Stručni rad

Akustika prostora

Sonja Iža

Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti u Osijeku

Sažetak

Zvuk je temeljni oblik ljudske komunikacije i važan dio svakodnevnog života. Akustika proučava nastanak, širenje i percepciju zvuka te način na koji prostorni uvjeti utječu na njegovu kvalitetu. Kvaliteta akustike ovisi o više čimbenika, među kojima se ističu volumen, oblik i materijali prostorije te trajanje odjeka, koje predstavlja jedan od ključnih pokazatelja akustičkih svojstava prostora. Pravilnim oblikovanjem i planiranjem prostora moguće je postići ravnotežu između izravnog i reflektiranog zvuka, čime se osigurava jasnoća, ugodnost i razumljivost. Cilj rada je prikazati osnovne pojmove i parametre akustike prostora te naglasiti važnost pravilnog akustičkog oblikovanja za kvalitetu slušanja i govora. Poseban naglasak stavljen je na obrazovne prostore, u kojima akustički uvjeti izravno utječu na razumljivost govora i koncentraciju učenika. Dobro osmišljena akustika stoga predstavlja važan čimbenik učinkovitog učenja i ugodnog boravka u prostoru. Budući da je akustička kvaliteta prostora usko povezana s time kako se zvuk u njemu širi, važno je razumjeti procese refleksije, apsorpcije i difuzije zvuka. Na te pojave utječu arhitektonski oblici, korišteni materijali i raspored površina, što znači da se akustika prostora može značajno poboljšati promišljenim dizajnom. Upravo zato se u planiranju suvremenih učionica i logopedskih kabineta sve više naglasak stavlja na kontrolu odjeka, razine buke i kvalitetu govornog signala, kako bi se stvorilo okruženje koje podržava učinkovito učenje i optimalan razvoj komunikacijskih vještina. Time se akustika promatra ne samo kao tehničko, nego i kao psihološko i edukacijsko pitanje.

Ključne riječi: *akustika prostora; govor; slušanje; zvuk*

1.Uvod

Fizika zvuk definira kao poremećaj ravnotežnog položaja čestica materije koji nastaje mehaničkim titranjem, a zatim se širi kroz elastični medij [10]. Takvo fizikalno tumačenje opisuje zvuk kao pojavu koja postoji neovisno o slušatelju, pri čemu se promjene u materiji prenose kroz zrak ili neki drugi elastični medij. Prema drugom tumačenju, zvuk se objašnjava s perceptivnog gledišta te se pojam zvuka definira kao svaki podražaj koji čovjek doživljava mehaničkim dijelom svojega osjetila sluha. U funkcionalnom smislu, ovom se definicijom pojam zvuka povezuje s procesom percepcije [8]. Time se naglašava razlika između fizičkog postojanja zvuka i njegova psihološkog doživljaja kod čovjeka. Zvuk, koji nastaje titranjem čestica u elastičnoj sredini, temeljni je oblik ljudske komunikacije. U današnjem svijetu gotovo je nemoguće zamisliti situaciju bez prisutnosti zvuka, što potvrđuje njegovu ključnu ulogu u čovjekovu svakodnevnom životu [15]. Drugim riječima, zvuk nije samo fizikalna pojava, nego i bitan dio ljudske percepcije, izražavanja i društvene interakcije. Ljudsko uho može percipirati zvukove u frekvencijskom rasponu od približno 20 do 20 000 herca (Hz). Sve što je ispod 20 Hz se naziva infrazvuk, a sve što odnosi na veću frekvenciju odnosno iznad 20 000 Hz se naziva ultrazvuk. Cilj rada je prikazati temeljne akustičke pojmove i parametre vezane uz širenje i ponašanje zvuka u zatvorenim prostorima te objasniti kako oblik, volumen i materijali prostorije utječu na kvalitetu zvuka. Poseban naglasak stavlja se na akustičke zahtjeve obrazovnih prostora i logopedskih kabineta, kako bi se istaknula važnost pravilnog akustičkog oblikovanja za razumljivost govora, kvalitetu komunikacije te učinkovitost procesa učenja i terapijskog rada.

