

Fizička akustika

1.1 Uvod

Osnovni cilj ovog poglavlja je da se na što jasniji i precizniji način, pre svega, definišu fizičke veličine koje su relevantne za nastajanje, prostiranje i prijem zvučnih talasa. Tako se u prvom delu poglavlja govori o prirodi zvuka i nastajanju i prostiranju zvučnih talasa da bi se potom pristupilo objašnjenju pojedinih veličina (zvučni pritisak, brzina zvuka, frekvencija, period i talasna dužina, amplituda i faza, snaga, usmerenost i ugao zračenja zvučnog izvora, intenzitet i nivo zvuka) karakterističnih za zvučne pojave. Zatim su definisani prost i složen zvuk, i objašnjeni uslovi koji nastaju pri jednovremenom zračenju više izvora zvuka.

U drugom delu ovoga poglavlja govori se o slabljenju zvuka pri prostiranju u otvorenom prostoru kao i pojavama koje prate prostiranje zvuka u prirodi (difrakcija, refrakcija refleksija, difuzija, apsorpcija). Na kraju su objašnjene pojave interferencije i izbijanja zvučnih talasa, nastajanje stojećih talasa, Doplerovog efekta i udarnih talasa.

U celini ovo, prvo poglavlje, treba da bude prvi korak ka pručavanju pojava koje prate nastajanje i prostiranje zvučnih talasa, pre svega u vazduhu, a zatim i u drugim sredinama.

1.2 Priroda zvuka

Zvuk ima dvoju prirodu i može se posmatrati kao fizički vremenski promenljivi poremećaj neke elastične sredine ili kao subjektivni, psihofizički osećaj, nastao usled stimulacije akustičkog centra u mozgu pomoću nervnih impulsa. Čulo sluha određuje kvalitet zvučnog signala, ali zvuk se prenosi do uha putem fizičkih nadražaja.

U užem smislu reči, pod zvukom podrazumevamo sve ono što čujemo, odnosno što osećamo sluhom. Ovakva definicija je svakako nepotpuna, jer ne obuhvata zvukove koje čulo sluha ne može percipirati, a takođe ne objašnjava ni fizičku prirodu zvuka.

Ako zvuk posmatramo kao fizičku pojavu onda možemo reći da se radi o vibracijama u gasovitim, tečnim i čvrstim elastičnim sredinama. Takođe možemo reći da zvuk predstavlja ritmičko oscilovanje molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju međumolekulske sile [3].

Preduslov za takvu oscilatornu pojavu je masa molekula, odnosno čestica koje osciluju i učestvuju u kretanju svojom inercijom, i postojanje unutrašnjih elastičnih sila koje teže da sredinu vrate u početno stanje kakvo je bilo pre deformacije. Zato se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati u gasovima, tečnostima i čvrstim telima. Zvuk ne može postojati u vakuumu, jer nema mase koja bi mehanički oscilovala, i u amorfnim telima, jer nema unutrašnjih elastičnih sila da vraćaju sredinu u početno stanje nakon nastanka deformacije [19].

1.3 Prenos zvučne energije

Promene fizičkog stanja sredine (gde ćemo se za sada ograničiti na vazduh) ispoljavaju se bilo u kretanju čestica (pri čemu se može posmatrati njihov pomeraj, brzina i ubrzanje) bilo u promeni njene gustine ili pritiska.

