenja zvuka. Valna jednadžba longitudinalnog vala za pomak fluida glasi [47, 50, 51]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

pri čemu je

- u veličina pomaka fluida pod djelovanjem tlaka zvučnog vala
- E/ρ kvadrat brzine širenja zvučnog vala

Iz toga slijedi:

$$v^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2)$$

Kada se učestale vibracije nekog tijela prenose na fluid, pomaci fluida uzrokuju promjene tlakova, a samim time i gustoća koje su popraćene promjenom temperatura koje se nemaju vremena izjednačiti. Radi se o izentropskim procesima⁴ u kojima se plin jače protivi promjeni tlaka pa mu je sukladno time Youngov modul elastičnosti E , γ puta veći. Takve procese proučavao je Laplace i pokazao je da vrijedi [47]:

$$E = \gamma p_0 \quad (3)$$

Koristeći relacije (2) i (3) dobivamo izraz za brzinu širenja longitudinalnog vala u nekom plinu

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}} \quad (4)$$

pri čemu je

⁴ Procesu kod kojih se mijenjaju stanja, a da pri tome nije došlo do izmjene topline.

- γ – adijabatski koeficijent koji se definiira kao omjer specifičnih toplinskih kapaciteta plina pri stalnom tlaku (c_p) i stalnom volumenu (c_v); za zrak iznosi 1,41
- p_0 - atmosferski tlak plina
- ρ - gustoća plina

Porastom nadmorske visine smanjuje se atmosferski tlak, ali i gustoća zraka. Zbog toga promjena atmosferskog tlaka neznatno utječe na brzinu širenja zvuka.

S druge strane, brzina širenja zvuka značajno ovisi o promjeni temperature. Tu ovisnost možemo prikazati koristeći jednadžbu stanja idealnog plina:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (5)$$

Iz gornjeg izraza dobijemo izraz za gustoću idealnog plina

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (6)$$

pa je zbog toga

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (7)$$

Ovisnost brzine zvuka o temperaturi možemo približno iskazati formulom [27, 32, 47] :

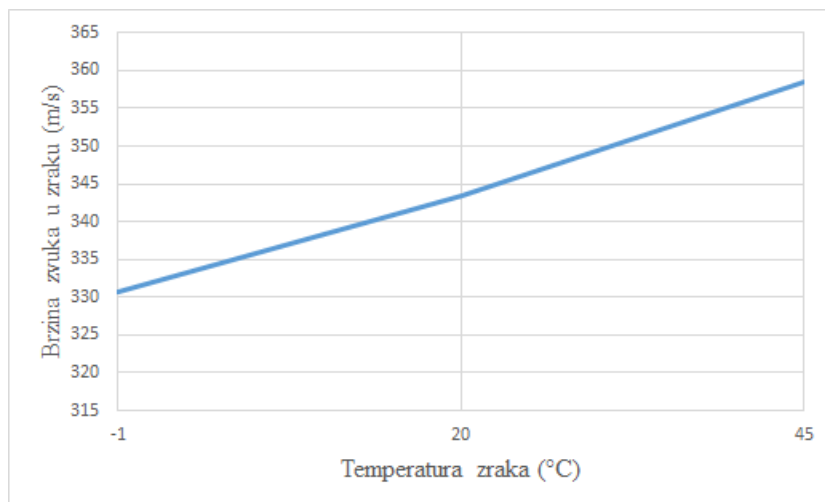
$$v = 331,4 + 0,6t \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8)$$

pri čemu je t temperatura zraka u °C.

Pri sobnoj temperaturi od 20°C brzina širenja zvuka iznosi 343,4 m/s.

Tablica 1. uz sliku 8.

Temperatura zraka (°C)	Brzina zvuka u zraku (m/s)
-1	330,8
20	343,4
45	358,4



Slika 8. Ovisnost brzine zvuka u zraku o temperaturi

Budući da se brzina širenja zvuka mijenja u ovisnosti s vrstom plina i temperaturom, na granici između dvaju sredstava s različitim brzinama širenja pojavljuju se refrakcija i refleksija.

Osim brzine širenja zvuka, važne veličine su i frekvencija i valna duljina zvučnog vala.

Frekvencijom nazivamo broj titraja u sekundi, a izražavamo je u hercima (Hz). Čovječje uho može čuti zvukove frekvencije od 20 Hz do 20 kHz⁵. Frekvencije niže od 20 Hz uho ne čuje kao tonove,

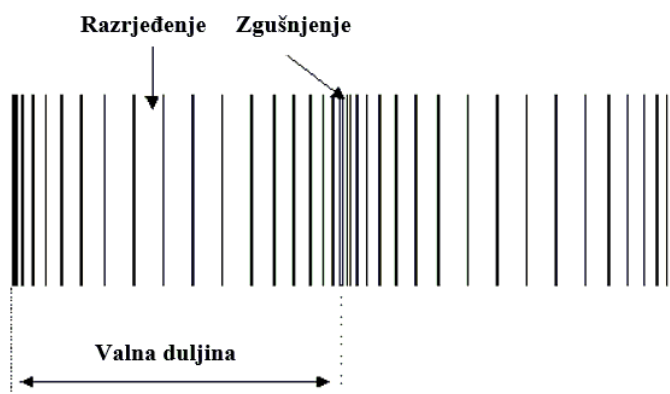
⁵ Sluh nekih životinja prilagođen je za slušanje zvuka mnogo viših frekvencija nego što ih može čuti čovjek. Tako pas reagira na frekvencije do 50 KHz, mačka do 65 kHz, šišmiš do 120 kHz, a dupin i leptir do 150 KHz.

nego ih osjeća kao potresanje. To područje frekvencija naziva se infrazvukom, a ultrazvukom nazivamo ono područje s frekvencijama iznad 20 kHz.

Valna duljina predstavlja razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjenja tj. razrjeđenja područja u kojem se zvuk širi. Izaz koji povezuje valnu duljinu, frekvenciju i brzinu širenja zvuka glasi:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (9)$$

Ukoliko u gornji izraz uvrstimo vrijednosti donje i gornje granice čujnosti možemo primjetiti da frekvenciji od 20 Hz pripada valna duljina od 17,15 m, a frekvenciji od 20 kHz valna duljina od 17,15 mm. Raspon valnih duljina je jednako kao i raspon frekvencija u akustičkom području vrlo velik.

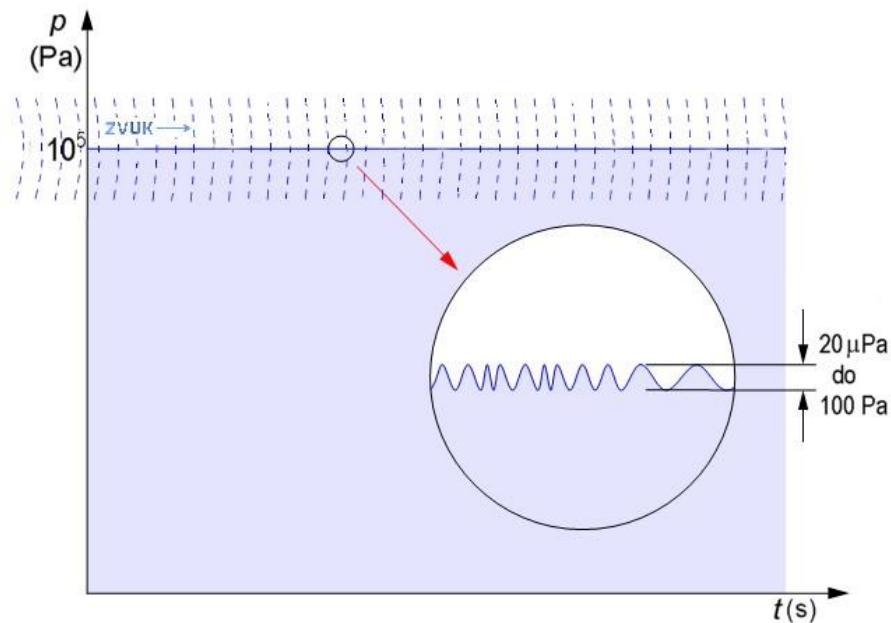


Slika 9. Valna duljina zvučnog vala je razmak između dva susjedna najveća zgušnjenja ili razrjeđenja [19]

4.2. Zvučni tlak

Jedna od osnovnih fizikalnih veličina koju trebamo upoznati prilikom mjerenja zvuka je zvučni tlak. Razlog tomu je što naše uho zvuk osjeća kao promjene tlaka. Zvučni tlak je jednostavno mjeriti, a iz podataka o zvučnom tlaku lako se mogu izračunati ostale veličine zvučnog polja.

Znamo da se zvuk u zraku prenosi kao longitudinalni val pri čemu čestice zraka titraju u smjeru širenja zvuka. Zbog pomaka čestica u zraku u slojevima zraka kojima prolazi val naizmjenično se izvodi kompresija i ekspanzija zračnog sloja. Pri kompresiji tlak zraka raste, a pri ekspanziji se smanji ispod atmosferskog tlaka. Zvučni tlak je izmjenični tlak koji se pri širenju zvučnih valova superponira atmosferskom tlaku na način da u jednoj poluperiodi ukupni tlak poraste iznad atmosferskog, a u idućoj se poluperiodi snizi ispod vrijednosti atmosferskog tlaka. Najveća razlika od atmosferskog tlaka naziva se amplituda zvučnog tlaka. [27, 30, 47, 55, 56]



Slika 10. Zvučni tlak je izmjenični tlak superponiran atmosferskom tlaku [55]

Općenito se pod zvučnim tlakom podrazumijeva efektivna vrijednost trenutnog zvučnog tlaka u određenom vremenskom intervalu [27, 30, 47, 55, 56]:

$$p_{ef} = p = \frac{1}{T} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} [p(t)]^2 dt} \quad (10)$$

pri čemu je

- $T = t_2 - t_1$ - vremenski interval integracije odnosno vrijeme usrednjivanja
- $p(t)$ - trenutna vrijednost zvučnog tlaka

Efektivni zvučni tlak jednak je amplitudi zvučnog tlaka p_m umanjenoj $\sqrt{2}$ puta. [27, 30, 47, 55, 56]

$$p = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

Ljudsko uho čuje najnižu amplitudu tlaka od oko $2 \cdot 10^{-5}$, a najviše može podnijeti amplitudu tlaka od oko 30 Pa. [51]

4.3. Zvučna energija

Progresivni valovi su svi valovi koji nisu stojni, a uz njih vežemo prijenos energije.

Ukoliko promatramo progresivni longitudinalni val u fluidu – zvuk, možemo uočiti da izvor zvuka daje energiju elementu fluida koji se zbog toga pomiče i prenosi energiju susjednom elementu. Za stvaranje vala u fluidu potrebna je energija pa stoga i longitudinalni val također prenosi energiju.

Dio komprimiranog ili dilatiranog fluida posjeduje potencijalnu energiju, a čestice fluida koje se gibaju kinetičku energiju. Dakle, možemo reći da se zvučnim valom brzinom zvuka prenosi mehanička energija.

Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu površine 1 m^2 postavljenu okomito na smjer širenja naziva se jakošću ili intenzitetom zvuka i za nju vrijedi:

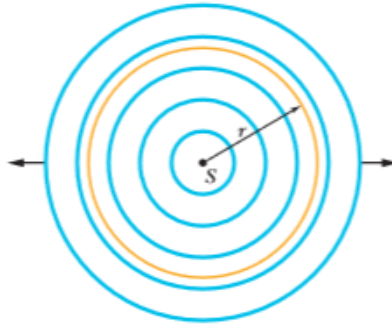
$$I = p \cdot v \quad (12)$$

pri čemu je

- p - zvučni tlak

- v - titrajna brzina čestica u smjeru širenja zvuka⁶

Zvučni val koji se iz točkastog izvora širi radijalno u svim smjerovima zove se kuglasti val.



Slika 11. Točkasti izvor zvuka koji emitira zvučne valove jednoliko u svim smjerovima, a oni prolaze kroz zamišljenu sferu radijusa r . [61]

Kod kuglastog širenja zvuka vrijedi:

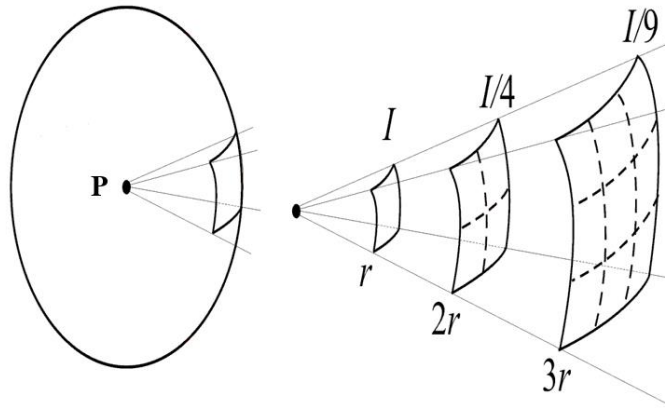
$$I = \frac{P}{4r^2\pi} \quad (13)$$

pri čemu je

- P – zvučna snaga izvora
- r – udaljenost od izvora zvuka

Iz formule (13) i slike 12. možemo vidjeti da intenzitet zvuka opada s kvadratom udaljenosti od izvora zvuka jer se zvučna energija izvora na duplo većoj udaljenosti raspodjeljuje na četiri puta većoj površini.

⁶ Titrajna brzina čestica zraka je malena; uz zvučni tlak od 200 μ bara (granični tlak koji još nije opasan za uho) titrajna brzina iznosi 5 cm/s. Usporedbe radi, vjetar brzine oko 100 cm/s osjećamo tek kao lagano strujanje.



Slika 12. Intenzitet zvuka opada s kvadratom udaljenosti pri kuglastom širenju zvuka [60]

Za zvučni tlak p i titrajnu brzinu v vrijedi:

$$p = \rho \cdot v_z \cdot v \quad (14)$$

pri čemu je

- ρ - gustoća fluida
- v_z - brzina zvuka
- $\rho \cdot v_z$ specifični akustički otpor⁷

Koristeći (12) i (14) izraz za intenzitet zvuka možemo napisati kao:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot v_z} \quad (15)$$

ili

$$I = v^2 \cdot \rho \cdot v_z \quad (16)$$

⁷ Za zrak specifični akustički otpor ima vrijednost 410 Ns/m³.

Ukoliko uvrstimo vrijednost specifičnog akustičkog otpora zraka dobijemo:

$$I = \frac{p^2}{410} = 2,44 * 10^{-3} p^2 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (17)$$

Treba napomenuti da energija zvučnog vala nije jednoliko raspoređena u prostoru. Ona je najveća na mjestima najvećeg tlaka i brzine, a jednaka je nuli na onim mjestima gdje su tlak i brzina jednaki nuli. Gustoća zvučne energije definira se kao vremenska srednja vrijednost zvučne energije po m^3 i dobiva se iz odnosa:

$$E = \frac{I}{v_z} \quad (18)$$

Za zrak onda vrijedi:

$$E = 7,1 * 10^{-6} p^2 \left[\frac{Ws}{m^2} \right] \quad (19)$$

Još jedna važna fizikalna velična je zvučna snaga. Zvučna snaga predstavlja zvučnu energiju koja u jednoj sekundi prostruji kroz plohu površine S postavljenu okomito na smjer širenja zvuka:

$$P = S \cdot p \cdot v = \frac{Sp^2}{\rho v_z} \quad (20)$$

Za zrak i tlak izražen u paskalima vrijedi:

$$P = 2,44 * 10^{-3} Sp^2 [W] \quad (21)$$

4.4. Razina zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage

Ljudsko uho registrira veliko područje zvučnih tlakova pa su omjeri zvučnih tlakova, a i zvučnih snaga vrlo veliki. Zvuk intenziteta 1 W/m^2 izaziva nelagodnost u uhu, dok je najmanji intenzitet zvuka koje ljudsko uho može čuti 10^{-12} W/m^2 . Ti intenziteti se odnose kao $10^{12} : 1$ što odgovara odnosu zvučnih tlakova $10^6 : 1$. Zbog tako velikih omjera i logaritamske karakteristike ljudskog uha, za prikazivanje akustičkih veličina praktično je koristiti logaritme omjera.

Logaritam odnosa dviju snaga izražava se u belima⁸. Iz praktičnih razloga za logaritamski odnos snaga koristimo deset puta manju jedinicu od bel, a ona se naziva decibel [dB]. Ako su I_1 i I_2 zvučni intenziteti, a n broj decibela koji prikazuje njihov odnos, tada možemo pisati:

$$n = 10 \log \frac{I_1}{I_2} \text{ [dB]} \quad (22)$$

Budući da je prema (17) intenzitet zvuka proporcionalan kvadratu zvučnog tlaka, odnosno prema (16) kvadratu titrajne brzine, za odnos zvučnih tlakova i titrajnih brzina broj decibela dobiva se prema formuli:

$$n = 20 \log \frac{p_1}{p_2} = 20 \log \frac{v_1}{v_2} \text{ [dB]} \quad (23)$$

Navedeni odnosi zvučnih intenziteta od $10^{12} : 1$ i zvučnih tlakova od $10^6 : 1$ iznose 120 dB. Možemo uočiti da je prednost korištenja logaritama omjera računanje s manjim brojevima. Drugi razlog je spomenuta logaritamska karakteristika ljudskog uha, o kojoj ćemo više saznati u idućim poglavljima.

Odnosi zvučnih intenziteta ili zvučnih tlakova ne omogućuju nam pronalazak njihovog iznosa, zbog toga su međunarodnim dogovorom akustičara uvedene referentne velične. Referentni zvučni tlak iznosi $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, a pripadajući referentni zvučni intenzitet 10^{-12} W/m^2 i oni predstavljaju zvučni tlak i zvučni intenzitet na pragu čujnosti čovjeka zdravog sluha na frekvenciji od 1000 Hz.

⁸ U čast izumitelja telefona, Grahama Bella (1847-1922).

Sukladno tome definiramo razinu zvučnog tlaka:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (24)$$

pri čemu je:

- p - promatrani zvučni tlak izražen u Pascalima
- $p_0 = 2 * 10^{-5} Pa$ – referentni zvučni tlak

Razina zvučnog intenziteta jednaka je:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad (25)$$

pri čemu je:

- $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ – referentni zvučni intenzitet

Koristeći relacije (24) i (25) možemo pokazati da su razine zvučnog tlaka i razine zvučnog intenziteta približno iste kada se zvuk širi u zraku, što će nam biti od velike pomoći pri mjerenju.

Opravdano je koristiti i razinu zvučne snage, a ona iznosi:

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_0} [dB] \quad (26)$$

pri čemu je

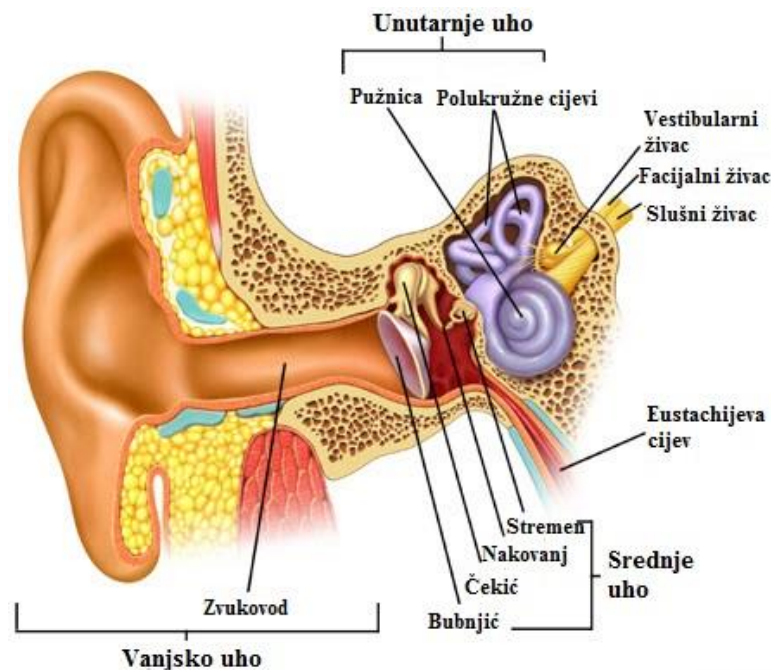
- $P_0 = 10^{-12} W$ – referentna zvučna snaga

5. GRAĐA UHA I SLUŠNI PROCES

Ljudsko uho je izuzetno osjetljiv prijemnik zvuka koji zvučnu energiju pretvara u mehaničku energiju, a mehaničku energiju u obliku električnog impulsa šalje do mozga, gdje nastaje svjesna percepcija zvuka. Primjetimo da na sličnom principu radi i mikrofoni – on također zvučnu energiju pretvara u mehaničku, a zatim u električnu energiju. No, ljudsko uho puno je više od običnog uređaja. Osim što je prijemnik zvuka, on je i selektivan frekvencijski analizator, određivač smjera zvučnog izvora te indikator glasnoće, visine i boje tona. [4, 27]

Kažemo da uho radi i kao selektivan frekvencijski analizator jer ima sposobnost razlučivanja različitih frekvencija zvučnog signala pri čemu nije jednako osjetljivo na sve frekvencije zvuka. Nadalje, uho nam omogućuje percepciju glasnoće zvuka detekcijom amplitude zvuka, visine zvuka detekcijom frekvencije zvuka i boje zvuka detekcijom različitih frekvencija od kojih se sastoji složeni zvuk. [1, 4, 46, 58]

Uho se sastoji od tri glavna dijela: vanjskog (*lat. auris externa*), srednjeg (*lat. auris media*) i unutarnjeg uha (*lat. auris interna*). Svaki od tih dijelova ima određenu ulogu u slušnom procesu.