2.Akustička svojstva prostora

Akustika je znanstvena disciplina koja proučava kako zvuk nastaje, kako se prenosi, kako se može nadzirati te kako ga ljudi opažaju [4].. Brkić i Vladić-Mandarić (2022) također opisuju akustiku kao znanosti koja se bavi proučavanjem nastanka zvuka, načinima kako se on širi te sami prijem zvuka. Akustika proučava i iznimno niske i vrlo visoke vibracije i valove, odnosno procese koji omogućuju da ti signali postanu čujni. Zvuk i valovi koji ga čine primjenjuju se, među ostalim, u obliku ultrazvuka za ispitivanje materijala te u medicini za prikaz i dijagnostiku. U njezino područje spada i infrazvuk odnosno duboke vibracije Zemlje koje ljudsko uho ne može registrirati [22]. Akustika prostora proučava kako postići da zvuk u prostoriji bude ugodan i jasan za slušanje. Kada se zvučni valovi odbijaju od površina, njihov se smjer i intenzitet razlikuju ovisno o strukturi materijala. Glatke površine stvaraju jasne refleksije, hrapave plohe uzrokuju difuznu refleksiju, dok apsorpcijski materijali upijaju dio zvučne energije i tako smanjuju odjek.

Jedan od najvažnijih čimbenika je trajanje odjeka. Odjek je vrijeme tijekom kojeg se zvuk zadržava u prostoriji nakon što izvor prestane s emitiranjem. On nastaje zbog refleksije zvučnih valova od zidova, stropa i drugih površina, pri čemu se pri svakoj refleksiji energija zvuka smanjuje. U učionicama i predavaonicama određena količina odjeka može biti korisna jer pomaže da govor dopre do udaljenijih dijelova prostorije. Međutim, predug odjek smanjuje razumljivost govora, slogovi se preklapaju i postaje teže razumjeti izgovoreno [2]. Akustika zatvorenog prostora obilježena je refleksijom

zvučnih valova od zidova, što uzrokuje pojačanje zvuka koje se razlikuje ovisno o frekvenciji i drugim svojstvima samog zvuka. Takvi prostori mogu promijeniti boju tona izvora zvuka, smanjiti razumljivost govora, ali istovremeno dati glazbi veću punoću i toplinu [1].

3. Parametri i čimbenici akustičke kvalitete

Kako bi se postigla optimalna akustička kvaliteta prostora, nužno je planirati i modelirati prostor u skladu s njegovom namjenom. Glavni cilj modeliranja akustike prostora jest stvaranje akustički kvalitetnijih okruženja, ne samo u koncertnim dvoranama i kazalištima, nego i u učionicama, javnim prostorima te domovima [18]. Akustička obilježja prostorije ovise o trima čimbenicima: odjeku (reverberaciji), obliku prostora i volumenu prostorije [20]. S obzirom na navedeno, pri procjeni akustike prostora prema Internation Standardization for Organization (2008) neki od ključnih pokazatelja kvalitete zvuka su:

• Vrijeme odjeka – RT60, T30, T20 [sekunde, s] – određuje koliko dugo zvuk ostaje u prostoru nakon prestanka izvora.
• Vrijeme ranog opadanja – EDT [s] – pokazuje brzinu početnog slabljenja zvuka i dojam "živosti" prostora.
• Centralno vrijeme – TS [s] – mjeri odnos između rane i kasne zvučne energije.
• Jasnoća – C50, C80 [decibel, dB] – prikazuje koliko je zvuk (govor ili glazba) jasan; C50 se odnosi na govor, a C80 na glazbu.
• Definiranost – D50 [%] – pokazuje udio rane zvučne energije (u prvih 50 ms) u ukupnoj energiji.
• Pojačanje – G [dB] – opisuje koliko prostor pojačava zvuk u odnosu na otvoreni prostor.
• Udio bočne energije – LF, LFC [%] – pokazuje koliko energije dolazi iz bočnih smjerova, što utječe na prostorni doživljaj zvuka.
• Interauralni koeficijent križne korelacije – IACC – mjeri razliku signala koji dolazi do lijevog i desnog uha, a time i dojam širine i prostornosti zvuka.