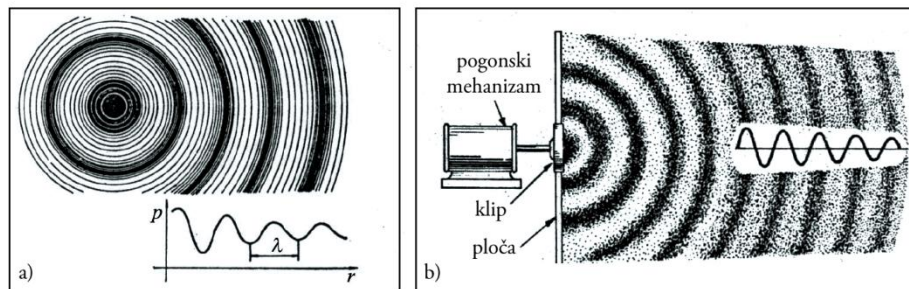
Uzrok promena su pomeraji, najčešće oscilovanje ili vibracije nekog tela, kao što su recimo, elastična metalna traka, žice na muzičkim instrumentima, glasne žice, membrane zvučnika ili slušalica, i slično, slika 1.1. Telo koje osciluje ili vibrira pomera čestice vazduha koje su neposredno u njegovoj okolini, ove čestice pomeraju one u susednim slojevima i tako se pojava deformacije sredine prenosi na daljinu. Pri tome čestice sredine ne putuju na daljinu, već samo osciluju (slično kao klatno) oko svojih ravnotežnih položaja.



Slika 1.1 - Vibracije kao izvor zvuka [9]

Radi detaljnijeg sagledavanja ove pojave uzмимо kao primer izvora zvuka loptu koja pulsira odnosno naizmenično povećava i smanjuje svoju zapreminu, slika 1.2a. Kada lopta povećava svoju zapreminu čestice vazduha koje se nalaze neposredno uz površinu lopte bivaju potisnute radijalno od središta u svim pravcima. Na taj način gustina sloja vazduha uz površinu lopte biva povećana. Usled dejstva međusobnih elastičnih sila sada čestice vazduha iz zgusnutog sloja oko lopte pomeraju svoje susedne čestice radijalno dalje od centra lopte, povećavajući gustinu sledećeg udaljenijeg sloja. Tako se dejstvo lopte, koja je povećala zapreminu, prenosi na daljinu sa sloja na sloj vazduha.

U sledećoj fazi ciklusa pulsiranja nastaje smanjenje zapremine lopte. Povlačenjem površine lopte nazad prema centru nastaje praznina koju odmah popunjavaju čestice najbližeg sloja vazduha. Na njihovo mesto, zbog nastalog razređenja dolaze zatim čestice sledećeg daljeg sloja itd. U ovoj fazi ciklusa čestice vazduha se pomeraju u suprotnom smeru (prema lopti), i zona razređenog vazduha se širi koncentrično odmah iza zgušnjavanja koje se dešavalo u prethodno opisanoj fazi ciklusa. Pri tome su se čestice sredine prvo pomerile iz svog ravnotežnog položaja radijalno dalje od centra lopte a potom su se vratile nazad, prošle kroz svoje ravnotežne položaje i dospele u prostor bliže centru lopte koji je nastao smanjenjem njene zapremine.



Slika 1.2 - Izvori zvuka: a) pulsirajuća lopta,
b) pokretni klip u ploči velikih dimenzija

Cela pojava se zatim ciklično ponavlja, a nastale promene se šire sve dalje u prostor u kome kažemo da se javlja *zvučno polje*.

Sličnu situaciju imamo kada se kruti klip, ugrađen u ploču velikih dimenzija kreće napred-nazad, slika 1.2b.

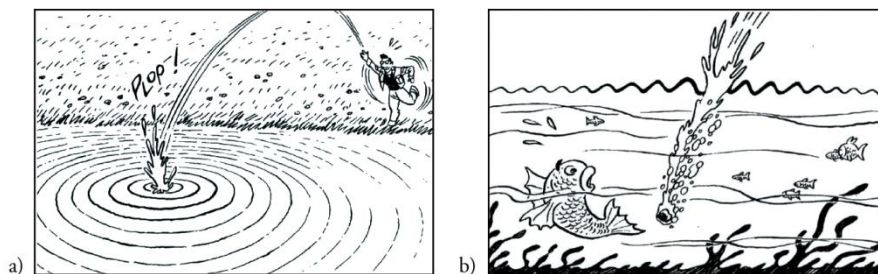
1.4 Zvučni talasi

Sabijanje čestica vazduha dovodi do povećanja, a njihovo razređivanje do smanjenja pritiska vazduha. Ovo naizmenično povećavanje i smanjivanje pritiska vazduha koje se prenosi od izvora zvuka dalje kroz vazdušni prostor, nazivamo zvučnim talasima. Pojava prostiranja talasa prividno stvara utisak da se čestice vazduha kreću stalno u jednom smeru. Međutim, to nije tačno; čestice vazduha pri tome osciluju, odnosno samo se pomeraju oko svojih ravnotežnih položaja.