Slika 13. Poprečni presjek ljudskog uha [12]

5.1. Vanjsko uho

Vanjsko uho sastoji se od ušne školjke (*lat. auricula*) i ušnog kanala ili zvukovoda (*lat. meatus acusticus externus*). Ušna školjka usmjerava zvuk do zvukovoda i zajedno s njim čini lijevak koji pojačava zvuk. Efekt pojačavanja lako možemo opaziti ukoliko savijen dlan prislonimo uz ušnu školjku. Do pojačanja zvuka dolazi zbog toga što ušna školjka zajedno sa zvukovodom čini rezonantni sustav. Naime, zvukovod možemo promatrati kao cijev zatvorenu na jednom kraju što omogućuje pojavu rezonancije za dolazne zvučne valove određenih frekvencija. Rezonantna frekvencija zvukovoda iznosi oko 3500 Hz, pa je u tom području moguće pojačanje zvučnog tlaka od oko 10 dB. Treba naglasiti da zvuk u vanjskom uhu putuje u obliku longitudinalnog vala kojeg prati kompresija i ekspanzija zraka odnosno rast i pad zvučnog tlaka (bez pretvorbe energije). Do pretvaranja energije mehaničkog vala u unutarnje vibracije dijelova srednjeg uha dolazi tek na granici vanjskog i srednjeg uha. U vanjskom uhu - zvukovodu se također nalaze dlačice okrenute prema van kako bi sprječile kukce u prilazu do bunjića i na taj način zaštitile uho.⁹ [1, 4, 14, 27, 55, 58]

5.2. Srednje uho

Srednje uho je šupljina ispunjena zrakom koju čine bubnjić (*lat. cavum tympani*) i tri slušne koščice: čekić (*lat. malleus*), nakovanj (*lat. incus*) i stremen (*lat. tapes*). Bubnjić je napeta, eliptična membrana s naborom na donjem kraju koji mu omogućava pokretljivost i titranje kada do njega dođe longitudinalni val popraćen zgušnjeljima i razrjeđenjima zraka. Prilikom zgušnjelja zraka bubnjić se pomiče prema unutra, a prilikom razrjeđenja prema van što znači da bubnjić titra frekvencijom zvučnog vala. Titranje bubnjića prenosi se na slušne koščice budući da je prva slušna koščica – čekić spojena sa sredinom bubnjića, a sve tri slušne koščice su međusobno povezane zglobnim ligamentima. Tako se titranje čekića dalje prenosi na nakovanj, a s nakovnja na stremen. Stremen je povezan s unutrašnjim uhom pa se tako zvučna energija primljena bubnjićem preko stremena prenosi na tekućinu unutrašnjeg uha. Važna zadaća slušnih koščica je da velik akustički otpor tekućine u unutarnjem uhu prilagodi malom akustičkom otporu zraka i tako omogući potpuniji prijenos zvučne energije. Ta

⁹ Opasnost od ulaska kukca u zvukovod je velika. Hodanje kukca po bubnjiću čuje se kao gruvanje topova što može dovesti do trajnog oštećenja sluha.

prilagodba postiže se povećanjem zvučnog tlaka u tekućini unutarnjeg uha koje nastaje zbog toga što je površina ovalnog prozorčića za koji je pričvršćen stremen dvadesetak puta manja od površine bubnjića.

Bitno je napomenuti da je srednje uho povezano s usnom šupljinom Eustachijevom cijevi. Ona je u normalnom položaju zatvorena, a otvara se samo prilikom zijevanja ili gutanja. Veza srednjeg uha s vanjskim prostorom putem Eustachijeve cijevi je značajna jer omogućava izjednačavanje unutarnjeg i vanjskog statičkog tlaka i tako sprječava oštećenje bubnjića. Brza promjena tlaka koja primjerice nastaje prilikom naglog spuštanja aviona, izaziva bol u uhu. Tu bol možemo ublažiti zijevanjem ili gutanjem jer će se tada Eustachijeva cijev otvoriti, a vanjski i unutarnji tlak izjednačiti. [1, 4, 27, 55, 58]

5.3. Unutarnje uho

Unutarnje uho, koje se zbog svoje složene građe naziva i labirint sastoji se od polukružne cijevi (*lat. canales semicirculares*), predvorja (*lat. vestibulum*) i pužnice (*lat. cochlea*). Polukružna cijev ne sudjeluje u slušnom procesu, nego služi za održavanje ravnoteže tijela. Pužnica je najsloženija konstrukcija cijelog ljudskog tijela, a po obliku je cijev savijena u spiralu nalik na puževu kućicu. Uzduž pužnice protežu se tri kanala odijeljena bazilarnom i Reissnerovom membranom između kojih se nalazi limfna tekućina. Iznad bazilarne membrane nalazi se Cortijev organ koji sadrži oko 23 500 osjetnih stanica (cilijarne stanice) iz kojih izlaze dlačice - cilije.

Cijelo unutarnje uho ispunjeno je limfnom tekućinom na koju se prenosi zvučna energija primljena preko bubnjića. Prijenos zvučne energije uzrokovat će titranje bazilarne membrane (savijanje membrane s početka prema kraju). Kako se savija bazilarna membrana, tako se i dlačice – cilije deformiraju na različite načine i zbog tog mehaničkog naprezanja u cilijarnim stanicama se stvara električni impuls koji podražuje slušni živac i putuje do mozga. Znanstvenici do danas nisu uspjeli objasniti kako mozak dekodira signale koje prima električnim impulsom i kako ih pretvara u slušni osjet. [1, 4, 27, 55, 58]

6. SVOJSTVA SLUHA

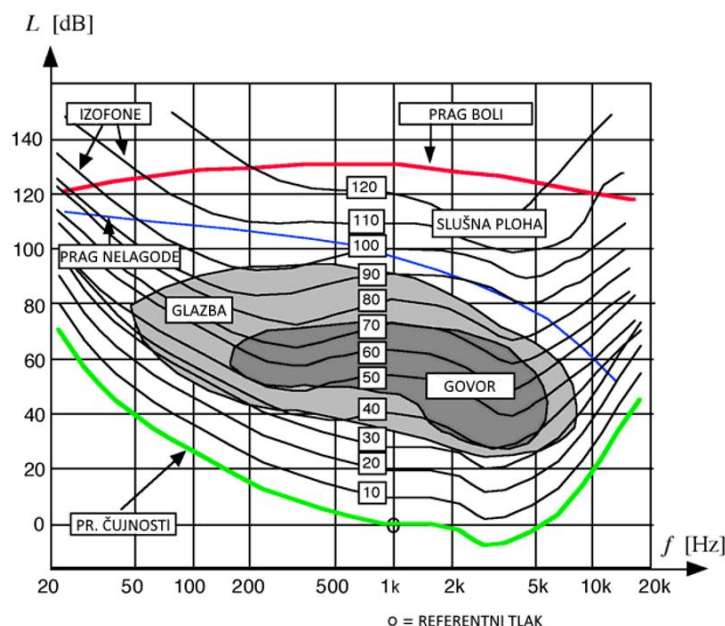
Do sada smo proučavali osnovne fizikalne veličine koje koristimo pri interpretaciji zvuka. Napomenuli smo da zvuk osim objektivnog ili fizikalnog značenja ima i subjektivno ili psihološko značenje. U ovom poglavlju bavit ćemo se svojstvima sluha – pragom čujnosti i boli i definirat ćemo subjektivnu veličinu zvuka koje vežemo uz slušni osjet - glasnoću.

6.1. Prag čujnosti i prag boli

Odnos između objektivnog iznosa fizikalnih veličina kojima zvuk djeluje na čovjeka i subjektivne percepcije zvuka ljudskim uhom nije niti malo jednostavan. Priroda je ljudsko uho učinila specifičnim pa je ono različito osjetljivo na zvukove različitih frekvencija, ali i na zvukove istih frekvencija, a različitih intenziteta¹⁰. To znači da se osjetljivost uha na zvuk mijenja u ovisnosti o frekvenciji zvuka i zvučnom tlaku kojeg smo priveli uhu pri određenoj frekvenciji.

Mjerenje osjetljivosti sluha provodi se tako da se intenzitet sinusnog tona određene frekvencije povećava do vrijednosti pri kojoj slušatelj može percipirati zvuk. Tada kažemo da je dosegnut prag čujnosti. Ukoliko intenzitet zvuka nastavimo dalje povećavati do stanja kada slušatelj ne osjeća zvuk, nego bol u ušima kažemo da je dosegnut prag boli. Ponavljajući pokuse za različite frekvencije u području čujnosti možemo konstruirati slušnu plohu. Slušna ploha prikazana na slici 14. je područje u grafu koje prikazuje ovisnost slušnog osjeta o frekvenciji zvuka i razini zvučnog tlaka, a omeđena je krivuljom praga čujnosti s donje strane i krivuljom praga boli s gornje strane. Iz slike 14. također možemo vidjeti da je ljudsko uho najosjetljivije na zvukove frekvencija između 2000 i 5000 Hz. [16, 24, 28]

¹⁰ Promjenom intenziteta zvuka mijenja se zvučni tlak. Uho zvuk osjeća kao promjenu zvučnog tlaka pa se zbog toga promjenom intenziteta mijenja i osjet zvuka.



Slika 14. Slušna ploha ljudskog uha koja prikazuje ovisnost slušnog osjeta o frekvenciji zvuka i razini zvučnog tlaka omeđena pragom čujnosti i bola s ucrtanim izofonama [18]

Svakoj čujnoj frekvenciji odgovara najniži zvučni tlak koji uho može čuti, ali i najviši tlak koji smijemo privesti uhu, a da se ono ne ošteti. Ti zvučni tlakovi se mijenjaju s frekvencijom na način prikazan na slici 14. Iz nje vidimo da bi se na frekvenciji od 30 Hz došlo do praga čujnosti, uhu trebamo dovesti zvučni tlak koji je za 60 dB viši od onoga na pragu čujnosti frekvencije od 1000 Hz.

Prag čujnosti je različit za različite osobe pa je krivulja praga čujnosti individualna. On ovisi o karakteristikama slušača (npr. životna dob), načinima mjerenja razine zvučnog tlaka¹¹, smjeru upada zvuka i o tome sluša li se s oba uha ili samo jednim [27]. Prag čujnosti se i kod iste osobe mijenja od sata do sata pa se tako nakon boravka u okruženju s visokim razinama buke prag čujnosti privremeno diže. Različitost krivulja koje prikazuju ovisnost praga čujnosti o frekvenciji ukazala je potrebu da se odabere ona koja će poslužiti kao norma. To je učinjeno tako da je za prag čujnosti na frekvenciji 1000 Hz odabran zvučni intenzitet od 10^{-12} W/m^2 , što odgovara zvučnom tlaku od 20 μPa .

Niti prag bola nije jednak kod svih ljudi zdrava sluha, nego prilično varira, ali ne toliko kao prag čujnosti.

¹¹ Mjerenja u zvukovodu ili u slobodnom zvučnom polju.

6.2. Glasnoća

Prag čujnosti značajno ovisi o frekvenciji zvuka. Na različitim frekvencijama potrebno je uhu privesti različite zvučne tlakove kako bi ih uho čulo kao ton. To u principu vrijedi i za zvučne tlakove iznad praga čujnosti. Općenito, dva tona jednakih zvučnih tlakova, ali različitih frekvencija neće imati jednaku glasnoću. Važno je razlikovati zvučni tlak kao fizikalno svojstvo i glasnoću kao psihički osjet zvuka. Glasnoća je veličina uvedena za ocjenu subjektivne percepcije zvuka, a mjerna jedinica za glasnoću je son.

Glasnoća nekog zvuka se u akustici mjeri uspoređujući je s glasnoćom tona frekvencije od 1000 Hz. Pri tome je za izražavanje razine zvučnog tlaka uzeta decibelska skala sa nultom vrijednošću referentnog zvučnog tlaka od 20 μPa . Mijenjajući zvučni tlak na frekvenciji 1000 Hz na temelju slušnog uspoređivanja može se opaziti zvuk jednake glasnoće. Takvom usporedbom dobit ćemo da na razini zvučnog tlaka od 80 dB iznad referentne razine mjereni zvuk ima istu glasnoću kao ton frekvencije od 1000 Hz. Tada kažemo da mjereni zvuk ima razinu glasnoće od 80 fona¹². Dakle, na frekvenciji od 1000 Hz fonska skala je jednaka decibelskoj (Slika 14.). Za frekvencije iznad i ispod 1000 Hz te dvije skale nisu iste pa se tako mjerenjem može utvrditi uz koji zvučni tlak se dobiva glasnoća jednaka onoj koju ima ton frekvencije 1000 Hz. Rezultati mjerenja pomoću čistih tonova za cijelu slušnu plohu između praga čujnosti i praga boli prikazuju krivulje jednake razine glasnoće ili izofone ucrtane na slici 14.

Razina glasnoće izražena u fonima nije prirodna jer se za dvostruko povećanje glasnoće, razina glasnoće povisi za oko 10 dB pa ona ne izražava izravno dojam glasnoće. Zato je za subjektivnu ocjenu osjeta zvuka uveden pojam glasnoće čija je mjerna jedinica son. Son izražava brojčanu vrijednost glasnoće zvuka ili buke razmjerne subjektivnom osjetu slušatelja.

Matematički izraz koji prikazuje ovisnost između glasnoće S u sonima i razine glasnoće A glasi:

$$S = 2^{0,1(A-40)} \quad (27)$$

Što je približno:

¹² Fon je mjerna jedinica za razinu glasnoće.

$$\log S = 0,03(\Lambda - 40) \quad (28)$$

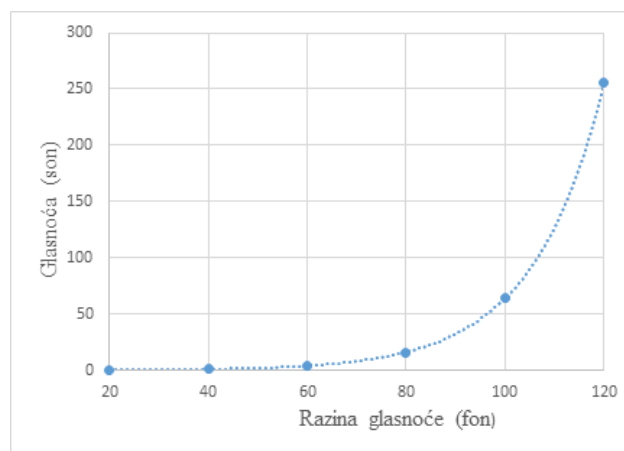
Glasnoću od 1 sona ima zvuk čija je razina glasnoće 40 fona.

Sada vidimo da su važne osobine sluha vezane upravo za logaritamski odnos, što je jedan od glavnih razloga zašto smo prilikom opisivanja odnosa zvučnih intenziteta i tlakova koristili logaritme omjera.

Gornji izrazi su aproksimacije laboratoriskih ispitivanja za određivanje glasnoće u praktičnoj primjeni, a vrijede za područje od 20 do 120 fona. Ukoliko navedene razine glasnoće od 20-120 fona uvrstimo u izraz $S = 2^{0,1(\Lambda - 40)}$, možemo grafički prikazati odnos između razine glasnoće i glasnoće.

Tablica 2. uz sliku 15.

Razina glasnoće [fon]	Glasnoća [son]
20	0,25
40	1
60	4
80	16
100	64
120	256



Slika 15. Glasnoća prikazana u ovisnosti o razini glasnoće.

Kako bi se dobila jasnija predodžba o skali glasnoće, tablica 3. prikazuje poveznicu fizikalnih veličina: zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i razine zvučnog tlaka sa stupnjem glasnoće.

Tablica 3. Razine zvučnog tlaka, pripadajući zvučni tlakovi i intenziteti uz tipične primjere i stupnjeve glasnoće [27]

Stupanj glasnoće	Razina zvučnog tlaka [dB]	Zvučni tlak [Pa]	Zvučni intenzitet [W/m ²]	Tipični primjeri
Bolno	140	200	10 ²	Mlazni avion (50 m)
	130	63,2	10	Prag bola
Zaglušujuće	120	20	1	Prag nelagode
	110	6,3	10 ⁻¹	Motorna pila (1 m)
Vrlo glasno	100	2	10 ⁻²	Disco (1 m od zvučnika)
	90	0,63	10 ⁻³	Kamion (10 m)
Glasno	80	0,2	10 ⁻⁴	Prometnica u špici (5 m)
	70	0,063	10 ⁻⁵	Usisavač (1 m)
Umjereno glasno	60	0,02	10 ⁻⁶	Običan razgovor (1 m)
	50	0,0003	10 ⁻⁷	Dnevna soba
Tiho	40	0,002	10 ⁻⁸	Tiha knjižnica
	30	0,00063	10 ⁻⁹	Spavaonica noću
Vrlo tiho	20	0,0002	10 ⁻¹⁰	TV studio
	10	0,000063	10 ⁻¹¹	Padajući list
	0	0,00002	10 ⁻¹²	Prag sluha

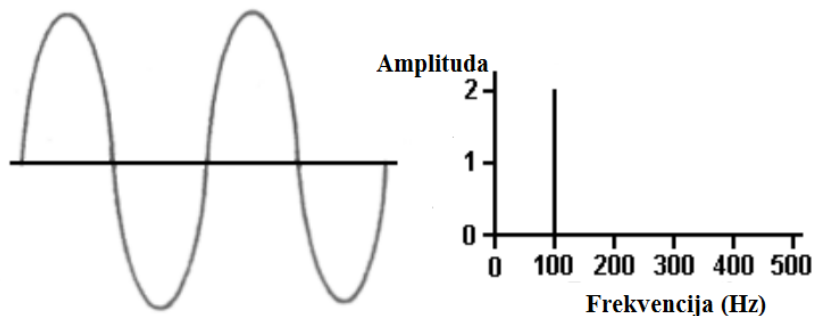
7. ANALIZA ZVUČNOG SPEKTRA

7.1. Zvučni spektar

Prilikom proučavanja zvučnih pojava, nužno je poznavati vremensku karakteristiku zvučnog tlaka. Razlaganjem vremenske funkcije zvučnog tlaka po frekvenciji dobivamo zvučni spektar. Zvučni spektar je, dakle prikaz veličine komponenata složenog zvuka (zvučnog tlaka ili zvučne snage) kao funkcije frekvencije.

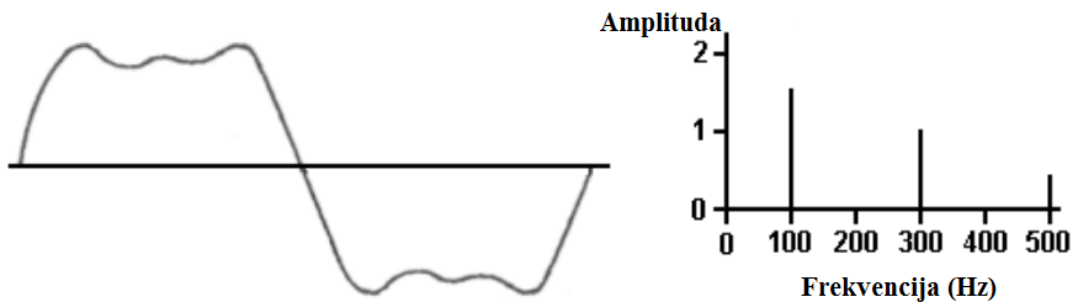
Prema obliku zvučnog spektra razlikujemo tri vrste zvuka: čisti ton, složeni ton i šum.

Čisti ton je jednostavno sinusoidno tj. harmonijsko titranje sa diskretnim, linijskim spektrom na određenoj frekvenciji. Ovakvi tonovi gotovo uopće ne nastaju u prirodi, ali se koriste u mjerne svrhe u elektroakustici.



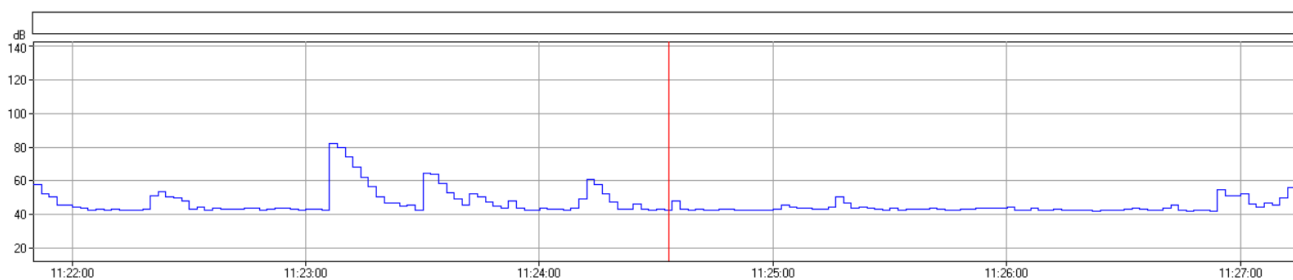
Slika 16. Čisti ton ima sinusoidan zvučni tlak, a zvučni spektar čistog tona je vertikalna linija. [34]

Složeni ton predstavlja periodično neharmonijsko titranje. Budući da svaku periodičnu funkciju razvojem u Fourierov red možemo rastaviti na niz jednostavnih funkcija poznatih svojstava, tako i složeni ton možemo rastaviti na čiste tonove: osnovni ton i harmonike. Frekvencija harmonika uvijek je cjelobrojni višekratnik frekvencije osnovnog tona. Amplituda osnovnog tona ne mora uvijek biti veća od amplitude harmonika. Visinu tona određuje osnovni ton, dok tonsku boju nekog glazbala određuje broj i jakost harmonika.

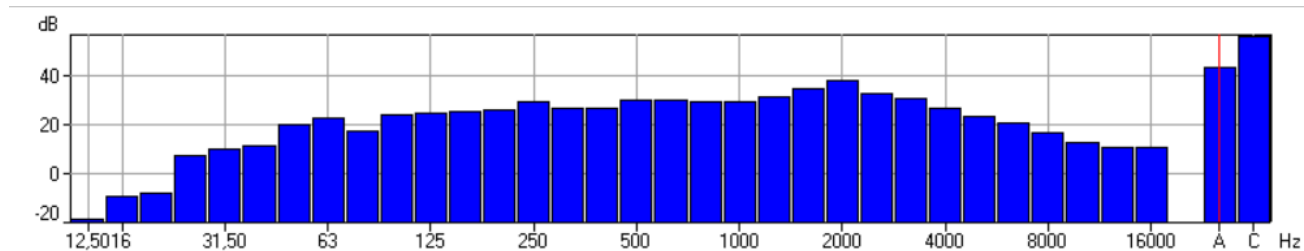


Slika 17. Složeni ton ima nesinusoidan periodičan zvučni tlak, a zvučni spektar složenog tona su vertikalne linije različitih amplituda i frekvencija. [34]

Šum je nepravilno, neperiodično titranje u kojem nema stalnih frekvencija ni stalnih amplituda, a uzrokovan je djelovanjem poremećaja čija je vremenska raspodjela slučajna. Spektar šuma je, za razliku od spektra čistog ili složenog tona, kontinuiran što znači da spektralne komponente (pojedini tonovi) gusto ispunjavaju cijelo jedno frekvencijsko područje.