4.Akustika velikih i malih prostora

Akustika prostora najčešće se razmatra kroz dvije osnovne skupine prostorija. U prvu skupinu ubrajaju se manji prostori poput multimedijskih soba, studija, kontrolnih režija, prostorija za snimanje, slušaonica te kabina za simultano prevođenje. Druga skupina odnosi se na velike prostore, primjerice koncertne dvorane, kazališta, crkve i druge objekte velikog volumena namijenjene okupljanju većeg broja ljudi [12]. Utvrđeno je da su u dvoranama namijenjenima govoru poželjna kraća vremena odjeka, dok se u glazbenim prostorima optimalne vrijednosti razlikuju s obzirom na vrstu glazbe. Nakon provedene usporedbe i analize različitih prostora i akustičkih pokazatelja, zaključeno je da upravo vrijeme odjeka predstavlja ključni parametar za procjenu akustičkih svojstava prostorije [17]. Što se tiče oblika koncertnih dvorana zaključuje se da prostorije trapeznog ili lepezastog oblika pružaju najbolje akustičke uvjete jer omogućuju ravnomjernu raspodjelu zvuka i dobru čujnost u cijelom prostoru. Djelomično lepezasti oblici daju zadovoljavajuće rezultate, dok su eliptični, kružni i konkavni prostori akustički nepovoljniji zbog neravnomjerne refleksije zvuka. Na akustička svojstva prostora utječu uređaji koji mogu stvarati buku i namještaj unutar

prostorije, kao i prisutnost ili odsutnost jeke. Važnu ulogu imaju i vrsta prozora i vrata, visina stropa te materijali od kojih su izrađeni zidovi i strop. Osim toga, akustika ovisi i o veličini i obliku prostora, odnosno o cjelokupnom arhitektonskom rješenju zgrade ili prostorije [6]. Da bi boravak u dvorani bio ugodan, potrebno je spriječiti neželjene vibracije zidova, prodor zvuka kroz građevinske elemente ili širenje zvuka metalnim strukturama. Cilj je onemogućiti ulazak složenih i neusklađenih zvučnih valova u prostor. Građevinski akustičari rješenje vide u postizanju odgovarajuće zvučne izolacije, koja se najčešće izražava pomoću zvučne izolacijske moći (Rw) u decibelima (dB**)**. Ta vrijednost pokazuje koliko neki materijal smanjuje razinu buke. Na primjer, obična prozorska stakla mogu smanjiti buku za oko 30 dB**.** Zvučna izolacijska moć fizikalna je veličina koja opisuje sposobnost građevinskih elemenata (zidova, stropova, međukatnih konstrukcija, prozora i sl.) da spriječe prijenos zvuka, a određuje se u laboratorijskim uvjetima [19]. Loši akustički uvjeti u učionici ne utječu samo na učenike, nego i na nastavnike. U prostorima s nepovoljnom akustikom nastavnici često pojačavaju glas, što uzrokuje veći napor, stres i zamor, a dugoročno može dovesti i do oštećenja glasovnog sustava. Nasuprot tome, u [1]učionicama s dobrim akustičkim uvjetima proces učenja postaje lakši, učinkovitiji i manje zamoran, a usvojeno znanje dugotrajnije ostaje zapamćeno [9]. Prema Bradleyevom istraživanju (2002), vrijeme odjeka u učionicama u Sjedinjenim Američkim Državama kreće se od približno 0,3 do više od 1,5 sekundi, pri čemu su vrijednosti izraženije pri nižim nego pri višim frekvencijama. Autor također navodi da se razina buke u praznim učionicama noću i tijekom vikenda kreće između 30 i 35 A-ponderirane razine zvuka (dBA[1]), povećava se na 40 do 50 dBA kada su aktivni sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije, te doseže između 55 i 75 dBA u učionicama u kojima se odvija nastava, odnosno kada su prisutni nastavnici i učenici. S druge strane, prema istraživanju Berga i sur. (1996) razine buke u učionicama u Engleskoj i Francuskoj, a ne uključujući govor nastavnika, ovise o vrsti aktivnosti učenika te se kreću od oko 42 dBA do više od 63 dBA. Isti autori navode da se vrijeme odjeka u praznim učionicama kreće između 0,28 i 1,55 sekundi, dok se u učionicama s učenicima smanjuje na vrijednosti između 0,25 i 0,98 sekundi. Na Slici 4 prikazan je logopedski kabinet te su preporuke da treba biti osmišljen tako da se stvori ugodno, poticajno i sigurno okruženje uz naglasak na optimalnu akustiku prostora koja je ključna za učinkovitost terapije.