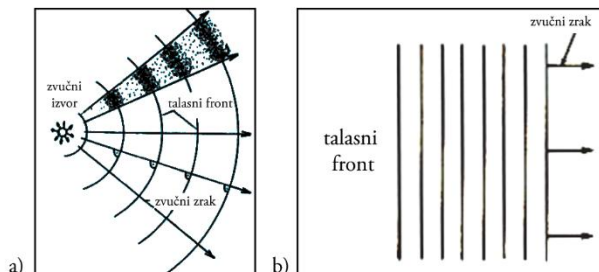
Pojava je sasvim slična talasima na vodi koji bi se dobili kada se u mirnu vodu ubaci kamen, slika 1.3a. Javili bi se talasi u vidu koncentričnih krugova koji se šire određenom brzinom. Čestice vode se pri tom samo pomeraju gore – dole, slika 1.3b.

Slično, vetar promenljive jačine stvara talase koji se prostiru kroz žitno polje, ali pri tome glava svake stabljike samo vibrira napred – nazad.

Pri prostiranju zvučnih talasa jedan broj čestica je u istom delu vibracionog ciklusa (u istoj fazi oscilovanja). Te čestice pripadaju površini koja predstavlja *talasni front* ili *čelo talasa*. Dalje možemo zamisliti da se površina koja predstavlja talasni front sastoji iz velikog broja malih (elementarnih) površina. Put jedne elementarne površine talasnog fronta, normalan na talasni front, predstavlja *zvučni zrak* slika 1.4.

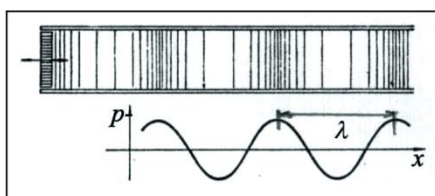


Slika 1.3 - Širenje talasa na vodi; čestice vibriraju gore – dole [9]



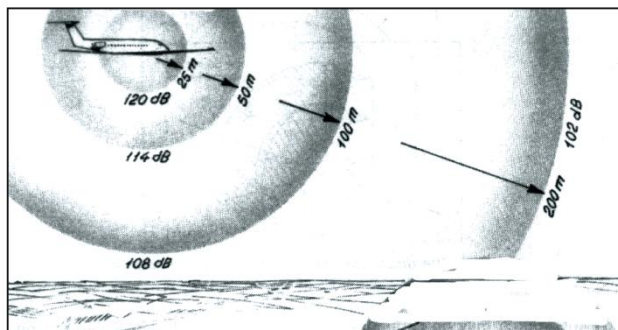
Slika 1.4 - Talasni front i zvučni zraci: a) sferni talasni front, b) ravanski talasni front; zvučni zraci su predstavljeni kao putanje elementarnih delova talasnog fronta

Prema prethodnoj definiciji ispadala da su sve tačke talasnog fronta na istom rastojanju od izvora zvuka. U prirodi se najčešće javljaju sferni talasi, čiji je talasni front površina sfere. Osobina ovih talasa je da se šire u svim pravcima od zvučnog izvora u prostor. Pulsirajuća lopta sa Slike 1.2a je izvor sfernih talasa. Takođe izvor sfernih talasa je i kruti klip u ploči velikih dimenzija, slika 1.2b. Sferne talase stvaraju i mnogi drugi izvori zvuka, bez obzira na njihov oblik, koje jednim imenom nazivamo *tačkastim izvorima zvuka*.