Slika 18. Vremenski prikaz šuma



Slika 19. Kontinuirani spektar šuma

7.2. Fourierova analiza

Već smo napomenuli da u prirodi čisti tonovi gotovo i ne postoje, nego se zvuk pojavljuje kao neharmoničko titranje različitih frekvencija. Kako bismo mogli analizirati takav zvuk, koristimo se Fourierovom analizom. Fourierova analiza nam omogućuje da svaku periodičnu funkciju napišemo kao sumu sinusa različitih amplituda, faza i frekvencija. Takva suma se onda naziva Fourierov red.

Fourierovi redovi se mogu definirati kao razvoj proizvoljne periodične funkcije $f(x)$ po sinusima i kosinusima. Ukoliko je funkcija f^{13} periodična na intervalu duljine 2π , tada ju možemo aproksimirati trigonometrijskim redom oblika [20, 36]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx + \phi_n) \quad (29)$$

pri čemu je:

- $\frac{a_0}{2}$ - član za translaciju funkcije duž y-osi
- a_n – amplituda
- ϕ_n – faza sinusne funkcije frekvencije n

Primjenom adicijske formule za sinus, gornju relaciju možemo napisati i u sljedećem obliku:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx) \cos \phi_n + b_n \cos(nx) \sin \phi_n \quad (30)$$

Budući da $\cos \phi_n$ i $\sin \phi_n$ ne ovise o varijabli x i n možemo definirati nove koeficijente a_n i b_n koji će implicitno sadržavati i ϕ_n . Tada formula (30) poprima oblik:

¹³ U našem slučaju periodična funkcija je zvučni val.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(nx) + b_n \cos(nx) \quad (31)$$

Sada se traženje Fourierova reda svodi na traženje koeficijenata a_n i b_n koji predstavljaju amplitude funkcija pri čemu ne moramo promatrati fazu pojedine funkcije. Njihovo glavno svojstvo je da pri računanju daju najmanju pogrešku.

Prilikom spektralne analize složenih zvučnih valova prikladno je koristiti brzu Fourierovu transformaciju čiji je rezultat skup kompleksnih brojeva. Pri tome redni broj kompleksnog broja u skupu predstavlja frekvenciju, a zbroj kvadrata realnog i imaginarnog dijela kompleksnog broja elongaciju. [20, 36]

7.3. Frekvencijski pojasevi

Ranije smo napomenuli da ljudsko uho može čuti zvukove u području frekvencija od 20 Hz do 20 kHz. To područje frekvencija je moguće podijeliti na frekvencijske intervale ili pojaseve, a u praksi se podjela postiže elektroničkim filtrima ugrađenim u zvukomjere koji odbacuju sve frekvencije izvan odabranog frekvencijskog intervala. Tako spektralnu analizu zvuka možemo provoditi u užim ili širim frekvencijskim pojasevima.

Osnovna analiza zvuka provodi se u pojasevima širine jedne oktave ili terce. Oktava je jedinica logaritamskoga frekvencijskog intervala. Predstavlja frekvencijski pojas kod kojega je omjer graničnih frekvencija 1 : 2 što znači da je najviša frekvencija dvostruko veća od najniže frekvencije. Terca je jedna trećina oktave tj. frekvencijski pojas s omjerom graničnih frekvencija 1 : $2^{1/3}$.

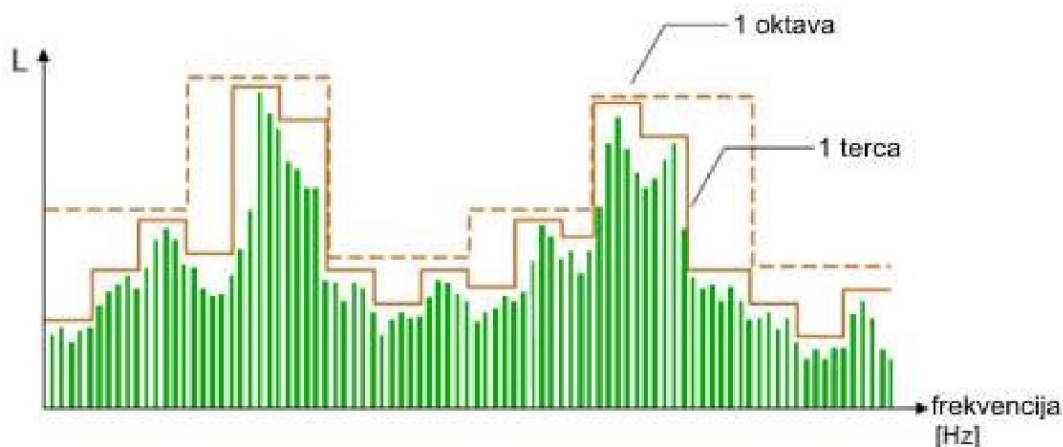
Oktavni i terčni pojasevi označuju se njihovim središnjim frekvencijama koje su normirane. Središnja frekvencija nekog frekvencijskog pojasa iznosi [25, 32, 55]:

$$f_s = \sqrt{f_d \cdot f_g} \quad (32)$$

pri čemu je

- f_d – donja granična frekvencija
- f_g – gornja granična frekvencija

Ukoliko znamo vrijednost središnje frekvencije, možemo izračunati donju i gornju granicu oktave i terce. Donju granicu oktave određujemo kao $f_s \cdot 2^{-1/2}$, a gornju granicu kao $f_s \cdot 2^{1/2}$. Donju granicu terce sukladno definiciji izračunamo kao $f_s \cdot 2^{-1/6}$, a gornju granicu kao $f_s \cdot 2^{1/6}$.



Slika 20. Ovisnost detaljnosti prikaza frekvencijske analize zvuka o odabranom filtru [25]

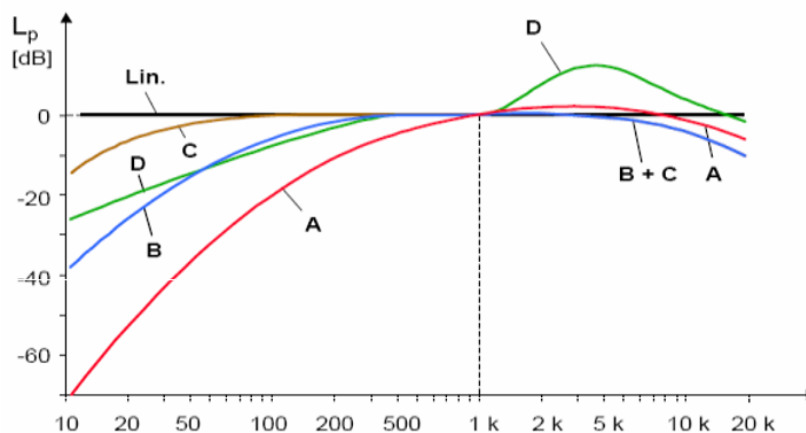
Relativna širina frekvencijskog pojasa u odnosu prema središnjoj frekvenciji kod oktavne analize iznosi 70,7 %, a kod tercne 23,3%. Obje vrste analize su dosta grube, ali su dovoljne za dobivanje općenite slike o buci.

U smislu frekvencija uho ima logaritamski odziv pa se zbog toga pri analizi zvuka primjenjuju oktavni ili terni frekvencijski pojasevi čija širina nije konstantna, nego se povećava porastom frekvencije. Kao osnova za ocjenjivanje buke s obzirom na zaštitu čovjeka uzet je terni spektar i od njega polaze sve praktične metode analize i kriteriji. [55]

7.4. Korekcijski filtri

Zvukomjer je objektivni mjerac razine glasnoće koji se sastoji od mikrofona, pojačala, filtera i pokaznog instrumenta. Mjerenjem razine zvučnog tlaka ne možemo dobiti veličinu koja uzima u obzir karakteristiku ljudskog sluha i slaže se sa subjektivnom ocjenom razine glasnoće šuma ili buke. Zbog toga zvukomjeri imaju ugrađene elektroničke krugove čija se osjetljivost mijenja s frekvencijom na isti način kao i osjetljivost ljudskog uha i tako oni stimuliraju krivulje jednake razine glasnoće – izofone. Zvukomjer sa linearnom skalom podrazumjeva bi da čovjek sve frekvencije čuje jednako i zbog toga se uvode korekcijski filtri A, B, C i D. [2, 4, 32, 55]

Frekvencijske karakteristike filtera prikazujemo krivuljama A, B, i C na slici 21. Izvorno su te karakteristike bile približne frekvencijske karakteristike razine glasnoće što ih uho ima pri razinama zvučnih tlakova od redom 40, 70 i 100 dB [10, 35]. U novije doba filtarskim karakteristikama A, B i C dodana je i karakteristika D kojom se jače ističe područje visokih frekvencija između 1,5 i 10 kHz pa se njome mjeri buka zrakoplova. Čovjek je osjetljiviji na zvukove visokih frekvencija pa im onda i pri mjerenju treba pridati veću pozornost.

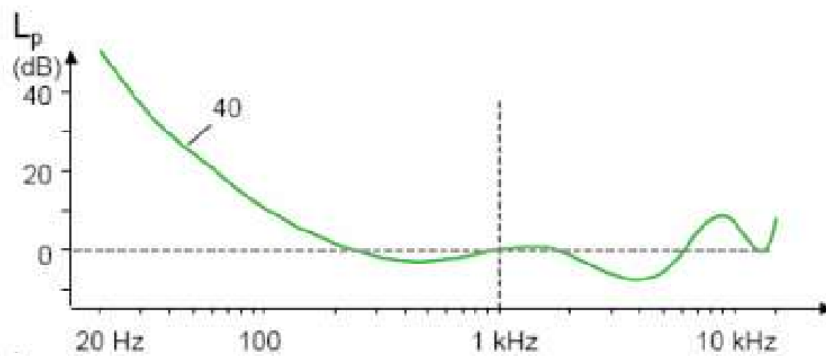


Slika 21. Filtarske karakteristike zvukomjera [4]

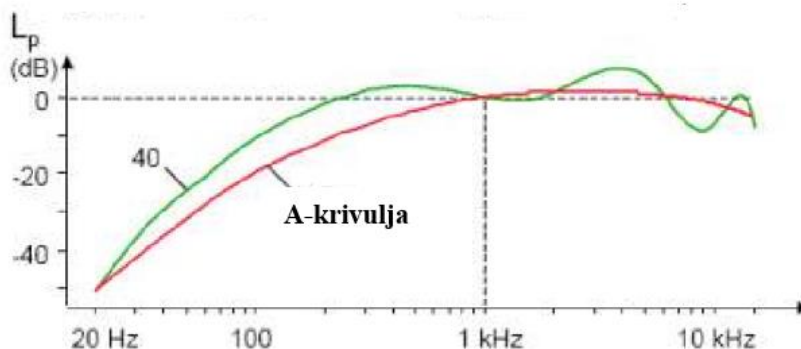
S vremenom se pokazalo da mjerenje razine buke uz uporabu karakteristike A daje rezultate koji se često slažu sa subjektivnom ocjenom razine glasnoće šuma ili buke. Danas se zakonska regulativa

kojom se određuju najviše dopštene razine buke zasniva na izmjerenoj razini zvuka pomoću A filtra i ona je široko prihvaćena. Dakle, za izražavanje buke jednim brojem rabi se razina koja se dobila filtriranjem akustičkog signala uz pomoć A-filtra i takva jednobrojna veličina naziva se vrednovana razina zvučnog tlaka A ili A-razina buke. Označava se kao L_A , a izražava u dB(A).

A krivulju prikazanu na slici 23. dobijemo kada aproksimiramo invertiranu izofonu za 40 dB normaliziranu pri referentnom zvučnom tlaku od $20 \mu\text{Pa}$ i frekvenciji 1 kHz. Invertirane izofone zapravo su krivulje koje pokazuju ovisnost razine glasnoće o frekvenciji uz konstantne razine zvučnih tlakova.



Slika 22. Krivulja jednake razine glasnoće za 40 dB normalizirana pri referentnom zvučnom tlaku i frekvenciji od 1 kHz [18]



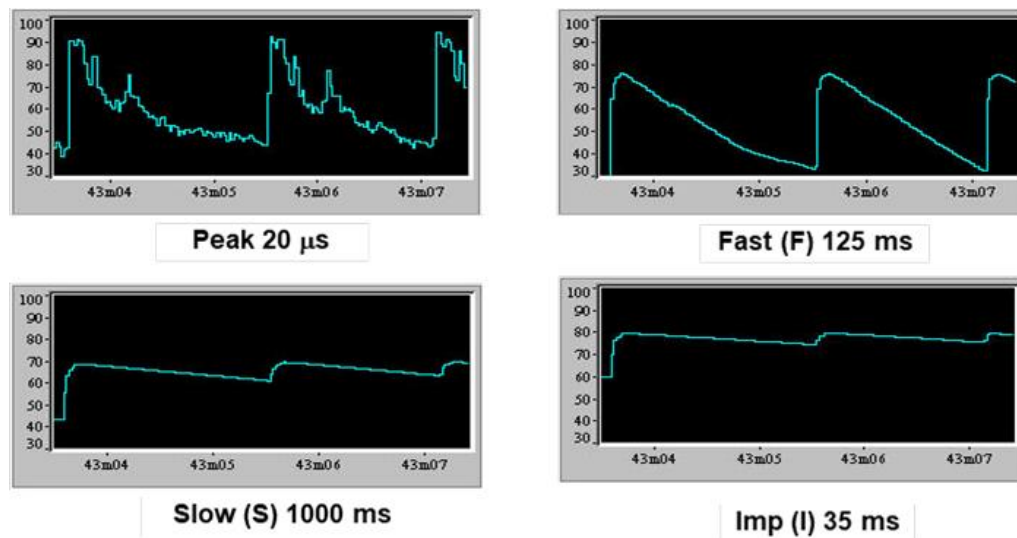
Slika 23. Invertirana krivulja jednake razine glasnoće za 40 dB i uspoređena sa A-krivuljom [18]

Unatoč prihvaćanju A filtra pri mjerenju subjektivne razine buke, stručnjaci ističu kako A filtar nije pogodan za mjerenje buke niskih frekvencija (20-200 Hz) jer podcjenjuje utjecaj buke niske frekvencije na smetenost i razumljivost govora. [33, 57] Nadalje, istraživanja pokazuju kako buka niskih frekvencija povećava razinu kortizola - pokazatelja stresa [48], povećava krvni tlak i rizik od kardiovaskularnih bolesti [5].

A filtar je prvobitno izrađen za mjerenja zvuka na srednjim frekvencijama za razinu zvučnog tlaka oko 40 dB. Krivulja A se dobro slaže sa ljudskom percepcijom sluha u području srednjih frekvencija, a u području frekvencija nižih od 1000 Hz samo za razine zvučnog tlaka između 50 i 70 dB, za niže razine od 50 dB krivulja prikazuje uho osjetljivijim nego što zaista jest, a za razine više od 70 dB prikazuje uho prikazuje manje osjetljivim. [10]

Većina buke koju mjerimo ima promjenjivu razinu. Zbog što preciznijeg mjerenja tih promjena osim frekvencijskog vrednovanja, definirano je i vremensko vrednovanje tj. brzina detekcije odziva koje može biti: brzo (F), sporo (S) i impulsno (I). Vremensko vrednovanje brzo (F) ima nizak stupanj tromosti pa brzo može pratiti iznenadne promjene zvučnog tlaka za razliku od vremenskog vrednovanja sporo (S) koja ima visok stupanj tromosti. Efektivna vremenska konstanta usrednjavanja porasta i opadanja odzivne karakteristike brzo (F) iznosi 125 ms, a odzivne karakteristike sporo (S) 1000 ms. Odzivne karakteristike brzo (F) i sporo (S) nisu namijenjene za jako promjenjivu i tranzijentnu buku. Za odzivnu karakteristiku impulsno (I) efektivna vremenska konstanta usrednjavanja porasta iznosi 35 ms, a opadanja i 1,5 s. Impulsno vremensko vrednovanje (I) ima malu vremensku konstantu porasta i veliku vremensku konstantu opadanja jer uz takvo vrednovanje dobijemo vrijednost razine buke kakvu opaža ljudsko uho za buku kratkog trajanja i visokog intenziteta. Osim vremenskog vrednovanja brzo (F), sporo (S) i impulsno (I), postoji još i Peak vremensko vrednovanje za koje efektivna vremenska konstanta usrednjavanja porasta i opadanja iznosi manje od 100 μ s. Ono se koristi pri mjerenju stvarnih vršnih vrijednosti impulsne buke.

Ukoliko u obradi nije drugačije navedeno, smatra se da se radi o frekvencijskom vrednovanju A, a vremenskom vrednovanju F. [32, 55, 62]



Slika 24. Prikaz razlika između pojedinih vremenskih vrednovanja na primjeru pucnja pištolja [55]

7.5. Statistički percentili i ekvivalentna razina buke

Velike promjene razine buke u vremenu zahtjevaju provođenje statističke analize i određivanje statističkih percentila: L_1 , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{90} , L_{95} , L_{99} . To su statističke veličine koje izražavaju koliko posto vremena je tijekom mjerenja neka razina buke prekoračena pri čemu postotak označava broj u indeksu. Posebno su bitne dvije veličine: L_1 koja prikazuje srednju vrijednost najviših (vršnih) razina buke i L_{95} koja karakterizira osnovnu razinu buke. Promjene razine buke grafički možemo prikazati statističkom i kumulativnom razdiobom kao na slici 25.



Slika 25. Kumulativna i statistička razdioba promjenjive razine buke i statistički percentili

Kumulativna razdioba nam pokazuje kolika je vjerojatnost da će razina buke poprimiti vrijednost veću ili jednaku od neke pojedinačne vrijednosti. Tako iz slike možemo zaključiti da je vjerojatnost da je razina buke poprimila vrijednost veću ili jednaku od 41 dB 100%, dok je vjerojatnost da je razina buke poprimila vrijednost veću ili jednaku od 44 dB otprilike 10%.

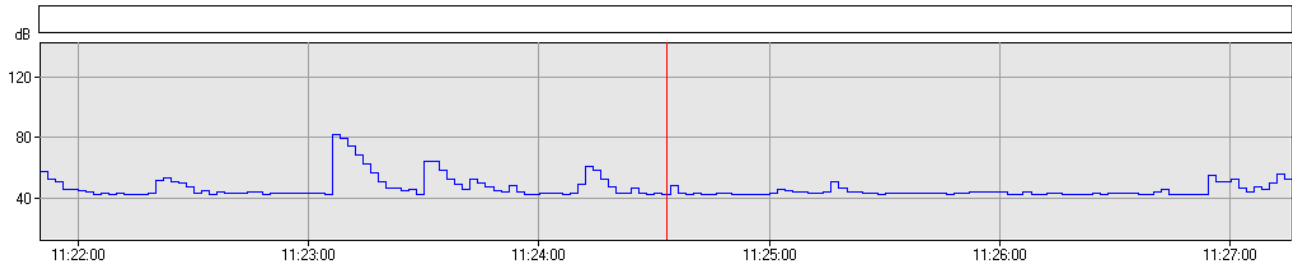
Najvažnija veličina za izražavanje vremenski promjenjive buke, a koja se temelji na statističkoj analizi promjenjive buke naziva se ekvivalentna razina buke. To je ona razina stalne buke koja bi tijekom određenog vremena imala jednak utjecaj na čovjeka kao i promatrana promjenjiva buka.

Ekvivalentna razina buke definira se kao A-razina buke izražena u dB(A) izrazom [55]:

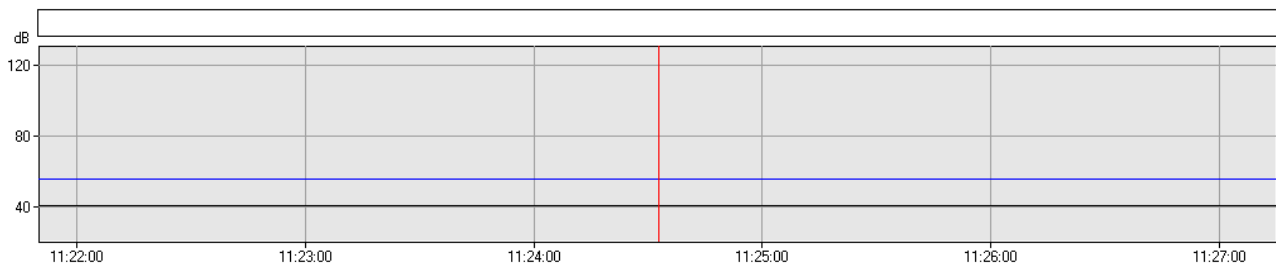
$$L_{Aeq} = \frac{q}{\log 2} \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{\log 2}{q} L_A(t)} dt \right) \quad (33)$$

pri čemu je

- q – parametar ekvivalencije ili raspolavljanja koji određuje koliko je dopušteno povišenje razine buke ako se vrijeme djelovanja buke smanji na pola
- T – vrijeme mjerenja ili referentno vrijeme
- $L_A(t)$ – vremenska funkcija promjenjive razine A



Slika 26. Vremenski prikaz promjenjive buke



Slika 27. Ekvivalentna razina buke temeljena na analizi promjenjive buke sa slike 26

Osim ekvivalentne razine buke, definira se još i najviša L_{Amax} i najniža razina buke L_{Amin} kao najveća i najmanja trenutna vrijednost frekvencijski vrednovane promjenjive razine buke u dB(A) unutar određenog vremenskog intervala. Za izražavanje najviših i vršnih razina promjenjive i impulsne buke, osim vrednovanja A, upotrebljava se i frekvencijsko vrednovanje C (L_{Cmax} i $L_{C,peak}$) u dB(C) ili se najviša i vršna razina izražavaju kao najviša i vršna vrijednost nevrednovanoga zvučnog tlaka (L_{pmax} i $L_{p, peak}$) u dB(Lin) [55].

Treba primjetiti da vršna razina buke nije ista kao i najviša razina buke L_{Amax} . Vršna razina buke predstavlja stvarnu maksimalnu vrijednost zvučne razine s linearnim frekvencijskim vrednovanjem ili s C frekvencijskim vrednovanjem, uz primjenu Peak vremenskog vrednovanja. Za čisti ton, vršna razina buke bit će 3 dB iznad najviše razine buke. Za složene tonove i šumove razlika u vrijednostima ovih dvaju veličina može biti velika i vrijednost vršne razine ne može se izračunati poznavajući vrijednost najviše razine buke, nego se ona utvrđuje statističkim principima.