5.Modeliranje, auralizacija i uvjeti za kvalitetnu akustiku

U kontekstu govorne akustike i vokalne ergonomije, važnu ulogu imaju i uvjeti u kojima se glas koristi. Prema Vilkmanu (2004), vokalni ergonomski čimbenici obuhvaćaju različite uvjete i navike koji mogu nepovoljno utjecati na glasovnu funkciju i dovesti do pojave laringealnih tegoba. Ti čimbenici uključuju lošu kvalitetu zraka u prostoru, nepovoljnu akustiku prostorije, govorenje u bučnom okruženju, dugotrajnu uporabu glasa bez dovoljnog odmora, nepravilno držanje tijela te nedostatak tehničkog pomagala kao što je pojačivač glasa. Posebno mjesto u suvremenom pristupu akustičkom projektiranju zauzima auralizacija. Kleiner i sur. (1993) definiraju auralizaciju kao proces kojim se pomoću modeliranja predviđaju i procjenjuju akustička svojstva prostora, omogućujući realističnu simulaciju zvuka u prostoru koji se planira ili projektira. Postoji računalni model koncertne dvorane koji vizualizira širenje i refleksiju zvučnih valova između izvora na pozornici i slušatelja u prostoru, čime se

[1] dB (decibel) označava osnovnu mjeru jačine zvuka, dok dBA predstavlja A-ponderiranu razinu zvuka koja približava mjerenje osjetljivosti ljudskog uha na različite frekvencije.

prikazuje način na koji se zvuk rasprostire i vraća s površina dvorane. Kada se govori o osnovnim vrstama zvučnih polja, Geza (1985) razlikuje slobodno i difuzno zvučno polje. Slobodno zvučno polje je prostor u kojem se zvuk širi bez značajnog utjecaja prepreka. Da bi se takvi uvjeti ostvarili u zatvorenoj prostoriji, zidovi moraju gotovo u potpunosti apsorbirati zvuk i spriječiti rezonancije. To se postiže klinastim apsorberima čija duljina iznosi otprilike četvrtinu valne duljine najniže frekvencije koju želimo obraditi. Kod klinova od oko 50 cm refleksije su učinkovito prigušene iznad približno 170 Hz, dok se niže frekvencije i dalje reflektiraju. U slobodnom zvučnom polju jačina zvuka opada za oko 6 dB pri svakom udvostručavanju udaljenosti od izvora, a zvuk se širi u obliku kružnih valova. Difuzno zvučno polje nastaje u prostorima u kojima zidovi i druge površine vrlo dobro reflektiraju zvuk. Brojne refleksije stvaraju dojam kao da postoji mnogo izvora zvuka, pa dolazi do miješanja valova i nastanka odjeka. U takvom polju razina zvuka ne ovisi o udaljenosti od izvornog zvuka jer se reflektirani valovi stalno nadovezuju. Difuzno polje može nastati i kad površine samo djelomično upijaju zvuk, a njegova ključna značajka je vrijeme odjeka, tj. trajanje reflektiranog zvuka u prostoru (Geza, 1985). Kada se govori o raspodjeli zvuka u prostoriji, važno je da zvuk do slušatelja dopire što kraćim putem. Prostorija tlocrtnog oblika početku se može činiti povoljnim rješenjem, jer su zvučne zrake od govornika do najudaljenijih slušatelja gotovo jednake duljine. Ipak, takva prostorija nije akustički ispravna. Da bi svi slušatelji mogli jasno čuti govornika, trebaju se nalaziti unutar kuta od približno ±45° ispred izvora zvuka. U protivnom, velik dio prostorije ostaje izvan tog područja, što dovodi do slabe čujnosti i lošije akustike. Jelaković (1978, prema Koški i Perak, 2010) navodi više međusobno povezanih uvjeta koje je potrebno ispuniti kako bi se u nekoj prostoriji postigla kvalitetna akustika. Prije svega, prostor mora biti oslobođen svih izvora buke, kako unutarnje tako i vanjske, jer svaka neželjena buka narušava jasnoću i čistoću zvuka. Važno je i da zvuk bude dovoljno glasan i ravnomjerno raspoređen po cijelom prostoru, što znači da i udaljenija mjesta od izvora trebaju imati jednaku razinu čujnosti. To se postiže pravilnim usmjeravanjem i reflektiranjem zvuka s odgovarajuće postavljenih ploha u prostoriji. Osim toga, u prostoru ne smije biti jeke niti neželjenih rezonancija, jer one mogu iskriviti prirodni dojam zvuka. Posebno je važno da odjek bude dovoljno kratak kako bi se spriječilo preklapanje uzastopnih tonova u govoru ili glazbi. Stoga se mora uspostaviti uravnotežen odnos između izravnog i reflektiranog zvuka, čime se osigurava jasnoća, ugodnost i prirodnost akustičkog doživljaja (Jelaković, 1978; prema Koški i Perak, 2010).