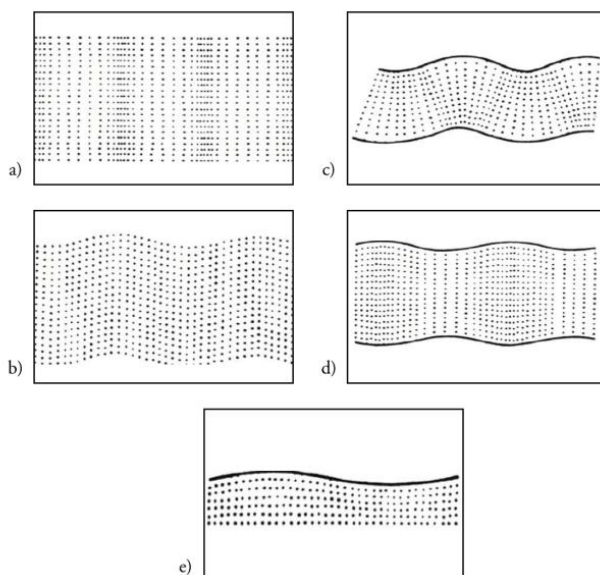
Slika 1.5 - Ravni talasi koje stvara kruta membrana u cevi

Ravanski talasi su druga, ne toliko česta vrsta zvučnih talasa koji predstavljaju najprostiju zvučnu pojavu. Za razliku od sfernih talasa, čiji je „talasni front” lopta, kod ravanskih talasa su i površina koja osciluje i njihov talasni front ravni. Ovi talasi su za praksu veoma važni. Ravanske talase stvara krut klip (klipna membrana), u cevi, pri pomeranju napred-nazad, kako je prikazano na slici 1.5.



Slika 1.6 - Avionski motor kao tačkasti izvor zvuka

Treba napomenuti da se udaljavanjem od zvučnog izvora, koji stvara sferne talase, površina talasnog fronta ispravlja, i na dovoljnom rastojanju od izvora sferni talas prelazi u ravanasku, što se i teorijski može pokazati, a što je šematski prikazano na slici 1.6. Na dovoljno velikim rastojanjima od izvora su dimenzije prijemnika (uvo ili mikrofona) jednake malom delu površine lopte koji se može smatrati ravnim.



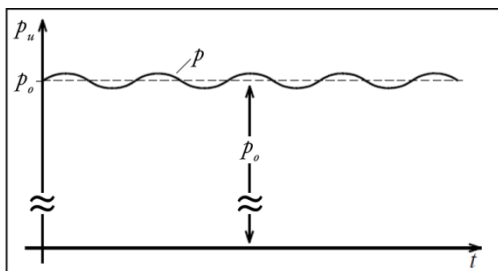
Slika 1.7 - Vrste talasa prema načinu oscilovanja čestica: a) longitudinalni, b) transverzalni, c) fleksioni, d)ekstenzioni, e) površinski

Prema načinu oscilovanja čestica u odnosu na pravac prostiranja zvučnih talasa najčešće srećemo longitudinalne (čestice osciluju u pravcu prostiranja zvuka, slika 1.7a) i transverzalne (čestice osciluju normalno na pravac prostiranja zvuka, slika 1.7b) talase. U fluidima (tečnosti i gasovi) se prostiru longitudinalni zvučni talasi dok se u čvrstim telima mogu prostirati i jedni i drugi. U pločama i štapovima mogu se prostirati fleksioni, ekstenzioni i površinski talasi, slike 1.7c, 1.7d i 1.7e, respektivno.

Kod fleksionih talasa se radi o savijanju, a kod ekstenzionih o promeni debljine oscilujućih tela. Površinski talasi nastaju kada su oscilovanjem zahvaćene samo čestice u ograničenom površinskom sloju materijala. Ovakvi talasi su upravo oni na vodi prikazani na slici 1.3.