8. BUKA I NJEN UTJECAJ NA LJUDE

Buka se općenito definira kao nepoželjan zvuk. Tako su primjerice govor i glazba ugodan zvuk za one koji ih žele slušati, dok su drugima kada spavaju ili razgovaraju nepoželjni zvukovi ili buka. Danas se buka smatra jednim od najvećih zagađivača okoliša [21], a istraživanja pokazuju da čak 25% Europljana pati od poremećenog fizičkog, mentalnog i bihevioralnog zdravlja zbog povećanje buke [2].

Uobičajena podjela djelovanja buke na ljude je [55]: djelovanje buke na osjetilo sluha (auralno djelovanje) i djelovanje buke na cijeli organizam (ekstraauralno djelovanje). Auralno djelovanje odnosi se na oštećenje slušnog organa. Svjetska zdravstvena organizacija upozorava da je čak 16% osoba odrasle dobi izgubilo sluh zbog izloženosti buci na radnom mjestu [45]. Ekstraauralno djelovanje izražava se utjecajem na organe i tjelesne sustave (npr. živčani, krvožilni ili hormonski sustav) te utjecajem na čovjekovo funkcioniranje i obavljanje posla (umni rad, koncentraciju, pozornost, odmor i san). Posljedice djelovanja buke na ljude mogu biti: naglušost i gluhoća, stres, umor i smanjenje radne sposobnosti, ometanje komunikacije, psihičke reakcije te ometanje odmora i sna.

S obzirom na razine štetnosti, buku možemo podijeliti u četiri stupnja štetnosti [28]:

- i. 30 – 55 dB(A) – područje psihološkog djelovanja (radnici postaju umorni i razdražljivi)
- ii. 55 – 85 dB(A) – područje ozbiljnih psiholoških i fizioloških smetnji (radnici postaju razdražljivi, psihički labilni te im se smanjuje motivacija i koncentracija)
- iii. 85 – 120 dB(A) – područje oštećenja sluha (dolazi do oštećenja sluha, naglušosti ili potpune gluhoće zbog izloženosti buci za vrijeme cijelog radnog vremena)
- iv. iznad 120 dB(A) – područje akutnog oštećenja sluha

Mijović naglašava kako razina buke preko 60 dB(A) može neizravno utjecati na podraživanje živčanog sustava [38]. Osim na živčani sustav, buka djeluje i na probavni i hormonski sustav što rezultira povišenjem krvnog tlaka, poremećajem rada probavnih organa, sniženjem vidnog polja te endokrinološkim i metaboličkim poremećajima [29].

Kao osnova za ocjenjivanje i normiranje buke prihvaćena je već spomenuta i objašnjena A-razina buke L_A u dB(A). Osobine buke koje su bitne prilikom proučavanja utjecaja buke na ljude su: razina

buke, frekvencijski sastav, ritam i trajanje. Opseg oštećenja ljudskog sluha osim nabrojanog ovisi još i o životnoj dobi radnika, nekim bolestima, te kolektivnim i individualnim zaštitnim mjerama.[50] Iako bukom najčešće smatramo nepoželjni zvuk koji čujemo, smetnje izazivaju i zvukovi frekvencije ispod i iznad čujnog spektra pa tako postoji i infrazvučna i ultrazvučna buka. Općenito, periodična buka više smeta čovjeku, nego trajna buka. Trajna buka niske razine glasnoće također ometa intelektualni rad. [27]

Najviše dopuštene razine buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave određene su Pravilnikom o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave kojeg je donio ministar zdravstva i socijalne skrbi 2004. godine i Pravilnikom o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu kojeg je donio ministar rada, gospodarstva i poduzetništva 2008. godine. [40, 43]

U tablici 4. prikazane su najviše dopuštene ekvivalentne razine buke u zatvorenim prostorijama posebne namjene.

Tablica 4. Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke u pojedinim prostorijama [40]

Namjena prostora	Najviša dopuštena ekvivalentna razina buke <i>L_{A,eq}</i> u dB(A)
Koncertne dvorane, kazališta i slične prostorije	25
Kina, čitaonice, izložbene prostorije, predavaonice, učionice i slične prostorije	35

Pravilnikom o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu regulirane su najviše dopuštene ekvivalentne razine buke koju na radnom mjestu stvaraju proizvodni i neproizvodni izvori buke. Najviše dopuštene razine se razlikuju za različite poslove, a ona je najniža za najzahtjevnije umne poslove koji zahtjevaju veliku usredotočenost. [43]

Tablica 5. Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke za pojedine poslove [43]

Opis posla	Najviša dopuštena ekvivalentna razina buke $L_{A,eq}$ u dB(A)	
	(a) ¹⁴	(b) ¹⁵
Najzahtjevniji umni rad, vrlo velika usredotočenost, rad vezan za veliku odgovornost, najsloženiji poslovi upravljanja i rukovođenja	45	40
Pretežno umni rad koji zahtijeva usredotočenost, kreativno razmišljanje, dugoročne odluke istraživanje, projektiranje, komuniciranje sa skupinom ljudi	50	40
Zahtjevniji uredski poslovi, liječničke ordinacije, dvorane za sastanke, školska nastava, neposredno govorno i/ili telefonsko komuniciranje	55	45
Manje zahtjevni uredski poslovi, pretežno rutinski umni rad koji zahtijeva usredotočenje ili neposredno govorno i/ili telefonsko komuniciranje, komunikacijske centrale	60	50
Manje zahtjevni i uglavnom mehanizirani uredski poslovi, prodaja, vrlo zahtjevno upravljanje sustavima, fizički rad koji zahtijeva veliku pozornost i usredotočenost, zahtjevni poslovi montaže	65	55
Pretežno mehanizirani uredski poslovi, zahtjevno upravljanje sustavima, upravljačke kabine, fizički rad koji zahtijeva stalnu usredotočenost, rad koji zahtijeva nadzor sluhom, rad koji se obavlja na temelju zvučnih signala	70	60
Manje zahtjevni fizički poslovi koji zahtijevaju usredotočenost i oprez, manje zahtjevno upravljanje sustavima	75	65
Pretežno rutinski fizički rad sa zahtjevom na točnost, praćenje okoline slušanjem	80	65

¹⁴ Razina buke na radnom mjestu koja potječe od proizvodnih izvora

¹⁵ Razina buke na radnom mjestu koja potječe od neproizvodnih izvora (ventilacija, klimatizacija, promet i dr.)

Osim Pravilnika o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave i Pravilnika o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu, na snazi su i Zakon o zaštiti od buke, Pravilnik o uvjetima glede prostora, opreme i zaposlenika pravnih osoba koje obavljaju stručne poslove zaštite od buke te Pravilnik o djelatnostima za koje je potrebno utvrditi provedbu mjera za zaštitu od buke. Zakonom o zaštiti od buke utvrđuju se mjere koje trebaju biti provedene s ciljem izbjegavanja, sprječavanja ili smanjenja štetnih učinaka buke u okolišu na zdravlje ljudi. Pravilnik o uvjetima glede prostora, opreme i zaposlenika pravnih osoba koje obavljaju stručne poslove zaštite od buke propisuju se uvjeti vezani uz prostor, opremu i zaposlenike koje moraju ispunjavati pravne osobe za obavljanje stručnih poslova zaštite od buke, određuju se stručni poslovi zaštite od buke te utvrđuje stručni nadzor nad pravnim osobama koje obavljaju stručne poslove zaštite od buke. Pravilnikom o djelatnostima za koje je potrebno utvrditi provedbu mjera za zaštitu od buke određuju se djelatnosti za koje je potrebno utvrditi provedbu mjera za zaštitu od buke, te postupak i način utvrđivanja tih uvjeta. [40, 41, 42, 43, 44]

9. MJERENJE BUKE ZVUKOMJEROM

Mjerenje buke na Odjelu za fiziku izvršeno je zvukomjerom Bruel & Kjaer, tip 2250L. Zvukomjer je u vlasništvu „Zavoda za unapređivanje sigurnosti d.d.“ iz Osijeka. Uređaj je pogodan za primjenu u zaštiti na radu i kod mjerenja buke okoliša te zadovoljava najnovije standarde i propise o mjerenju buke. Kao i svaki zvukomjer, sastoji se od osnovnih dijelova: mikrofona, mjernog pojačala, filtra za frekvencijsko vrednovanje, kvadratnog i vršnog detektora (ispravljača), integracijskog sklopa (za usrednjivanje signala), sklopa za vremensko vrednovanje („FAST“, „SLOW“, „IMPULSE“) i pokazivača. U osnovni komplet zvukomjera ubrajaju se i dodaci za mikrofona – štitnik od vjetra kako bi se smanjio šum zbog turbulencije na mikrofona te oktavni i terčni filtarski pojasevi.



Slika 28. Zvukomjer proizvođača Bruel & Kjaer

Na pokazivaču zvukomjera odmah smo mogli očitati vrijednosti veličina: L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} te vidjeti zvučni signal prikazan u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

Mjerenja su rađena 5. svibnja 2017. na devet različitih lokacija na prvom katu Odjela za fiziku te još u kantini (10), na ulazu (11) i u dvorištu Odjela za fiziku (12) kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. Tlocrt 1. kata Odjela za fiziku

Prilikom mjerenja buke, trebalo je paziti na koju udaljenost od izvora buke postaviti zvukomjer. Ta udaljenost određena je izrazom [55]

$$r \geq 1,4 D_{max} \quad (34)$$

pri čemu je

- r – udaljenost od izvora
- D_{max} – najveća dimenzija izvora

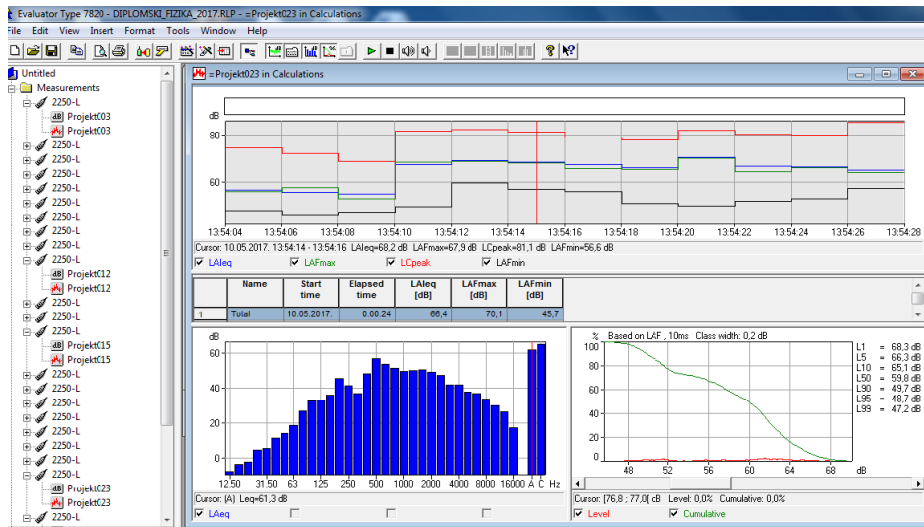
Naime, realni izvori buke koji imaju konačne dimenzije na toj se udaljenosti smatraju točkastima.

Mikrofon kojim se mjeri razina buke treba biti postavljen na stalak visine 1,2 – 1,5 m. Prilikom mjerenja buke u zatvorenim prostorijama, zvukomjer se postavlja na udaljenosti minimalno 1 m od prozora, a minimalno 0,5 m od zida. Ukoliko mjerimo razinu buke u vanjskom prostoru, zvukomjer se postavlja minimalno 0,5 m ispred otvorenog prozora. [41, 55]



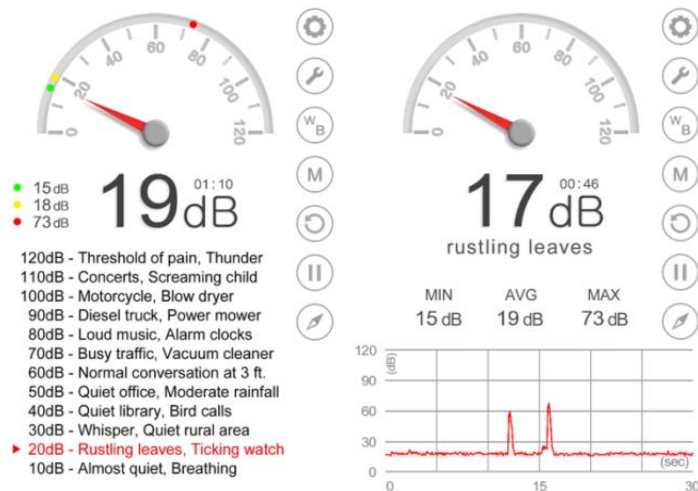
Slika 30. Postavljanje zvukomjera i mjerenje razine intenziteta zvuka

Rezultati svih mjerenja pohranjeni su na zvukomjer, a pomoću USB kabela izvršen je prijenos podataka na računalo. Koristeći program Evaluator Type 7820 mogla sam pristupiti rezultatima mjerenja i analizirati ih.



Slika 31. Program Evaluators Type 7820

Paralelno s mjerenjem razine buke zvukomjerom, izvršeno je i mjernje razine buke mobilnim uređajem pomoću aplikacije „Sound Meter“ odnosno „Mjerač zvuka“. Na njemu nam je prikazana najmanja, najveća srednja vrijednost razine buke te vremenski prikaz buke.



Slika 32. Aplikacija „Sound Meter“

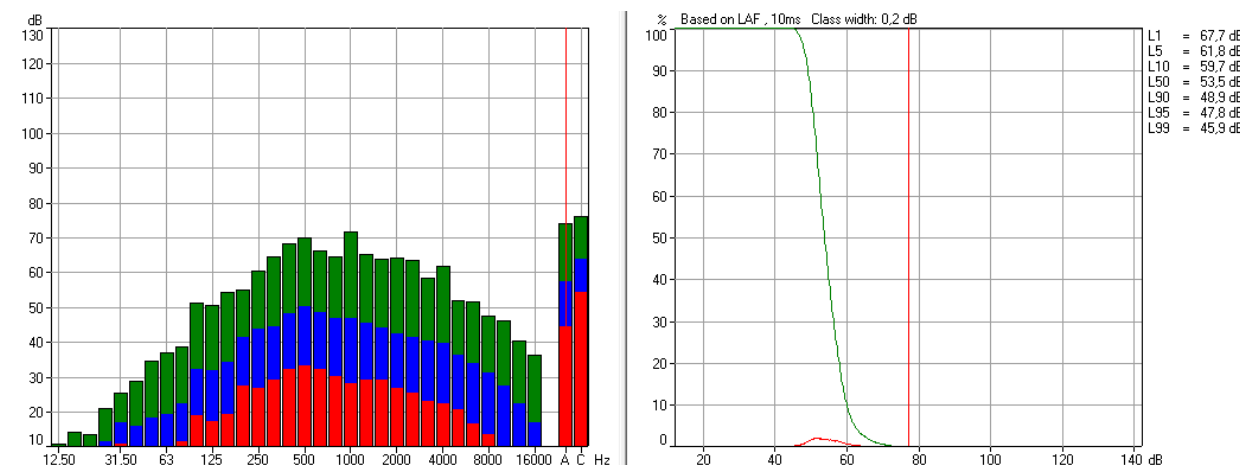
9.1. Mjerenje buke u hodniku

9.1.1. Mjerenje buke u hodniku zvukomjerom

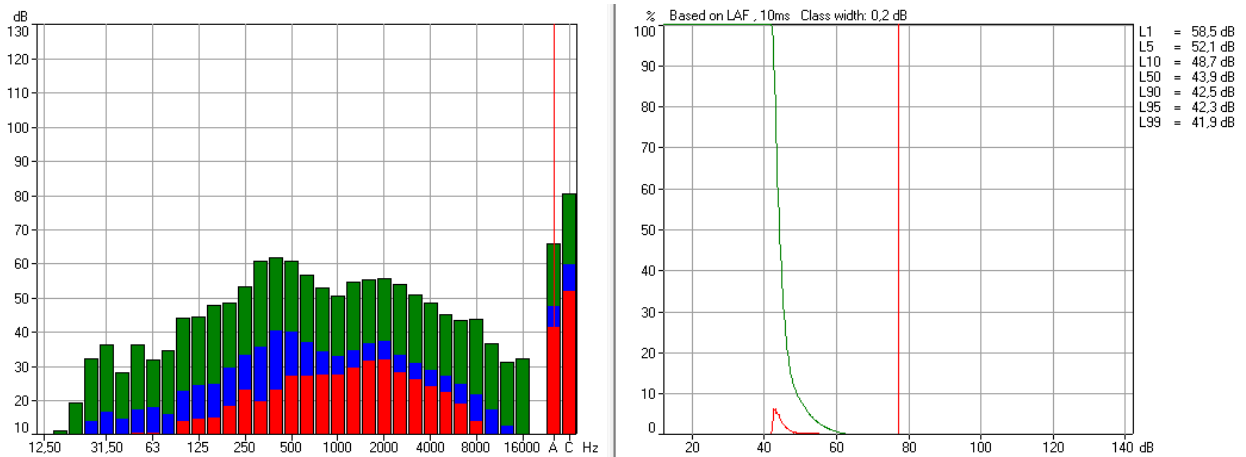
Tablica 6. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u hodniku na tri različite lokacije

Lokacija	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
1	05:02	57,2	74,0	44,2
2	05:02	47,4	65,8	41,3
9	05:03	51,9	71,1	43,6

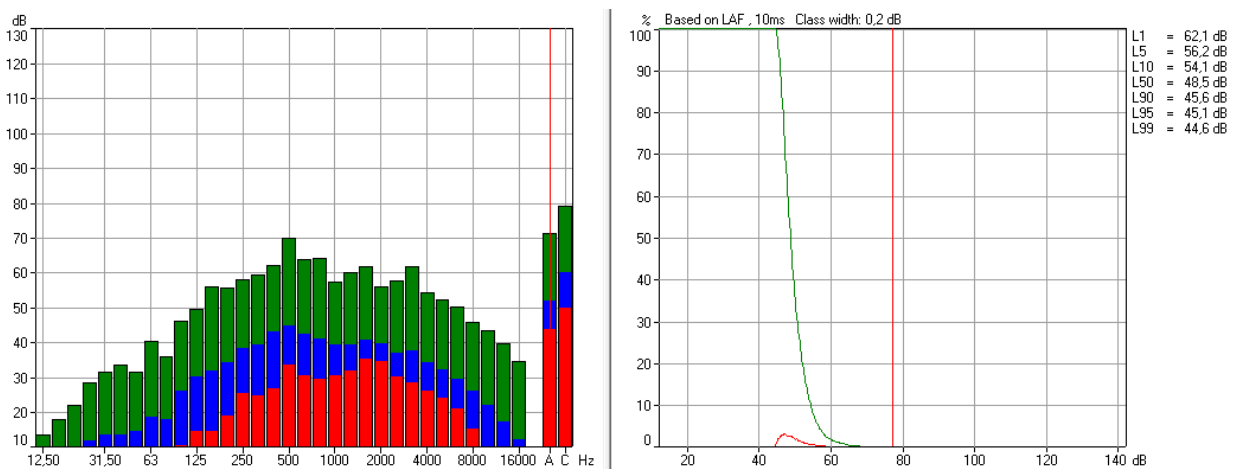
Najviše vrijednosti ekvivalentne razine buke L_{Aeq} , kao i L_{AFmax} i L_{AFmin} izmjerene su na lokaciji 1, u hodniku blizu stepenica gdje je u to vrijeme prolazio veći broj studenata koji su razgovarali u odnosu na druge dvije lokacije.



Slika 33. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 1 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 34. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 2 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 35. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 9 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

Iz frekvencijskog spektra buke možemo vidjeti koje frekvencije najviše doprinose ukupnim razinama buke L_{Aeq} , L_{AFmin} i L_{AFmax} . Primjerice, ukupnoj razini buke L_{AFmax} na lokaciji 1 najviše doprinosi frekvencija od 1000 Hz, na lokaciji 2 frekvencija od 400 Hz i na lokaciji 9 frekvencija od 500 Hz. Proučavajući kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine za npr. lokaciju 1 možemo vidjeti da osnovna razina buke, razina buke koja je prekoračena 95% vremena mjerenja, iznosi 47,8 dB(A), dok srednja vrijednost vršnih razina buke iznosi 67,7 dB(A).

Temeljem rezultata spektralnih vrijednosti također možemo odrediti ukupne razine buke pomoću formule:

$$L_{uk} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (35)$$

pri čemu je

- n – broj frekvencijskih pojaseva tj. terci
- L_i – razina buke i -te terce

9.1.2. Mjerenje buke u hodniku aplikacijom na mobilnom uređaju

Tablica 7. Rezultati mjerenja buke mobilnim uređajem u hodniku na tri različite lokacije

Lokacija	Vrijeme mjerenja [min]	\bar{L} [dB]	L_{max} [dB]	L_{min} [dB]
1	05:02	32,0	63,0	21,0
2	05:02	26,0	59,0	18,0
9	05:03	27,0	53,0	17,0

Možemo uočiti veliko neslaganje rezultata dobivenih mjerenjem buke zvukomjerom i aplikacijom na mobilnom uređaju. Mobilni uređaj nije objektivan mjerac razine zvučnog tlaka budući da nema ugrađene korekcijske filtre koji uzimaju u obzir karakteristiku ljudskog uha čija se osjetljivost mijenja s frekvencijom zvuka, kao kod zvukomjera. Osim frekvencijskog vredovanja, jedno od najvažnijih svojstava zvukomjera koje mobilni uređaj nema je vremensko vrednovanje. Također, mobilni uređaji su vrlo rjetko integracijski što znači da ne mjere ekvivalentnu razinu buke, nego trenutnu vrijednost razine buke. Navedena aplikacija nije pogodna za profesionalno mjerenje buke, ali se može iskoristiti u nastavi fizike prilikom obrade nastavne jedinice Zvučni valovi.