6.Zaključak

Zvuk je važan dio ljudskog života, komunikacije i okruženja u kojem svakodnevno boravimo. Akustika, kao znanstvena disciplina, omogućuje razumijevanje načina na koji se zvuk stvara, širi i doživljava te kako se prostor može oblikovati tako da pruža ugodan i jasan zvučni doživljaj. Kvaliteta akustike prostora ovisi o više čimbenika – prije svega o obliku, volumenu i materijalima prostorije, ali i o trajanju odjeka, koje se pokazuje kao ključni parametar pri procjeni akustičkih svojstava. Razvojem suvremenih računalnih tehnologija omogućeno je modeliranje i auralizacija prostora, čime se već u fazi projektiranja mogu predvidjeti i poboljšati akustička svojstva prostorije. Takav pristup pridonosi stvaranju funkcionalnih i ugodnih prostora za boravak, rad i učenje. U obrazovnim prostorima akustika ima posebno značenje jer utječe na razumljivost govora, koncentraciju učenika i glasovno zdravlje nastavnika. Loši akustički uvjeti povećavaju napor i smanjuju učinkovitost, dok dobro akustički oblikovane učionice omogućuju lakše i ugodnije učenje. Zaključno, akustika prostora nije samo tehnički, već i pedagoški i društveni aspekt planiranja prostora. Pažljivo osmišljena akustika doprinosi boljoj komunikaciji, većoj učinkovitosti i općenito kvalitetnijem boravku u svakom prostoru.

7.Literatura

[1.] Akustika prostora. U: Filmska enciklopedija [Internet]. Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža; 1986–1990 [citirano 2026 Jan 17]. Dostupno na: https://filmska.lzmk.hr/clanak/akustika-prostora

[2.] Akustika. U: Hrvatska enciklopedija [Internet]. Zagreb: Leksikografski zavod Miroslav Krleža; 2013–2025 [citirano 2026 Jan 13]. Dostupno na: https://enciklopedija.hr/clanak/akustika

[3.] Berg F, Blair J, Benson P. Classroom acoustics: The problem, impact, and solution. Lang Speech Hear Serv Sch. 1996;27(1):16-20. doi:10.1044/0161-1461.2701.16.