1.5 Zvučni pritisak

Kada se radi o pojavi zvuka u vazduhu, nastalu deformaciju možemo posmatrati kao promenu brzine odnosno pomeraja čestica ili kao promenu gustine vazduha, ili što je isto, kao promenu pritiska u vazduhu. Ipak, uobičajeno je da se posmatra promena pritiska jer je to veličina koja se može lako meriti, a i čoveče uvo opaža zvuk kao promenu pritiska. Pritisak je u trenucima povećane gustine čestica veći od atmosferskog (koji u ovom slučaju smatramo konstantnim), a u trenucima smanjene gustine čestica manji. Dakle, atmosferski pritisak je usled deformacije sredine izazvane oscilovanjem čestica (čiji je uzrok delovanje izvora zvuka) dobio promenljivu komponentu koju nazivamo zvučni pritisak, slika 1.8. Ova fizička veličina se obeležava sa p i predstavlja jedan od osnovnih parametara koji karakterišu zvuk i zvučno polje. Oznaka p se odnosi na efektivnu vrednost zvučnog pritiska.



Slika 1.8 - Promena pritiska u vremenu u datoj tački zvučnog polja u vazduhu [9]

Ako atmosferski pritisak označimo sa p_0 onda je u sredini gde postoji zvučno polje ukupni pritisak p_u dat relacijom:

$$p_u = p_0 + p \quad (1.1)$$

Može se reći da zvučni pritisak predstavlja brze promene atmosferskog pritiska ili naizmeničnu komponentu ukupnog pritiska u zvučnom polju gde je atmosferski pritisak njegova jednosmerna ili srednja vrednost. Zvučni pritisak se izražava u paskalima (Pa). U starijoj literaturi se za izražavanje veličine pritiska može sresti jedinica bar. Između ove dve jedinice postoji relacija $1Pa = 10^{-5}bar = 10\mu bar$.

Zvučni pritisak ima veoma malu vrednost u poređenju sa atmosferskim. Najtiši zvuk koga čovečije uvo može registrovati iznosi $20 \mu Pa$ ($2 \cdot 10^{-5} Pa$) dok je najglasniji zvuk koji je uvo sposobno da podnese jačine reda $20 Pa$. Zvuk normalne jačine, koji čovek prima tokom svojih svakodnevni aktivnosti, iznosi oko $0,1 Pa$. Atmosferski pritisak pri normalnim uslovima približno iznosi $100 kPa$ pa se vidi da je njegova vrednost mnogostruko veća od zvučnog pritiska.

Interesantno je da naše čulo sluha veoma dobro registruje ove male vrednosti jačine zvučnog pritiska.

Napomenimo još jednom, da su promene zvučnog pritiska u vremenu posledica zgušnjavanja i razređivanja čestica elastične sredine na određenom mestu u prostoru gde postoji zvučno polje. Ove promene se, kao rezultat delovanja inercije i elastičnih veza čestica prenose dalje u okolni prostor brzinom zvuka. Stoga možemo reći da je pritisak veličina zvučnog polja koja se menja i u vremenu i u prostoru. Zato se zvučni pritisak ravanskih talasa (takvi su svi talasi na dovoljnom rastojanju od izvora) koji se menja po sinusnom zakonu može matematički predstaviti izrazom [29]:

$$p(x, t) = p_m \cdot \sin[(\omega \cdot t - k \cdot x) + \theta_0] \quad (1.2)$$

gde je p_m amplituda pritiska, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ talasni broj, a θ_0 početna faza.

Slično kao kod ekvivalentnih izraza u elektrotehnici kojima se predstavljaju prostoperiodične promene struje ili napona, u jednačini (1.2), p_m označava maksimalnu trenutnu vrednost zvučnog pritiska, k nam pokazuje kako su gusto raspoređene oscilacije zvučnih talasa i θ_0 pokazuje koliko je sinusna funkcija pomerenjena na vremenskoj osi (levo ili desno) u početnom trenutku vremena ($t = 0$).