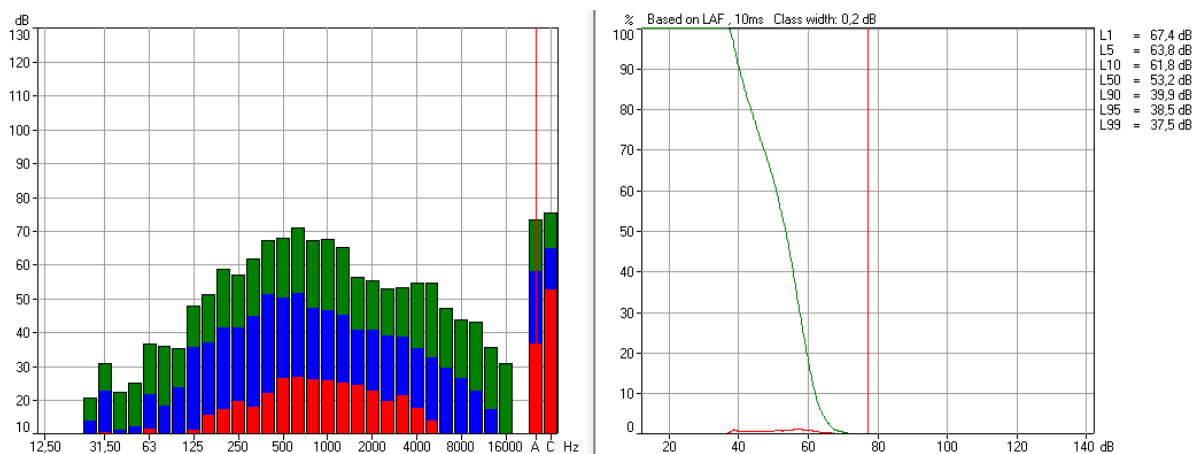
9.2. Mjerenje buke zvukomjerom u učionici 50 i elektroničkom praktikumu 67

Tablica 8. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u učionici 50 i elektroničkom praktikumu 67

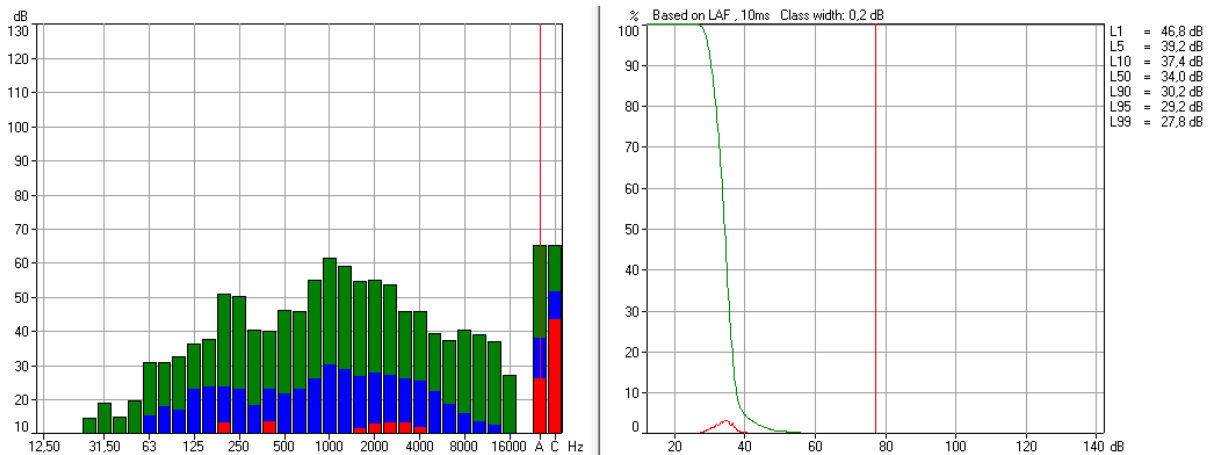
Lokacija	Napomena	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
3	Zatvoreni prozori	05:10	57,8	73,1	36,5
8	Zatvoreni prozori	04:47	38,0	65,2	26,0
8	Otvoreni prozori	05:12	51,1	58,6	42,4

Mjerenja u predavaoni 50 bila su obavljena za vrijeme predavanja iz Kvantne mehanike. Izmjerena ekvivalentna razina buke iznosi 57,8 dB(A) što je očekivano budući da za običan razgovor razina zvuka iznosi oko 60 dB.

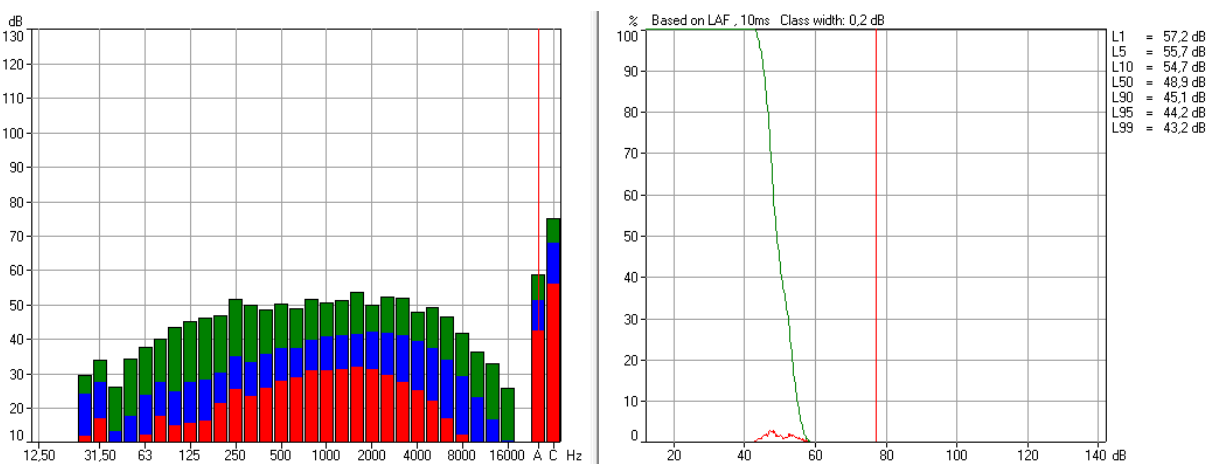
Mjerenja označena brojem 8 u elektroničkom praktikumu bila su obavljena sa zatvorenim prozorima i otvorenim prozorima. Za ekvivalentnu razinu buke pri mjerenju sa zatvorenim prozorima dobili smo vrijednost od 38 dB(A) što je neznatno veće od granične vrijednosti koja iznosi 35 dB(A). Pri mjerenju sa otvorenim prozorima vrijednost ekvivalentne razine buke očekivano raste i iznosi 51,1 dB(A).



Slika 36. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 3 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 37. Frekventijski spektar buke na lokaciji 8 sa zatvorenim prozorima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 38. Frekventijski spektar buke na lokaciji 8 sa otvorenim prozorima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

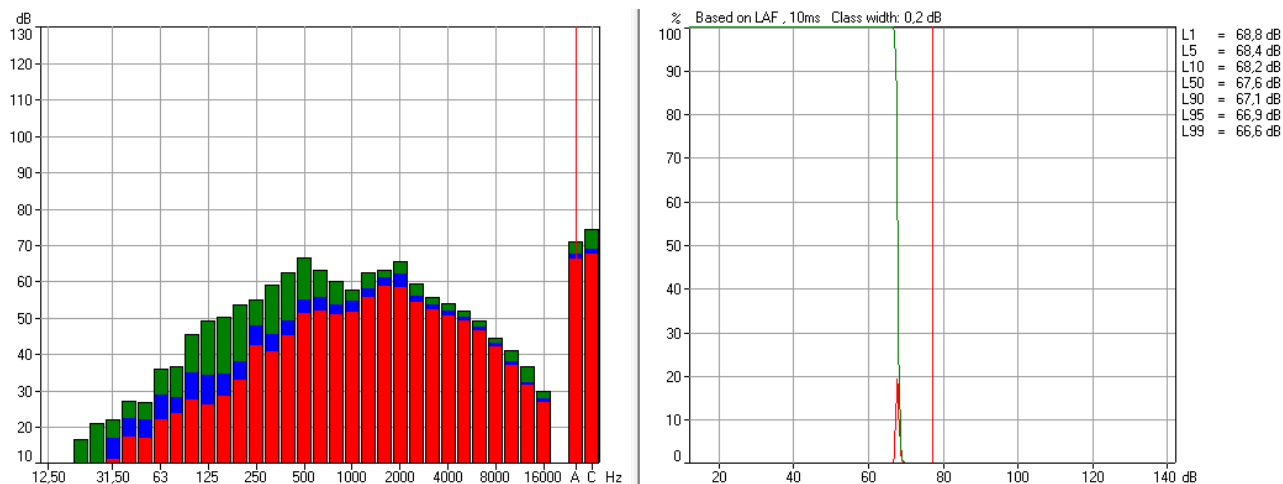
Frekvencije od 630 Hz na lokaciji 3 i 1000 Hz na lokaciji 8 najviše doprinose ukupnim izmjerenim razinama buke L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} . Frekventijski spektar buke na lokaciji 8 sa otvorenim prozorima prikazan na slici 38 razlikuje se od prethodna dva jer u njemu nema isticanja diskretnih komponenti buke, a vrijednosti L_{AFmax} i L_{AFmin} se malo razlikuju od L_{Aeq} .

9.3. Mjerenje buke servera zvukomjerom u pretprostoriji

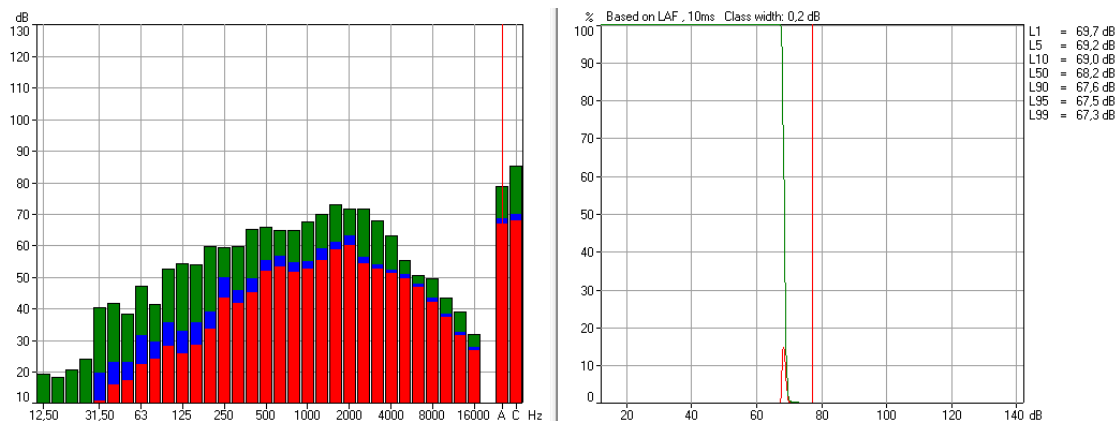
Tablica 9. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u pretprostoriji

Lokacija	Napomena	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
4	Otvorena vrata	05:02	67,6	70,9	66,1
4	Zatvorena vrata	05:02	68,3	78,7	66,9

Mjerenje buke na lokaciji 4, u pretprostoriji u kojoj se nalazi server sa slike 30. obavljeno je sa otvorenim i sa zatvorenim vratima okolnih predavaona i ureda. U oba slučaja izmjerena vrijednost ekvivalentne razine buke prekoračena je za gotovo 50% u odnosu na dozvoljenu vrijednost koja iznosi 35 dB(A). Buka u pretprostoriji potječe isključivo od servera budući da se za vrijeme mjerenja u njoj nije nalazio nitko od zaposlenika ili studenata Odjela.



Slika 39. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 4 sa otvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 40. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 4 sa zatvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

Iz frekvencijskog spektra možemo vidjeti da su vrijednosti izmjerenih veličina L_{Aeq} (plava boja), L_{AFmax} (tamno zelena boja) i L_{AFmin} (crvena boja) vrlo slične. Osim toga, slične su i vrijednosti statističkih percentila što znači da je server izvor trajne, a ne periodične buke. Treba napomenuti da frekvencija od 2000 Hz najviše doprinosi ukupnim razinama buke L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} . Ranije smo pokazali da je ljudsko uho upravo najosjetljivije na zvukove frekvencija od 2000-5000 Hz.

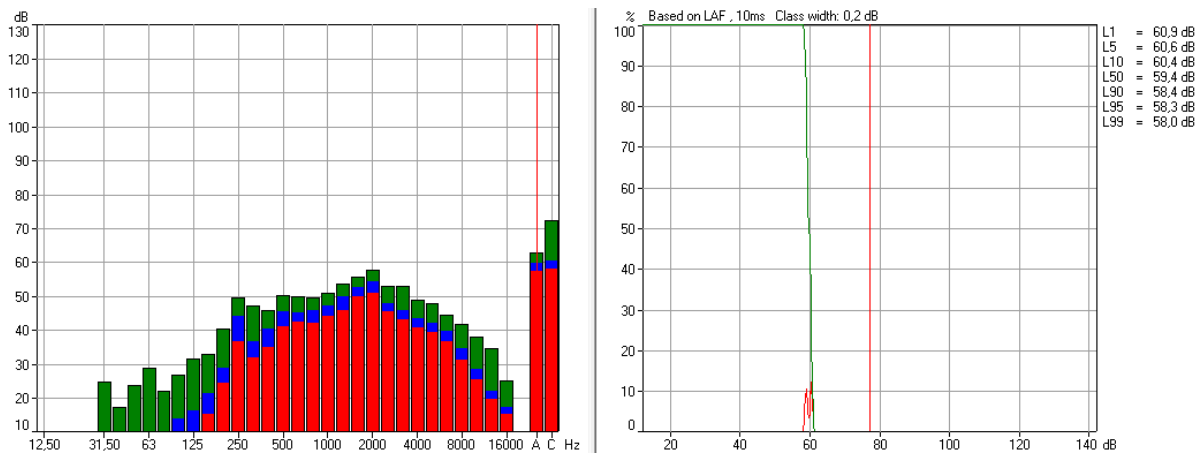
9.4. Mjerenje buke servera zvukomjerom u uredima 56 i 61

Tablica 10. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u uredima 56 i 61 sa otvorenim i zatvorenim vratima

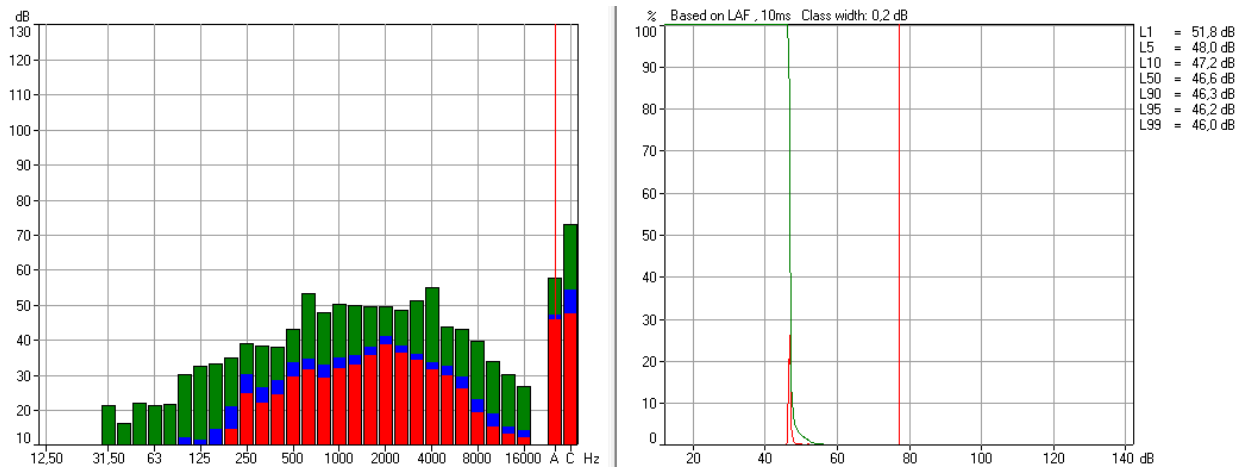
Lokacija	Napomena	Vrijeme mjerjenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
5	Otvorena vrata	05:02	59,5	62,7	57,4
5	Zatvorena vrata	05:03	47,0	57,7	45,7
6	Otvorena vrata	05:02	60,1	64,7	59,2
6	Zatvorena vrata	05:06	47,6	63,7	43,7

Izmjerena vrijednost ekvivalentne razine buke u uredima 56 i 61 sa otvorenim vratima iznosi 59,5 dB(A) i 60,1 dB(A), što je za otprilike 8 dB(A) manje od vrijednosti izmjerenih u pretprostoriji. Mjerenje u uredu 61 obavljeno je na udaljenosti 700 cm od izvora, dok je ono u pretprostoriji obavljeno na udaljenosti 260 cm od izvora. Rezultat je očekivan s obzirom da vrijedi da se s povećanjem udaljenosti od izvora buke razina buke smanjuje.

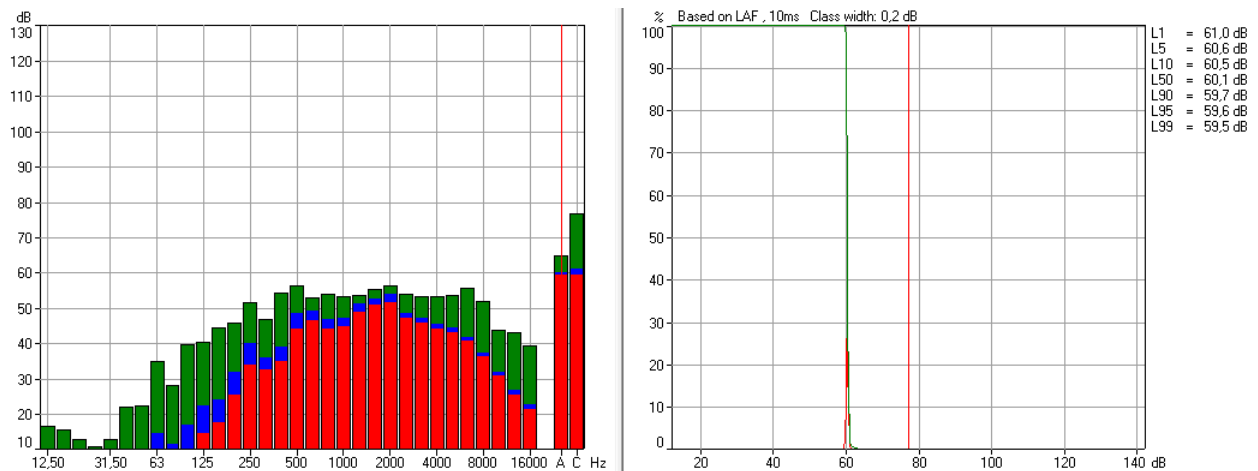
Kada su vrata ureda zatvorena, ekvivalentna razina buke u uredima 56 i 61 iznosi 47,0 dB(A) i 47,6 dB(A). Vidimo da se zatvaranjem vrata razina buke smanjila za otprilike 13 dB(A), ali ona i dalje prelazi dopuštenu vrijednost od 45 dB(A). Budući da se u uredima pišu znanstveni radovi koji zahtjevaju veliku pozornost i koncentraciju, nužno je pronaći rješenje kako bi se razina buke smanjila na vrijednost koja je manja ili jednaka dopuštenoj vrijednosti.



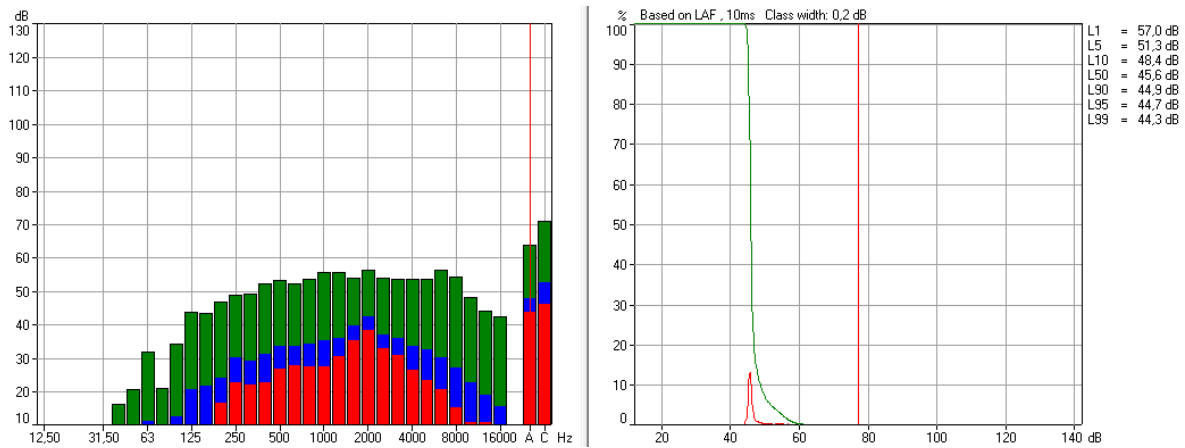
Slika 41. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 5 sa otvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 42. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 5 sa zatvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 43. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 6 sa otvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 44. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 6 sa zatvorenim vratima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

Ukoliko usporedimo frekvencijski spektar izvora buke sa slike 39 sa frekvencijskim spektrom buke na slikama 41 i 43 možemo vidjeti da on ima gotovo identičan oblik, ali se sa udaljenosti od izvora razina buke smanjila. To znači da su se smanjile i istaknute vrijednosti veličina L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} , a frekvencija koja najviše doprinosi ukupnim razinama buke i sada iznosi 2000 Hz.

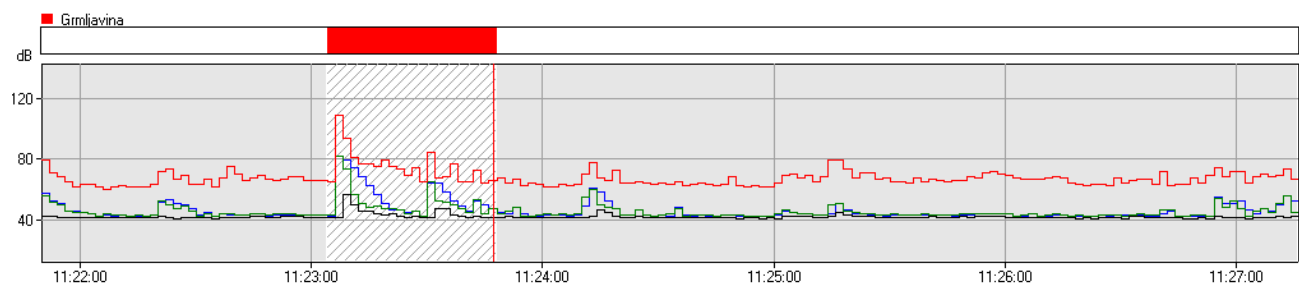
9.5. Mjerenje buke zvukomjerom u laboratoriju 57

Tablica 11. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u laboratoriju 57

Lokacija	Napomena	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
7	Otvorena vrata/ zatvoreni prozori	05:02	54,0	60,9	52,7
7	Zatvorena vrata/ zatvoreni prozori	05:25	55,7	81,3	40,6
7	Zatvorena vrata/ otvoreni prozori	05:08	49,4	64,2	43,4

Mjerenje buke u laboratoriju 57 obavljeno je kada se u njemu nije bilo studenata niti djelatnika Odjela. Izmjerena vrijednost L_{Aeq} sa zatvorenim vratima i otvorenim prozorima iznosi 49,4 dB(A) i slična je kao i ona izmjerena u elektroničkom praktikumu, a koja je iznosila 51,1 dB(A). Vrijednost L_{Aeq} izmjerene u laboratoriju 57 sa zatvorenim prozorima veća je za 16 dB(A) u odnosu na onu izmjerenu u elektroničkom praktikumu sa zatvorenim prozorima zbog buke servera koji se nalazi odmah pored otvorenih vrata laboratorija 57.