[4.] Berg RE. Acoustics. U: Encyclopaedia Britannica [Internet]. 2025 May 27 [citirano 2026 Jan 25]. Dostupno na: https://www.britannica.com/science/acoustics

[5.] Bradley JS. Optimising sound quality for classrooms. U: Proceedings of the XX Meeting of SOBRAC. 2002. str. 1-15. Dostupno na: https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=cb8703be-2eb7-45d8-a769-84d69261fd3a

[6.] Branković A. Utjecaj buke i mikroklime na kvalitetu glasa kuharica u studentskom restoranu [diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Edukacijsko-rehabilitacijski fakultet; 2018. Dostupno na: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:158:101440

[7.] Brkić S, Vladić-Mandarić L. Akustika glazbe. U: M-INISTAR 2014: Zbornik radova. Istočno Sarajevo: Muzička akademija Univerziteta u Istočnom Sarajevu; 2014. str. 117-129.

[8.] Dinulović P. Zvučni prostor. e-zbornik. 2014;(28). Dostupno na: https://fdu.bg.ac.rs/uploads/files/Institut/ezbornik/Zbornik%2028/Pavle%20Dinulovi%C4%87_ZVU%C4%8CNI%20PROSTOR.pdf
[9.] Drinčić D, Krstić S, Ivanović M. Akustičke karakteristike učionica VIŠER. U: Telekomunikacioni forum TELFOR 2010: Zbornik radova. 2010. str. 1049-1052. Dostupno na: http://2010.telfor.rs/files/radovi/TELFOR2010_09_33.pdf
[10.] Encyclopedia Britannica Ultimate Reference Suite [DVD]. Chicago: Encyclopaedia Britannica; 2014.
[11.] Geza D. Akustika prostora u rehabilitaciji učenika. Defektologija. 1985;21(2):117-122. Dostupno na: https://hrcak.srce.hr/file/159602
[12.] Grbec S. Kako čujemo prostor? Eho. 2012;(2):44-46. Dostupno na: https://hrcak.srce.hr/file/399119
[13.] International Organization for Standardization. ISO 3382-2:2008 Acoustics—Measurement of room acoustic parameters—Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Geneva: ISO; 2008. Dostupno na: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:3382:-2:ed-1:v1:en
[14.] Kleiner M, Dalenbäck BI, Svensson P. Auralization – an overview. J Audio Eng Soc. 1993;41(11):861-875. Dostupno na: https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=6976
[15.] Koški Ž, Perak M. Poboljšanje akustike prostorija apsorpcijskim materijalima i elementima. Electron J Fac Civ Eng Osijek e-GFOS. 2010;1(1):101-114. Dostupno na: https://hrcak.srce.hr/63230
[16.] Logopedski kabinet Binga. Objava na Facebooku [Internet]. 2025 Nov 17 [citirano 2025 Nov 17]. Dostupno na: https://www.facebook.com/p/Logopedski-kabinet-Binga-61551426562077/
[17.] Mirnik M. Analiza akustičnih lastnosti prostorov za njihovo prilagajanje različnim namembnostim [diplomski rad]. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; 2017. Dostupno na: https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=99352&lang=slv
[18.] Savioja L, Svensson UP. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. J Acoust Soc Am. 2015;138(2):708-730. doi:10.1121/1.4926438.
[19.] Slovenec B, Smernić K, Radović N. Igra zvuka i prostora. Poučak. 2017;18(69):71-79. Dostupno na: https://hrcak.srce.hr/file/279557
[20.] Veršić Z. Akustična ugodnost prostora. U: Lakušić S, urednik. Zbornik sažetaka predavanja 15. Dana Hrvatske komore inženjera građevinarstva. Zagreb: Hrvatska komora inženjera građevinarstva; 2021. str. 156. Dostupno na: https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2021/prezentacije/01-web_prezentacije/Izazovi%20gra%C4%91evinske%20fizike/Akusti%C4%8Dna%20ugodnost%20prostora.pdf
[21.] Vilkman E. Occupational safety and health aspects of voice and speech professions. Folia Phoniatr Logop. 2004;56(4):220-253. doi:10.1159/000078344.
[22.] Xiang N, Sessler GM. Acoustics, Information, and Communication. Cham: Springer; 2015.