Zanimljivo je proučiti mjerenje buke sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima i izmjerene vrijednosti L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} . Očekivano bi one trebale biti najmanje, ali su zbog jake grmljavine poprimile najveće vrijednosti.



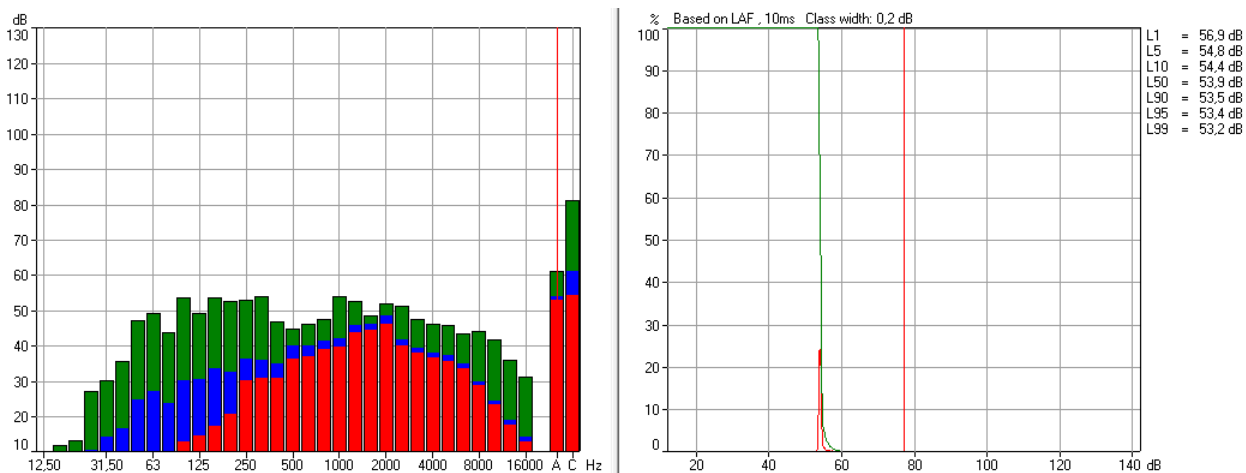
Slika 45. Vremenski prikaz buke prilikom mjerenja buke na lokaciji 7 sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima

Marker grmljavina na slici 45 označava vrijeme u kojem se dogodila grmljavina, a koje smo isključili iz mjerenja. Sada možemo usporediti te rezultate.

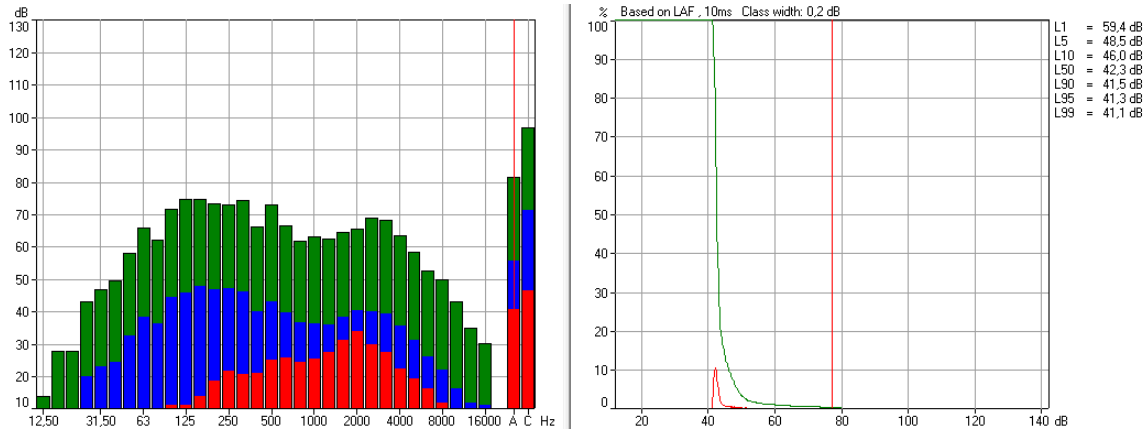
Tablica 12. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u laboratoriju 57 sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima

Lokacija	Napomena	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
7	Zatvorena vrata/ zatvoreni prozori	05:25	55,7	81,3	40,6
7	Zatvorena vrata/ Zatvoreni prozori/ Bez grmljavine	04:41	47,2	59,9	40,6
7	Zatvorena vrata/ Zatvoreni prozori/Grmljavina	00:44	71,0	81,3	41,2

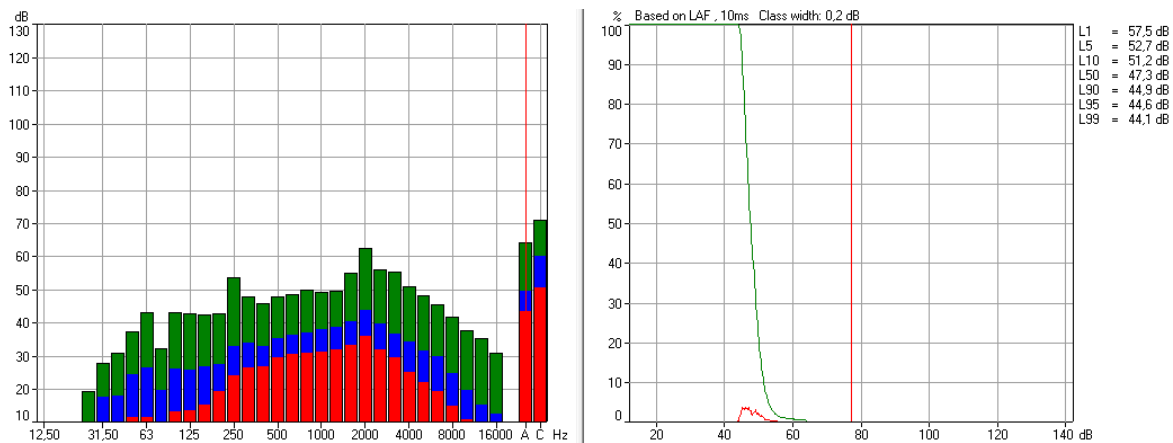
Grmljavinu koja je trajala otprilike 44 sekunde isključili smo iz mjerenja i nakon toga vrijednost ekvivalentne razine buke smanjila se za 8,5 dB(A) i sada iznosi 47,2 dB(A). Vrijednosti veličina L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima sada su manje u odnosu na one izmjerene sa otvorenim vratima i otvorenim prozorima.



Slika 46. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 7 sa otvorenim vratima i zatvorenim prozorima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 47. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 7 sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 48. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 7 sa zatvorenim vratima i otvorenim prozorima (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

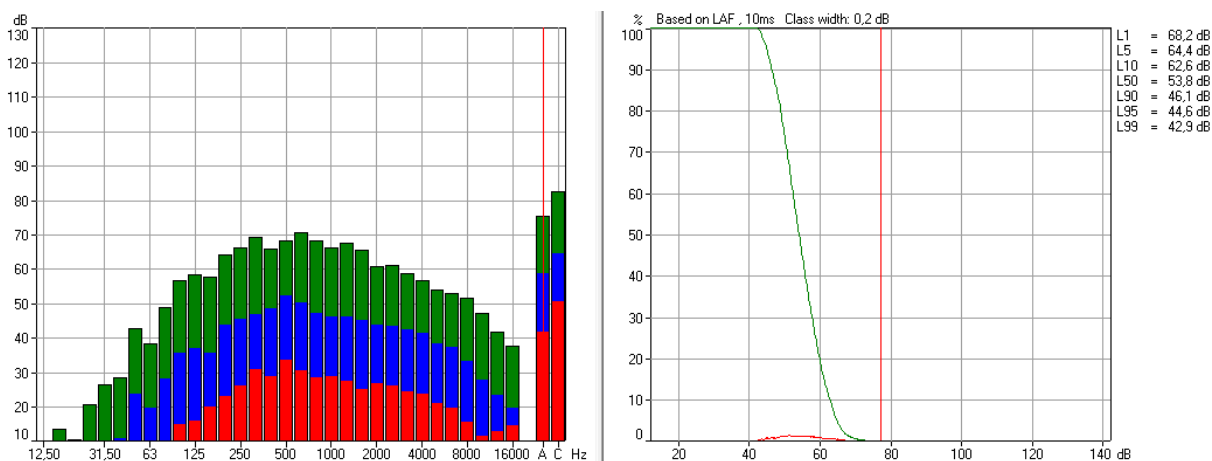
Frekvencijski spektri buke prikazani na slici 46 i 47 razlikuju se od ostalih po tome što su niske frekvencije najviše doprinijele istaknutim vrijednostima L_{AFmax} (tamnozeleno boja), što je rezultat blage grmljavine prilikom mjerenja sa otvorenim vratima i zatvorenim prozorima i jake grmljavine prilikom mjerenja sa zatvorenim vratima i zatvorenim prozorima. Kada nije bilo grmljavine, frekvencija od 2000 Hz najviše je doprinosila ukupnim izmjerenim razinama buke L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} , kao što vidimo na slici 48.

9.6. Mjerenje buke zvukomjerom u studentskoj kantini

Tablica 13. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom u studentskoj kantini

Lokacija	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
10	05:18	58,5	75,3	41,6

Tijekom mjerenja buke u kantini nije bilo gužve. Nekoliko studenata je ušlo i kratko razgovaralo s djelatnicom kantine i zbog toga vrijednost L_{Aeq} nije visoka i iznosi 58,5 dB(A) što je uobičajena vrijednost prilikom razgovora.



Slika 49. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 10 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

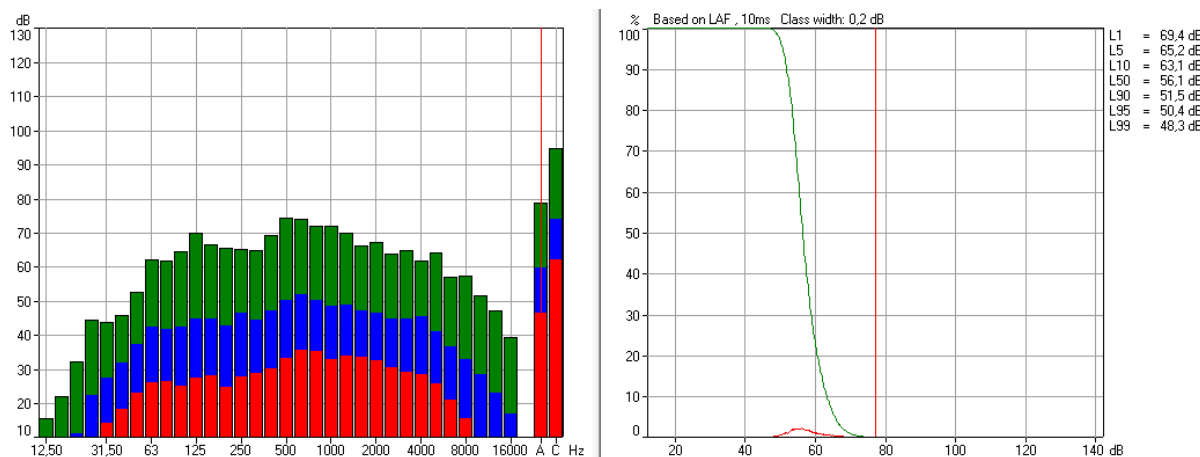
Frekvencije u intervalu od 315- 1250 Hz najviše doprinose ukupnim razinama buke L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} . Frekvencijski spektar buke na lokaciji 10 prikazan na slici 49 i lokaciji 3 prikazan na slici 36 je jako sličan s obzirom da se prilikom mjerenja buke u oba slučaja vodio razgovor između nekoliko sudionika.

9.7. Mjerenje buke zvukomjerom na prednjem i stražnjem ulazu

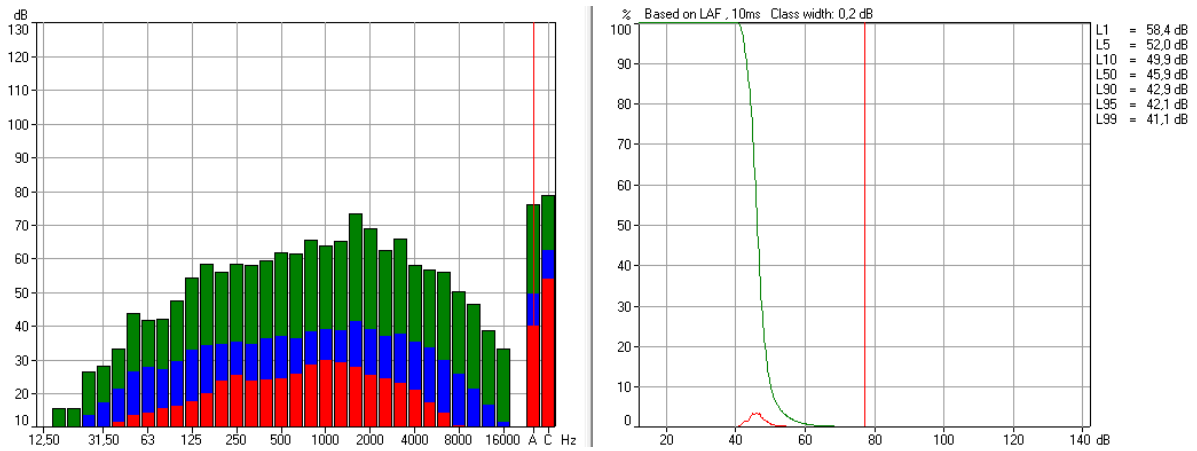
Tablica 14. Rezultati mjerenja buke zvukomjerom na prednjem i stražnjem ulazu

Lokacija	Vrijeme mjerenja [min]	L_{Aeq} [dB]	L_{AFmax} [dB]	L_{AFmin} [dB]
11	15:03	59,8	78,7	46,3
12	15:03	49,5	76,0	40,0

Izmjerena vrijednost ekvivalentne razine buke na prednjem ulazu veća je za 10,3 dB(A) u odnosu na onu na stražnjem ulazu. Razlog tomu je što su ispred prednjeg ulaza prolazili automobili koji su se kretali prema parkingu tržnice koja se nalazi preko puta prednjeg ulaza Odjela za fiziku.



Slika 50. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 11 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)



Slika 51. Frekvencijski spektar buke na lokaciji 12 (lijevo) uz kumulativnu razdiobu i karakteristične statističke veličine (desno)

Frekvencije od 500 i 630 Hz najviše doprinose ukupnim razinama buke na lokaciji 11, dok frekvencije od 1600 i 2000 Hz najviše doprinose ukupnim razinama buke na lokaciji 12.

10.METODIČKA OBRADA

U ovom poglavlju nalazi se priprema za izvođenje nastavne jedinice *Zvučni valovi* u trećem razredu matematičke gimnazije. Nastava fizike u gimnazijama izvodi se prema Nastavnom planu i programu za gimnazije, odobrenom od strane Ministarstva kulture i prosvjete 1994. godine [39]. U matematičkoj gimnaziji realizira se četverogodišnji program nastave fizike prema inačici A. Nastava se izvodi 3 sata tjedno, odnosno 105 sati godišnje.

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVNOG SATA

Zvučni valovi

KANDIDAT: Ivana Knezović

ŠKOLA: III. Gimnazija

MJESTO: Ulica Kamila Firingera 14, 31000 Osijek

MENTOR:

NADNEVAK:

ŠK: GOD: 2017./18.

RAZRED: 3.

NASTAVNI PREDMET: Fizika

NASTAVNA CJELINA: Valovi

NASTAVNA JEDINICA: Zvučni valovi

I. Sadržajni plan

1. Podjela nastavne cjeline na jedinice (prema Nastavnom planu i programu) :
 - 1.1. Harmonijski valovi
 - 1.2. Interferencija valova
 - 1.3. Refleksija vala
 - 1.4. Stojni valovi
 - 1.5. Zvučni valovi

OČEKIVANA POSTIGNUĆA UČENIKA I NJIHOVO VRJEDNOVANJE

Cilj nastavne jedinice: Osposobiti učenike za primjenu fizikalnih spoznaja vezanih uz zvučne valove, potrebnih za razumijevanje prirodnih pojava u svakodnevnom životu.

Ključni pojmovi: zvuk, izvor zvuka, infrazvuk, ultrazvuk, brzina zvuka, jakost ili intenzitet zvuka, razina zvučnog intenziteta, visina, glasnoća i boja tona

Obrazovna (spoznajna) postignuća:

- definirati pojam zvučnih valova
- grafički prikazati zvučni val
- objasniti kako čujemo
- definirati čujno područje zvuka, infrazvuk i ultrazvuk
- opisati subjektivne parametre: jakost, visinu i boju tona te ih povezati s objektivnim parametrima zvuka
- definirati i iskazati formulom fizikalne veličine intenzitet zvuka i razinu intenziteta zvuka
- primijeniti stečena znanja prilikom rješavanja konceptualnih i numeričkih zadataka

Funkcionalna (psihomotorička) postignuća:

- razvijati sposobnost promatranja, bilježenja, opisivanja, uočavanja i logičkog zaključivanja
- poticati primjenjivanje i povezivanje ranije stečenih znanja
- primijeniti znanje na konkretnim primjerima iz života

Odgojna (afektivna) postignuća:

- uvažavati različite načine mišljenja i zaključivanja
- razvijati samosvjesnost i odvažnost pri iznošenju vlastitih stavova
- izgraditi pozitivan odnos prema radu

Način provjere postignuća:

- ostvaruje se pitanjima koje nastavnica postavlja učenicima tijekom nastavnog sata i evaluacijskim listićem na kraju nastavnog sata

ORGANIZACIJA NASTAVNOG SATA

Tip nastavnog sata: obrada novog gradiva			
<p>Oblici rada:</p> <p>-frontalni tijekom cijelog nastavnog procesa -individualni tijekom rješavanja evaluacijskog listića</p>	<p>Nastavne metode:</p> <p>-metoda razgovora i demonstracije prilikom ponavljanja nastavnog sadržaja -metoda usmenog izlaganja i demonstracije prilikom tumačenja novog nastavnog sadržaja -metoda rada s tekstom prilikom proučavanja teksta o tome kako čujemo -operacijska metoda crtanja i pisanja prilikom prepisivanja gradiva s ploče -operacijska metoda rješavanja zadataka prilikom rješavanja evaluacijskog listića</p>	<p>Nastavna sredstva i pomagala:</p> <p>-pomagala za pisanje i crtanje (školska ploča, krede, bilježnice, olovke) -nosioci informacija (udžbenik, word dokument, PowerPoint prezentacija) -prenosioci informacija (računalo, mobitel, LCD projektor) -sredstva za izvođenje demonstracijskih pokusa: elastična opruga, kuglica, glazbena vilica, batić, žica učvršćena na oba kraja -aplikacija za mjerenje razine intenziteta zvuka</p>	<p>Korelacija s ostalim predmetima:</p> <p>Glazbena kultura – Jakost, visina i boja tona Matematika – Logaritamska funkcija Biologija – građa uha</p>
<p>Literatura za učitelja:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. D. Horvat i D. Hrupec: Fizika 3, Zagreb 2014. 2. V. Paar: Fizika 3, Zagreb, 2007. 3. R. Krsnik: Fizika 3, Zagreb, 1998. 4. Internet <p>Literatura za učenike:</p> <p>D. Horvat i D. Hrupec: Fizika 3, Zagreb 2014.</p>			

TIJEK NASTAVNOG PROCESA

<i>AKTIVNOST UČITELJA</i>	<i>AKTIVNOST UČENIKA</i>
<p><u>Uvodni dio sata</u></p> <p>Ponavljanje nastavnog sadržaja postavljanjem pitanja:</p> <p><i>Što je val?</i></p> <p><i>Koje sve vrste valova poznajete?</i></p> <p><i>Rekli smo da postoje brojne podjele valova, ali naglasili smo onu glavnu podjelu. Koja je to?</i></p> <p><i>Koja je osnovna razlika između mehaničkih i elektromagnetskih valova?</i></p> <p><i>Mehanički valovi se prema načinu širenja dijele na longitudinalne i transverzalne. Izvedite demonstracijski pokus i na temelju njega opišite transverzalne i longitudinalne valove.</i></p>	<p><u>Uvodni dio sata</u></p> <p>Učenici odgovaraju na postavljena pitanja.</p> <p><i>Val je poremećaj koji se širi kroz prostor i vrijeme, a prati ga prijenos energije i količine gibanja.</i></p> <p><i>Elektromagnetske valove, valove na vodi, zvučne valove...</i></p> <p><i>Podjela valova na mehaničke i elektromagnetske valove.</i></p> <p><i>Mehanički valovi se mogu širiti samo u nekom sredstvu, dok se elektromagnetski valovi mogu širiti i u vakuumu.</i></p> <p>Učenici izvode demonstracijski pokus sa elastičnom oprugom. (Pokus 1. Dugačku oprugu unutar koje se nalazi kuglica učenik ispruži po podu te blizu jednog kraja udari kratkim udarcem okomito na pod. Učenik objašnjava kako je proizveo transverzalni val jer se val širi duž opruge - udesno, dok kuglica titra u smjeru udarca: gore-dolje. Prema definiciji, ako čestica sredstva titra okomito na smjer širenja vala, val je transverzalan.</p>

Danas ćemo se baviti valovima bez kojih ne bi mogli komunicirati, slušati omiljenu glazbu te opažati svijet oko sebe. Koji su to valovi?

Središnji dio sata

Što mislite, biste li mogli slušati predavanja iz fizike u svemiru?

Zašto se zvuk ne može širiti u svemiru?

Prilikom širenja zvučnih valova zapravo dolazi do širenja naizmjeničnih zgušnjavanja i razrjeđenja zraka uzrokovanih titranjem čestica zraka.

Sada možete izreći i zapisati potpunu definiciju zvuka, uzevši u obzir vrstu vala i mogućnost širenja zvuka u tvarima različitih agregatnih stanja.

Naše uho zvuk osjeća kao promjene tlaka. Sada ćemo saznati zašto.

Već smo rekli da longitudinalne valove vezemo uz naizmjenična zgušnjavanja i razrjeđenja čestica sredstva - zraka u kojem se val širi. Što se događa sa tlakom zraka prilikom zgušnjavanja i razrjeđenja?

Pokus 2. Na istoj opruzi učenik izvodi zgušnjavanja i razrjeđenja. Kuglica sada titra lijevo-desno, a val se ponovno širi duž opruge – udesno. Takav val u kojem čestice sredstva titraju paralelno sa smjerom širenja vala nazivamo longitudinalnim valom.

Zvučni valovi.

Središnji dio sata

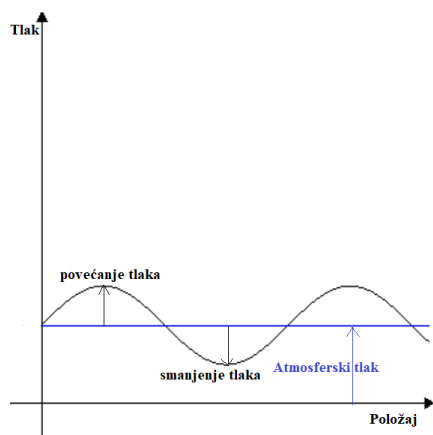
Učenici iznose svoja mišljenja. Neki znaju da se u svemiru zvuk ne može širiti.

Jer je zvuk mehanički val i za njegovo širenje je potrebno sredstvo.

Zvuk je longitudinalni mehanički val koji se može širiti u čvrstim, tekućim i plinovitim tvarima.

Prilikom zgušnjavanja čestica zraka tlak zraka raste, a prilikom razrjeđenja tlak zraka pada.

Sada možemo grafički prikazati zvučni val tako što ćemo na os apcisa nanijeti koordinatu položaja uzduž smjera širenja zvučnog vala, a na os ordinata odstupanje od atmosferskog tlaka zraka. Atmosferski tlak je tlak zraka kada nema zvučnih valova..



Kao što svaki val ima svoj izvor, tako ga ima i zvučni val. Nabrojite mi neke izvore zvuka.

Dajem učenicima glazbenu vilicu i batić i žicu učvršćenu na oba kraja. Nakon toga postavljam pitanje što je zajedničko svim izvorima zvuka.

Jeste li se ikada pitali kako čujemo i na koji način zvučni valovi putuju do mozga gdje nastaje svjesna percepcija zvuka?

Uho je osjetljiv prijemnik zvuka koji radi na sličnom principu kao i mikrofon: zvučnu energiju pretvara u mehaničku, a mehaničku u obliku električnog impulsa šalje do mozga gdje nastaje svjesna percepcija zvuka.

Učenici crtaju graf u svoje bilježnice.

Ljudsko grlo, membrana zvučnika, glazbeni instrumenti...

Učenici zaključuju da kada batićem udare glazbenu vilicu, ona titra. Isto kao što titra i žica učvrćena na oba kraja kada ju dotaknemo. Učenici zaključuju da je izvor zvuka svako tijelo koje titra.

Učenici iznose svoja mišljenja i prisjećaju se znanja stečenih na nastavi biologije o građi uha.

Dajem učenicima tekstove o građi ljudskog uha i načinu na koji zvuk putuje do mozga. Imaju zadatak pročitati tekst i ukratko ga prepričati.

Učenici čitaju tekst i proučavaju slike, a nakon toga ga prepričavaju:

Zvuk ulazi u uho kroz ušnu školjku koja ga usmjerava do zvukovoda gdje zvuk putuje u obliku vala kojeg prate rast i pad zvučnog tlaka.

Zvuk zvukovodom dolazi do bubnjića koji zbog svoje elastičnosti titra frekvencijom dolaznog zvučnog vala. Titranje se preko slušnih koščica prenosi na tekućinu u unutaršnjem uhu, a s tekućine na bazilarnu membranu. Iznad bazilarne membrane nalazi se Cortijev organ koji sadrži mnoštvo osjetnih stanica iz kojih izlaze dlačice. Kada njima prođe zvuk, dolazi do rezonancije onih dlačica čija duljina odgovara frekvenciji zvučnih valova. Te dlačice zatitraju i stvaraju električni impuls koji podražuje slušni živac i putuje do mozga gdje nastaje svjesna percepcija zvuka.

Koje smo fizikalne veličine koristili prilikom opisivanja valova?

Frekvenciju, valnu duljinu, brzinu širenja vala, period, amplitudu.

Što mislite možemo li čuti zvukove bilo koje frekvencije?

Učenici iznose svoja mišljenja; neki učenici vjerojatno znaju za područje čujnosti pa odgovaraju da ne možemo čuti zvuk bilo koje frekvencije.

Osjet zvuka u ljudskom uhu stvaraju frekvencije zvučnih valova u intervalu od oko 20 Hz do 20 kHz. Valove niže od frekvencije 20 Hz nazivamo infrazvukom, a više od 20 kHz ultrazvukom.

Primjer infrazvuka su potresni valovi koji se šire unutrašnošću Zemlje. Jeste li čuli za neke od primjena ultrazvuka?

Ukoliko netko od učenika želi, može napisati seminar o primjenama ultrazvuka: određivanje dubine mora, dijagnostika srca i krvnih žila, navigacija šišmiša, itd.

Puštam učenicima video sa linka:

<https://www.youtube.com/watch?v=qNf9nzyndIk>

Komentiramo mogu li svi učenici čuti zvukove viših frekvencija. Govorim kako područje čujnosti varira od osobe do osobe i kako se starenjem gornja granica čujnosti snižava prema 10 kHz.

Možete li mi reći kako bi vi podijelili zvukove?

Osnovna podjela zvukova je na tonove i šumove. Tonovi su oni zvukovi koji se uhu čine pravilnim, čistim i ugodnim, dok su šumovi zvukovi nastali nepravilnim titranjem zvučnog izvora čija se frekvencija neprestano mijenja.

Znate li s kojim subjektivnim parametrom povezujemo frekvenciju zvuka?

Koje još subjektivne parametre osim visine vežete uz zvuk?

Ukoliko učenici ne odgovore odmah glasnoća i kvaliteta, puštam im pjesmu prvo jako tiho, a zatim povećavam glasnoću te im puštam tonove različite boje.

Učenici odgovaraju kako su čuli za primjenu ultrazvuka u medicini.

Učenici komentiraju da postoje ugodni i neugodni zvukovi.

Frekvenciju zvuka vežemo uz visinu zvuka.

Učenici odgovaraju glasnoća i boja.

Glasnoća zvuka neposredno je povezana sa fizikalnom veličinom koju nazivamo intenzitet ili jakost zvuka.

Prijenos čega vežemo uz svaki val?

Energija zvučnih valova pomoći će nam da definiramo jakost ili intenzitet zvuka.

Intenzitet zvuka je energija zvučnih valova koja u jednoj sekundi prođe kroz jediničnu plohu postavljenu okomito na smjer širenja vala:

$$I = \frac{E}{A \cdot t}$$

Možete li drugačije zapisati gornju formulu? Ukoliko se ne sjete, učenicima sugeriram da formulu napišu uzevši u obzir snagu zvučnog izvora.

Kako bi formulu prilagodili ako se radi o kuglastom valu (zvučni val koji se iz točkastog izvora širi radijalno u svim smjerovima)?

Najslabiji zvuk kojeg ljudsko uho jedva može čuti ima jakost $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Nasuprot tome, najjači podnošljivi zvuk, koji već izaziva osjet bola, ima jakost oko 1 W/m^2 .

Što možete reći o uhu kao prijemniku zvuka?

Vjerojatno baš zbog toga naše uho registrira logaritamske promjene intenziteta, a ne linearne jer je u logaritamskoj skali taj veliki raspon

Prijenos energije i količine gibanja.

$$I = \frac{P}{A}$$

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

Uho je izuzetno osjetljiv prijemnik zvuka, a to zaključujemo iz ogromnog raspona intenziteta zvuka kojeg uho može čuti od čak 12 redova veličina.

puno manji. Činjenica da osobine sluha vežemo uz logaritamski odnos, uvažena je prilikom definicije razine intenziteta zvuka čija je mjerna jedinica bel (B), odnosno decibel (dB).

Dva zvučna signala razlikuju se u intenzitetu za 1 bel, ako omjer njihovih intenziteta iznosi 10. U praksi se rabi deset puta manja jedinica, decibel.

Razina intenziteta zvuka u decibelima definira se:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

gdje je $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Učenicima govorim da uzmu svoje mobitele na koje su ranije, prema dogovoru preuzeli aplikaciju za mjerenje razine intenziteta zvuka. Zadatak im je očitati razinu intenziteta zvuka u tišini, za vrijeme običnog razgovora dvoje učenika, za vrijeme razgovora svih učenika u razredu, tijekom puštanja glazbe i nakon toga izračunati intenzitet zvuka za navedene situacije.

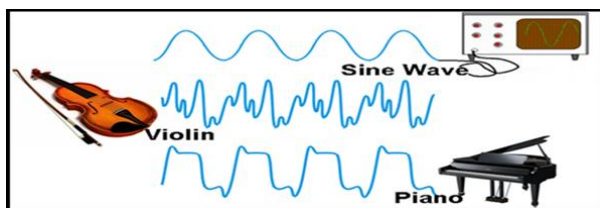
Uočimo da je razina intenziteta zvuka još uvijek objektivno svojstvo zvuka, ali je zbog uporabe logaritamske funkcije u njejoj definiciji puno bliža pojmu subjektivne glasnoće zvuka. Grubo pravilo nam kaže da bi dojam glasnoće (psihološka reakcija na zvuk) bio udvostručen, razina intenziteta zvuka treba porasti za 10 dB.

Učenici izvode mjerenja i zapisuju ih u svoje bilježnice te nakon toga računaju intenzitete zvukova za pojedine razine intenziteta.

Ostalo nam je još prokomentirati boju tona.

Zvučni val čistog tona ima oblik harmonijskog vala određene valne duljine. No, u stvarnosti najčešće nastaju složeni tonovi čiji graf elongacije može imati vrlo složene oblike.

Uzmimo za primjer različite glazbene instrumente: violinu i glasovir.



Prokomentirajte grafove pojedinih instrumenata.

Zbog toga kažemo da se tonovi jednake frekvencije, a različitog oblika grafa zvučnog vala razlikuju po boji.

Glazbeni instrumenti dakle, daju složene tonove. Složene tonove možemo rastaviti na osnovni ton i više harmonike. Frekvencija viših harmonika uvijek je cjelobrojni višekratnik frekvencije osnovnog tona. Kvaliteta i boja zvuka ovisit će o broju i frekvenciji viših harmonika koji se u njemu pojavljuju.

Prilikom obrade nastavne jedinice Harmonijski valovi koristili smo formulu za računanje brzine širenja longitudinalnog vala u čvrstom sredstvu i plinovima. Kako one glase i o čemu ovise?

Oblici grafova zvučnih valova istog tona dobivenog na različitim glazbalima su različiti, iako im je frekvencija jednaka.

Formula za brzinu širenja longitudinalnog vala, a tako i zvuka u čvrstim tvarima glasi:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E je oznaka za Youngov modul elastičnosti, a ρ gustoća tvari.

Završni dio sata

Dijelim učenicima evaluacijske listiće koje učenici samostalno rješavaju.

Nakon što završe, ukoliko ostane vremena učenici koji su točno riješili pojedini zadatak izlaze na ploču i objašnjavaju ga ostalim učenicima.

Formula za brzinu širenja zvuka u plinovima glasi:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

γ je adijabatski koeficijent, p atmosferski tlak plina, a ρ gustoća plina.

Završni dio sata

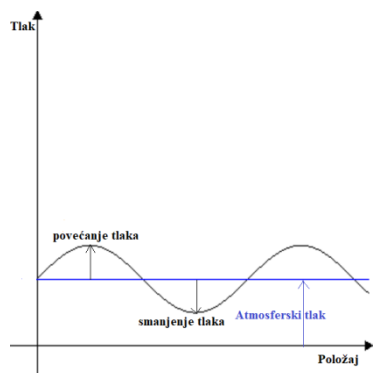
Učenici samostalno rješavaju evaluacijski listić.

Plan ploče

Zvučni valovi

Zvuk: longitudinalni mehanički val koji se može širiti u čvrstim, tekućim i plinovitim tvarima

Grafički prikaz zvučnog vala:



Kako čujemo?

Uho zvučnu energiju pretvara u mehaničku, a mehaničku u obliku električnog impulsa šalje do mozga

Infrazvuk, područje čujnosti, ultrazvuk



Frekvencija -> visina tona

Intenzitet zvuka -> jakost tona

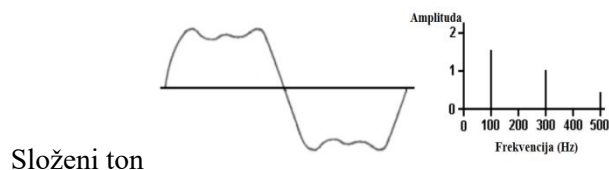
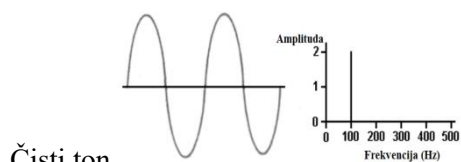
$$I = \frac{E}{A \cdot t} \quad I = \frac{P}{A}$$

Razina intenziteta zvuka:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0},$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Oblik zvučnog vala -> boja tona



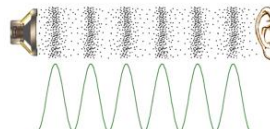
Plan projekcijskog platna

ZVUČNI VALOVI



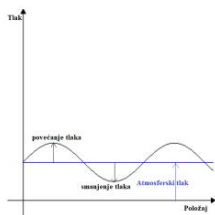
ŠTO JE ZVUK?

- Zvuk je longitudinalni mehanički val koji se može širiti u čvrstim, tekućim i plinovitim tvarima.



GRAFIČKI PRIKAZ ZVUČNOG VALA

- Zgušćenje čestica zraka → porast tlaka zraka
- Razrjeđenje čestica zraka → pad tlaka zraka

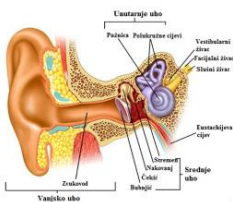


ŠTO SVE MOŽE BITI IZVOR ZVUKA?

- Svako tijelo koje titra



KAKO ČUJEMO?



- Uho zvučnu energiju pretvara u mehaničku, a mehaničku u obliku električnog impulsa šalje do mozga gdje nastaje svjesna percepcija zvuka

FREKVENCIJA ZVUKA



- Osjet zvuka u ljudskom uhu stvaraju frekvencije zvučnih valova u intervalu od oko 20 Hz do 20 kHz
- <https://www.youtube.com/watch?v=qNf9nzvnd1k>
- Valove niže od frekvencije 20 Hz nazivamo infrazvukom, a više od 20 kHz ultrazvukom.
- Frekvencija i visina tona

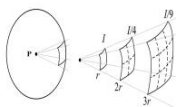
INTENZITET ZVUKA

- Intenzitet zvuka je energija zvučnih valova koja u jednoj sekundi prođe kroz jediničnu plohu postavljenu okomito na smjer širenja vala:

$$I = \frac{E}{A \cdot t} \quad I = \frac{P}{A}$$

- Za kuglasti val vrijedi formula:

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



INTENZITET ZVUKA (2)

- Intenzitet i jakost tona
- Najslabiji zvuk kojeg ljudsko uho jedva može čuti ima jakost $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.
- Najjači podnošljivi zvuk, koji već izaziva osjet bola, ima jakost oko 1 W/m^2

RAZINA INTENZITETA ZVUKA

- Dva zvučna signala razlikuju se u intenzitetu za 1 bel, ako omjer njihovih intenziteta iznosi 10. U praksi se rabi deset puta manja jedinica, decibel.
- Razina intenziteta zvuka u decibelima definira se:

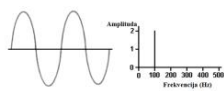
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

RAZINA INTENZITETA ZVUKA (2)

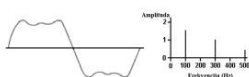
Usporedj glasnoće	Razina zvučnog intenziteta (dB)	Zvučni intenzitet (W/m ²)	Tipični primjeri
Bolino	140	10 ⁹	Mlazni avion (50 m)
	130	10	Prag bola
	120	1	Prag netagode
Zaglušujuće	110	10 ⁻¹	Motorna pila (1 m)
	100	10 ⁻²	Disco (1 m od zvučnika)
Vrlo glasno	90	10 ⁻³	Kamion (10 m)
	80	10 ⁻⁴	Prometnica u špiči (5 m)
Glasno	70	10 ⁻⁵	Ušavač (1 m)
	60	10 ⁻⁶	Običan razgovor (1 m)
Umjereno glasno	50	10 ⁻⁷	Dnevna soba
	40	10 ⁻⁸	Tihna knjižnica
Tihno	30	10 ⁻⁹	Spavaonica noću
	20	10 ⁻¹⁰	TV sklopi
Vrlo tihno	10	10 ⁻¹¹	Padajući list
	0	10 ⁻¹²	Prag sluha

BOJA TONA

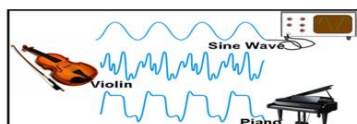
- Čisti ton



- Složeni ton: osnovni ton i viši harmonici



BOJA TONA (2)



- Tonovi jednake frekvencije, a različitog oblika grafa zvučnog vala razlikuju po boji.

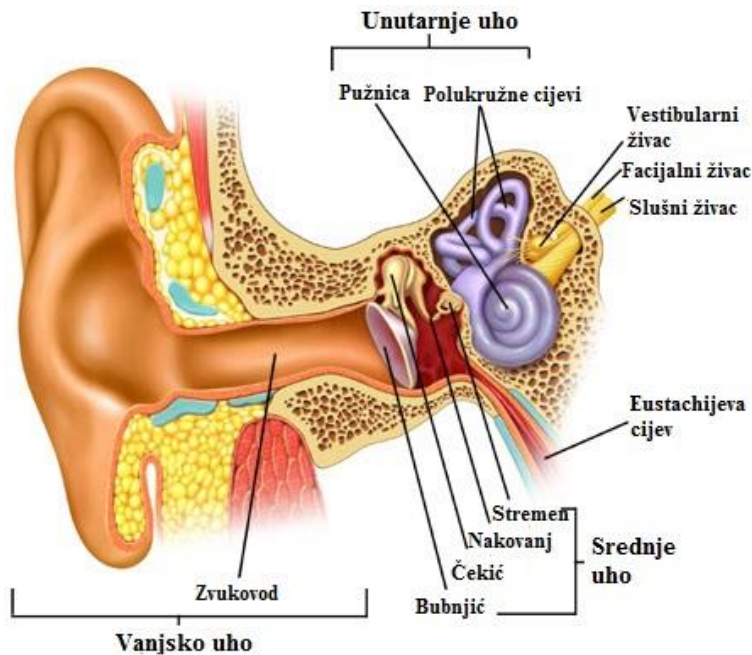
**HVALA NA
POZORNOSTI! 😊**

Rad na tekstu

KAKO ČUJEMO?

Ljudsko uho je izuzetno osjetljiv prijemnik zvuka koji zvučnu energiju pretvara u mehaničku energiju, a mehaničku energiju u obliku električnog impulsa šalje do mozga, gdje nastaje svjesna percepcija zvuka. Primjetimo da na sličnom principu radi i mikrofoni – on također zvučnu energiju pretvara u mehaničku, a zatim u električnu energiju.

Uho se sastoji od tri glavna dijela: vanjskog, srednjeg i unutarnjeg uha. Svaki od tih dijelova ima određenu ulogu u slušnom procesu.



Slika 1. Poprečni presjek ljudskog uha

Vanjsko uho

Vanjsko uho sastoji se od ušne školjke i ušnog kanala ili zvukovoda. Ušna školjka usmjerava zvuk do zvukovoda i zajedno s njim čini lijevak koji pojačava zvuk. Efekt pojačavanja lako možemo opaziti ukoliko savijen dlan prislonimo uz ušnu školjku. Do pojačanja zvuka dolazi zbog toga što ušna školjka zajedno sa zvukovodom čini rezonantni sustav. Zvuk u vanjskom uhu putuje u obliku longitudinalnog vala kojeg prati

kompresija i ekspanzija zraka. U vanjskom uhu - zvukovodu se također nalaze dlačice okrenute prema van kako bi sprječile kukce u prilazu do bunjića i na taj način zaštitile uho.¹⁶

Srednje uho

Srednje uho je šupljina ispunjena zrakom koju čine bubnjić i tri slušne koščiće: čekić, nakovanj i stremen. Bubnjić je napeta, eliptična membrana s naborom na donjem kraju koji mu omogućava pokretljivost i titranje kada do njega dođe longitudinalni val popraćen zgušnjeljima i razrjeđenjima zraka. Prilikom zgušnjelja zraka bubnjić se pomiče prema unutra, a prilikom razrjeđenja prema van što znači da bubnjić titra frekvencijom zvučnog vala. Titranje bubnjića prenosi se na slušne koščiće, a preko slušnih košćica na tekućinu unutarnjeg uha.

Srednje uho je povezano s usnom šupljinom Eustachijevom cijevi. Ona je u normalnom položaju zatvorena, a otvara se samo prilikom zijevanja ili gutanja. Veza srednjeg uha s vanjskim prostorom putem Eustachijeve cijevi je značajna jer omogućava izjednačavanje unutarnjeg i vanjskog statičkog tlaka i tako sprječava oštećenje bubnjića. Brza promjena tlaka koja nastaje prilikom naglog spuštanja aviona, izaziva bol u uhu. Tu bol možemo ublažiti zijevanjem ili gutanjem jer će se tada Eustachijeva cijev otvoriti, a vanjski i unutarnji tlak izjednačiti.

Unutarnje uho

Unutarnje uho, koje se zbog svoje složene građe naziva i labirint sastoji se od polukružne cijevi, predvorja i pužnice. Polukružna cijev ne sudjeluje u slušnom procesu, nego služi za održavanje ravnoteže tijela. Pužnica je najsloženija konstrukcija cijelog ljudskog tijela, a po obliku je cijev savijena u spiralu nalik na puževu kućicu. Uzduž pužnice protežu se tri kanala odijeljena bazilarnom i Reissnerovom membranom između kojih se nalazi limfna tekućina. Iznad bazilarne membrane nalazi se Cortijev organ koji sadrži oko 23 500 osjetnih stanica (cilijarne stanice) iz kojih izlaze dlačice - cilije.

Cijelo unutarnje uho ispunjeno je limfnom tekućinom na koju se prenosi zvučna energija primljena preko bubnjića. Prijenos zvučne energije uzrokovat će titranje bazilarne membrane (savijanje membrane s početka prema kraju). Kako se savija bazilarna membrana, tako se i dlačice – cilije deformiraju na različite načine i zbog tog mehaničkog naprezanja u cilijarnim stanicama se stvara električni impuls koji podražuje slušni živac i putuje do mozga. Znanstvenici do danas nisu uspjeli objasniti kako mozak dekodira signale koje prima električnim impulsom i kako ih pretvara u slušni osjet.

¹⁶ Opasnost od ulaska kukca u zvukovod je velika. Hodanje kukca po bubnjiću čuje se kao gruvanje topova što može dovesti do trajnog oštećenja sluha.

Evaluacijski listić

1. Zvuk je longitudinalni mehanički val. To znači da:

- a) čestice zraka titraju okomito na smjer širenja zvuka i da je zvuku za širenje potrebno sredstvo
- b) čestice zraka titraju okomito na smjer širenja zvuka i da zvuku za širenje nije potrebno sredstvo
- c) čestice zraka titraju u smjeru širenja zvuka i da je zvuku za širenje potrebno sredstvo
- d) čestice zraka titraju u smjeru širenja zvuka i da zvuku za širenje nije potrebno sredstvo

2. Grafički prikažite zvučni val i objasnite graf.

3. Spoji parove:

Ultrazvuk
Područje čujnosti
Infrazvuk
Frekvencija
Oblik zvučnog vala
Intenzitet

Potresni valovi
Visina tona
Medicinska dijagnostika
Zvuk frekvencije 20 Hz-20 kHz
Glasnoća tona
Boja tona

4. Dva jednaka zvučnika na istom mjestu u prostoru daju razinu intenziteta zvuka od 100 dB. Kada jedan od zvučnika prestane raditi, razina intenziteta zvuka bit će 50 dB. Zaokruži točan odgovor i potkrijepi ga matematički.

Točno Netočno

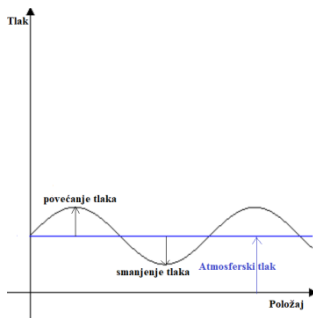
5. U vestern filmovima često su se mogle vidjeti ovakve scene: Indijanac silazi s konja i prislanja uho na tlo ili željezničku tračnicu kako bi utvrdio dolaze li jahači ili vlak. Zašto? Je li mogao dobiti jednako vrijednu informaciju slušajući pažljivo bez da je prislanjao uho na tlo ili tračnice?

Evaluacijski listić – rješenja

1. Zvuk je longitudinalni mehanički val. To znači da:

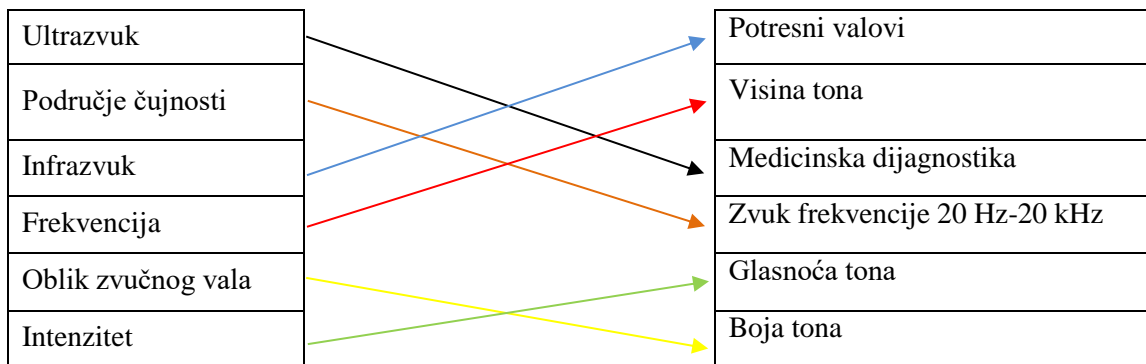
- a) čestice zraka titraju okomito na smjer širenja zvuka i da je zvuku za širenje potrebno sredstvo
- b) čestice zraka titraju okomito na smjer širenja zvuka i da zvuku za širenje nije potrebno sredstvo
- c) čestice zraka titraju u smjeru širenja zvuka i da je zvuku za širenje potrebno sredstvo**
- d) čestice zraka titraju u smjeru širenja zvuka i da zvuku za širenje nije potrebno sredstvo

2. Grafički prikažite zvučni val i objasnite graf.



Longitudinalne valove vežemo uz naizmjenična zgušnjenja i razrjeđenja čestica sredstva - zraka u kojem se val širi. Prilikom zgušnjenja čestica zraka tlak zraka raste, a prilikom razrjeđenja tlak zraka pada. Atmosferski tlak je tlak zraka kada nema zvučnih valova.

3. Spoji parove:



4. Dva jednaka zvučnika na istom mjestu u prostoru daju razinu intenziteta zvuka od 100 dB. Kada jedan od zvučnika prestane raditi, razina intenziteta zvuka bit će 50 dB. Zaokruži točan odgovor i potkrijepi ga matematički.

Točno **Netočno**

$$L_1 = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0}$$

$$\frac{L_1}{10} = \log_{10} \frac{I_1}{I_0}$$

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{\frac{L_1}{10}}$$

$$I_1 = I_0 10^{\frac{L_1}{10}} = 0,01 \text{ W/m}^2$$

$$I_2 = \frac{I_1}{2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$$

$$L_2 = 10 \log_{10} \frac{I_2}{I_0} = 97 \text{ dB}$$

5. U vestern filmovima često su se mogle vidjeti ovakve scene: Indijanac silazi s konja i prislanja uho na tlo ili željezničku tračnicu kako bi utvrdio dolaze li jahači ili vlak. Zašto? Je li mogao dobiti jednako vrijednu informaciju slušajući pažljivo bez da je prislanjao uho na tlo i tračnice?

Brzina zvuka u čvrstom sredstvu puno je veća nego u zraku pa će zvuk puno brže doći kroz tlo i tračnice nego kroz zrak.

11.ZAKLJUČAK

Zvuk je longitudinalni mehanički val kojem je za širenje potrebno elastično sredstvo, odnosno bilo koja tvar u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju. Brzina širenja zvuka ovisi isključivo o fizikalnim svojstvima tog sredstva pa će se tako zvuk puno brže širiti u krutim tijelima, nego u tekućinama i plinovima. Širenje zvuka podrazumjeva naizmjenično titranje čestica elastičnog sredstva pri čemu dolazi do zgušnjavanja i razrjeđenja čestica elastičnog sredstva, odnosno rasta i pada tlaka. Zvučni tlak je najvažnija veličina koju trebamo poznavati prilikom mjerenja zvuka jer nam omogućava računanje intenziteta zvuka, gustoće zvučne energije i zvučne snage. Osim toga, naše uho osjeća zvuk kao promjene tlaka.

Prilikom proučavanja utjecaja zvuka na ljude, moramo uzeti u obzir svojstva ljudskog sluha. Ljudsko uho može čuti frekvencije zvuka u intervalu od 20 Hz do 20 kHz pri čemu je najosjetljivije na zvukove frekvencija između 2 i 5 kHz. Pokazali smo da osjetljivost ljudskog uha, osim o frekvenciji, ovisi i o zvučnom tlaku privedenom uhu pri određenoj frekvenciji. Najmanji zvučni tlak kojeg ljudsko uho može opaziti pri frekvenciji od 1 kHz iznosi 20 μPa , što odgovara intenzitetu zvuka od 10^{-12} W/m^2 . Najveći zvučni tlak kojega ljudsko uho može podnijeti pri frekvenciji od 1 kHz, a da se ne ošteti iznosi 20 Pa, što odgovara intenzitetu zvuka od 1 W/m^2 . Zbog tako velikih omjera zvučnih tlakova i intenziteta koje ljudsko uho opaža, ali i činjenice da važne osobine sluha vežemo uz logaritamski odnos, prilikom opisivanja odnosa zvučnih intenziteta i tlakova koristimo logaritme omjera i uvodimo pojmove razine zvučnog tlaka, zvučnog intenziteta i zvučne snage. U skladu sa spomenutim karakteristikama ljudskog uha osim fizikalnih uveli smo i subjektivne veličine: razinu glasnoće i glasnoću te pokazali da je za dvostruko povećanje glasnoće razinu glasnoće potrebno povisiti za oko 10 dB.

Prikazom promjene veličine zvučnog tlaka u ovisnosti o frekvenciji dobijemo zvučni spektar, a iz njegovog oblika određujemo predstavlja li promatrani zvuk čisti ton, složeni ton ili šum. Analiza zvučnog spektra najčešće se provodi u oktavnim ili tercnim frekvencijskim pojasevima kod kojih je omjer graničnih frekvencija 1 : 2, odnosno 1 : $2^{1/3}$. Širina pojasa kod oktavne i tercne analize se povećava porastom frekvencije u skladu sa logaritamskim karakteristikama ljudskog uha. Podjela područja frekvencija na frekvencijske pojaseve postiže se pomoću elektroničkih fitara ugrađenih u zvukomjer. U zvukomjer se ugrađuju i elektronički krugovi čija se osjetljivost mijenja s frekvencijom na isti način kao i osjetljivost ljudskog uha i na taj se način mjerenjem buke zvukomjerom dobije

vrijednost koja se slaže sa subjektivnom ocjenom glasnoće buke. Prilikom mjerenja, razina buke u vremenu se mijenja. Kako bi dobili jednobrojnu veličinu koja bi izrazila utjecaj buke na čovjeka definirali smo ekvivalentnu razinu buke ili vrednovanu A razinu. To je ona razina stalne buke koja tijekom određenog vremena ima jednak utjecaj na ljude kao i mjerena promjenjiva buka, a uzima u obzir karakteristiku ljudskog uha jer se mjerenja odvijaju uz A filtar ugrađen u zvukomjer.

Buka koju definiramo kao neželjeni zvuk velik je problem današnjice, a osim što ugrožava čovjekovo zdravlje nepovoljno djeluje i na produktivnost pri obavljanju poslova, osobito onih za koje je potrebna velika koncentracija i pozornost. Zbog toga je buku potrebno mjeriti i reagirati ukoliko njena vrijednost prijeđe zakonom dozvoljene vrijednosti. Najviše dopuštene razine buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave određene su Pravilnikom o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave i Pravilnikom o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu. Mjerenje buke na radnom mjestu ili u sredini u kojoj ljudi borave najčešće se mjeri zvukomjerima poput onog korištenog u našim mjerenjima. Nakon provedenih mjerenja i analize rezultata zaključujemo da je razina buke na Odjelu za fiziku unutar dozvoljenih vrijednosti na svim lokacijama, osim u uredima 56 i 61. Buka potječe od servera, a razina buke prelazi dopuštenu vrijednost od 45 dB(A) za 2,0 dB(A) u uredu 56 i 2,6 dB(A) u uredu 61. Korištenjem osobnih zaštitnih sredstava, kao što su naušnjaci i čepovi od spužvastog materijala ili voska može se očekivati slabljenje vrijednosti buke za 15-25 dB(A), odnosno 7-15 dB(A). Povoljna je okolnost što ta sredstva daju najveće slabljenje buke upravo na visokim frekvencijama, na koje je ljudsko uho najosjetljivije. Analiziranjem kumulativne razdiobe buke i interpretacijom vrijednosti statističkih percentila mogli smo zaključiti da je server izvor trajne, a ne periodične buke. Također, proučavanjem frekvencijskog spektra mogli smo vidjeti koje frekvencije najviše doprinose ukupnim razinama buke, ali i izračunati ukupne razine buke L_{Aeq} , L_{AFmax} i L_{AFmin} . Mjereći razinu buke servera na različitim udaljenostima potvrdili smo da se razina buke smanjuje s udaljenosti od izvora buke. Dok tehnološki razvoj uz sebe donosi sve veće vrijednosti razine buke, razvijaju se i sve suvremeniji mjerni instrumenti, metode mjerenja buke te načini brzog analiziranja buke i postupaka zaštite od buke. Važno je mjeriti buku kako bismo mogli spriječiti njeno štetno auralno i ekstraauralno djelovanje te kako bismo poboljšali kvalitetu života ljudi.

12.LITERATURA

*svim internetskim stranicama zadnji put je pristupljeno 5.3.2018.

1. Andreis, T., Plavčić, M., Simić, N., Fizika 3, Profil International Zagreb, 2012
2. Audiologs, Buka i karte buke, http://www.audiologs.com/ozrenbilan/03_buka.pdf
3. Audiologs, Chladnijeve figure, <http://www.audiologs.com/ozrenbilan/Chladni.pdf>
4. Audiologs, Fiziološka i psihološka akustika, http://www.audiologs.com/ozrenbilan/02_fiz.pdf
5. Berglund B., et al, Sources and effects of low-frequency noise, 1996
https://www.researchgate.net/publication/14558678_Sources_and_effects_of_low-frequency_noise
6. Bonačić Lošić, Ž., Valovi materije, <http://mapmf.pmfst.unist.hr/~agicz/PredNU11slike.pdf>
7. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Product Data, <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1752.ashx>
8. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, User manuals, 7820 Evaluator, <https://www.bksv.com/downloads/7820/user-manuals/7820-manual-english.pdf>
9. BYJU's, Electromagnetic waves, <https://byjus.com/physics/electromagnetic-waves/>
10. Charbonneau, J., Gaspar, R., Novak, C., Ule, H., A-weighting the equal loudness contours, 2012, https://www.researchgate.net/profile/Jeremy_Charbonneau/publication/224036149_A-weighting_the_equal_loudness_contours/links/55030adf0cf2d60c0e64c6e4/A-weighting-the-equal-loudness-contours.pdf
11. Cindro, N., Fizika Mehnik – Valovi – Toplina, Školska knjiga Zagreb, 1975
12. C/V ENT Surgical Group, <http://cvsurgicalgroup.com/wp-content/uploads/2016/01/Ear-anatomy.jpg>
13. Data Physicalization, List of Physical Visualizations and Related Artifacts, <http://dataphys.org/list/chladni-plates/>
14. Elberling, C., Worsoe, K., Iščeznuti zvuci – o sluhu i slušnim pomagalicama, Split, Bontech Research, 2008
15. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci, <http://dsp.etfbl.net/multimediji/2015/02%20GI%20Audio%20-%20percepcija%20i%20digitalizacija.pdf>

16. Ershaidat, N., Curves of equal loudness, Yarmouk University,
http://ctaps.yu.edu.jo/physics/courses/phys645/Supplements/Phys645_Suppl4_Curves_Equal_Loudness.pdf
17. Faj, Z., Pregled povijesti fizike, Pedagoški fakultet - Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, 1999.
18. Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb
http://www.fer.unizg.hr/download/repository/GLAK03_Osobine_sluha_2017-18.pdf
19. Get Revising, Longitudinal waves and Ultrasound, https://getrevising.co.uk/revision-notes/longitudinal_waves_and_ultrasound
20. Glumac, Z., Matematičke metode fizike – kratak uvod, Osijek
<http://gama.fizika.unios.hr/~zglumac/ummf.pdf>
21. Hong, O., et al, Understanding and preventing noise-induced hearing loss, 2013,
<http://dharweb.soc.northwestern.edu/bibCat/pdf/1834.pdf>
22. Horvat, D., Hrupec D., Fizika 3, Deodidacta Zagreb, 2014.
23. Hrvatska enciklopedija, Vinko Dvořák, Leksikografski zavod Miroslav Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=16785>
24. Hyperphysics, Frequencies for maximum sensitivity of human hearing,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/maxsens.html>
25. Jambrošić, K., Zvuk i okoliš: Analiza zvuka, <http://www.zmz.hr/download/analiza-zvuka.pdf>
26. Jambrošić, K., Zvuk i okoliš: Utjecaj buke na čovjeka, www.zmz.hr/download/utjecaj-buke-na-covjeka.pdf
27. Jelaković, T., Zvuk, sluh, arhitektonska akustika, Školska knjiga Zagreb, 1978
28. Kirin, S., Lauš, K., Istraživanje razine buke u tehnološkom procesu šivanja, Sigurnost, 53, 2011, 3, 243-250
29. Kroemer, K.H.E., Grandjean, E., Prilagođavanje rada čovjeku, Ergonomski priručnik, Ed. I. Manenica, Split, 1999.
30. Krsnik, R., Fizika 3, Školska knjiga Zagreb, 1998
31. Krsnik, R., Suvremene ideje u metodici nastave fizike, Školska knjiga Zagreb, 2008
32. Kršulja, M., Buka – fizikalne štetnosti 1. dio, Odjel Sigurnosti na rad – Veleučilište u Rijeci,
https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni_materijali/k_sigurnost_2/buka%202017.pdf

33. Leventhall, G., A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, 2003,
https://www.researchgate.net/publication/237245317_A_Review_of_Published_Research_on_Low_Frequency_Noise_and_its_Effects
34. Mannell, R., Spectral analysis of sound, Macquarie University,
<http://clas.mq.edu.au/speech/acoustics/frequency/spectral.html>
35. Manwell, J., Rogers, A., Wright S., Wind turbine acoustic noise, 2002,
http://www.theproblemwithwindpower.com/info/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf
36. Matijević, D., Poljak, S., Fourierov red i Fourierova transformacija, 2011,
<https://hrcak.srce.hr/file/121546>
37. Mijić, M., Akustika u arhitekturi, Nauka Beograd, 2001.
38. Mijović, B., Primijenjena ergonomija, Karlovac, 2009.
39. Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje obrazovanja, Nastavni programi za gimnazije, Ministarstvo kulture i prosvjete, Republika Hrvatska, 1994,
<https://www.ncvvo.hr/nastavni-planovi-i-programi-za-gimnazije-i-strukovne-skole/>
40. Narodne novine, Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave (NN br. 145/2004), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2004_10_145_2548.html
41. Narodne novine, Pravilnik o djelatnostima za koje je potrebno utvrditi provedbu mjera za zaštitu od buke (NN br. 91/2007), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_09_91_2776.html
42. Narodne novine, Pravilnik o uvjetima glede prostora, opreme i zaposlenika pravnih osoba koje obavljaju stručne poslove zaštite od buke (NN br. 91/07),
https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2007_09_91_2778.html
43. Narodne novine, Pravilnik o zaštiti radnika od izloženosti buci na radu (NN br. 145/04 i 46/08), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_04_46_1577.html
44. Narodne novine, Zakon o zaštiti od buke (NN br. 30/09, 55/13, 153/13, 41/16)
45. Nelson, DI., Nelson, RY., Concha-Barrientos, M., Fingerhut M., The global burden of occupational noise – induced hearing loss, 48, 2005, 6, 446.-458.
http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/global/6noise.pdf

46. Paar, V., Fizika 3, Školska knjiga Zagreb, 2007.
47. Paić, M., Gibanja, sile, valovi, Školska knjiga Zagreb, 1997
48. Persson Waye, K., et al, Does low frequency noise during work induce stress?, 2000,
<http://www.conforg.fr/internoise2000/cdrom/data/articles/000528.pdf>
49. Pierce, A.D., Acoustic: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, The Wave Theory of Sound, <http://asa.aip.org/pierce.html>
50. Pionić, O., Širenje zvuka u morskoj vodi, 2004, <https://hrcak.srce.hr/8439>
51. Planinić, J., Osnove fizike 3, Filozofski fakultet - Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, 2005.
52. Polajnar, I., i sur., Buka na radnom mjestu zavarivača, Sigurnost, 49, 2007., 2, 113-124.
53. Porta Contreras, A., Stern Forgach, C., Fundamentals of Physics – Vol.1, Principles of Acoustics, <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-06b-01-05.pdf>
54. Pro Audio Encyclopedia, The History of Audio and Sound Measurement,
<http://proaudioencyclopedia.com/the-history-of-audio-and-sound-measurement/>
55. Radanović, B., Fizikalne štetnosti buka, Zagreb, 2003.
56. Rienstra, S.W.; Hirschberg, A., An Introduction to Acoustics, Eindhoven University of Technology, 2015, <http://www.win.tue.nl/~sjoerdr/papers/boek.pdf>
57. St-Pierre, R., Maguire, D., The Impact of A-weighting Sound Pressure Level Measurements during the Evaluation of Noise Exposure
http://www2.electron.frba.utn.edu.ar/~jceccconi/Bibliografia/13%20-%20Medicion%20de%20Amplificadores/Documentos/Impact_Sound_Pressure.pdf
58. The Physics Classroom, The Human Ear,
<http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-2/The-Human-Ear>
59. ThingLink, Annotate images and videos,
<https://www.thinglink.com/scene/368796539906162690>
60. University of Southampton, Soundwaves, <http://blog.soton.ac.uk/soundwaves/wave-basics/point-sources-inverse-square-law/>
61. Walker, J., Halliday, D., Resnick, R., Fundamentals of Physics, 10th edition, Cleveland State University, 2013.
62. Zavod za primijenjeno računarstvo, Buka na radnom mjestu, Zagreb
http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/pivac/instrumenti_page.htm

ŽIVOTOPIS

Ivana Knezović rođena je 31. ožujka 1994. godine u Osijeku. Osnovnu školu „Vladimir Nazor“ završila je u Čepinu. Po završetku osnovne škole upisala je Jezičnu gimnaziju u Osijeku. 2012. godine upisala se kao redoviti student na Preddiplomski sveučilišni studij fizike Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku koji je završila 2015. godine i stekla titulu sveučilišne prvostupnice (baccalaurea) fizike. Iste godine upisala je Diplomski sveučilišni studij fizike i informatike.