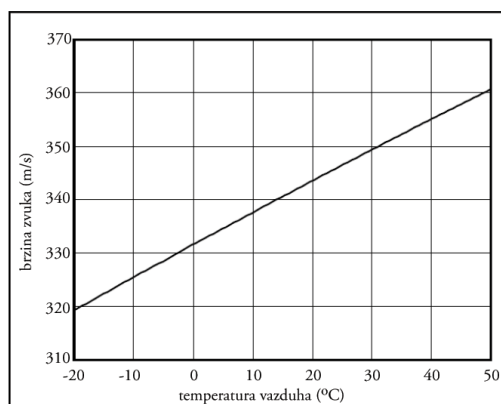
Inače, treba naglasiti da se promene funkcije (1.2) mogu pratiti u vremenu t na datom rastojanju $x=x_0$ od izvora, ili u funkciji rastojanja x od izvora ali tada u datom trenutku vremena $t=t_0$. Iz oblika izraza (1.2) se može zaključiti da on predstavlja takozvani *progresivni* zvučni talas, tj. zvučni talas koji se prostire u pozitivnom smeru x -ose (ili od izvora). Njegovo fazno kašnjenje $-kx$ je sve veće što je rastojanje x veće. Drugim rečima, on prolazi kroz iste vrednosti sve kasnije i kasnije što je x veće, a to upravo odgovara slučaju kada se kreće u pozitivnom smeru x -ose.

1.6 Brzina zvuka

Brzina kojom se zvučni talasi prostiru na daljinu zove se *brzina zvuka* i označava sa c . Brzina zvuka kroz vazduh zavisi u značajnoj meri od temperature a u manjoj meri od gustine vazduha i vrednosti atmosferskog pritiska. Zavisnost od temperature je data izrazom:

$$c(\theta) = 331,4 \sqrt{1 + \frac{\theta}{273}} = 331,4 + 0,606 \cdot \theta \quad (1.3)$$

gde je θ temperatura vazduha u Celzijusovim stepenima. Iz izraza (1.3), je jasno da se za svaki stepen povećanja temperature vazduha brzina zvuka poveća za $0,6 \text{ m/s}$. U opsegu temperatura koje se mogu javiti u životnoj sredini, brzina zvuka se menja približno u granicama od 320 m/s do 360 m/s , kako je prikazano dijagramom na slici 1.9. Na sobnoj temperaturi od 22°C brzina zvuka je $c(22^\circ\text{C}) = 345 \text{ m/s}$ ili 1242 km/h . Kao što vidimo zvuk je nekoliko puta brži od najbržih prevoznih sredstava na zemlji, ali pojedine letilice mogu da se kreću brzinama većim od brzine zvuka, o čemu će biti govora u odeljku 1.26. Sa druge strane brzina zvučnih talasa je neuporedivo manja od brzine elektromagnetnih talasa ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) pa zato tokom udara groma svetlost opazimo skoro trenutno, a grmljavinu čujemo mnogo kasnije. Brzina c ne zavisi od frekvencije, kao ni od složenosti zvučnog signala.



Slika 1.9 - Dijagram promene brzine zvuka u vazduhu u opsegu temperatura koje se mogu javljati u životnoj sredini [19]

Brzina prostiranja zvuka u drugim materijalima (tečnosti i čvrsta tela) je znatno veća nego u vazduhu, kako je prikazano u tabeli 1.1. Razlog tome su čvršće elastične veze između čestica ovih materijala pa se talas poremećaja brže prenosi. Na pokretanje ovih čestica koristi se više energije koju emituje zvučni izvor, pa zvuk ne može u njima da pređe velika rastojanja. Zato zvuk brzo oslabi pri prolasku kroz betonski zid, što je povoljno u slučajevima kada se traži izolacija od neželjenog zvuka tj. buke [23].

Pri prostiranju zvučnih talasa, kako je već rečeno, akustička energija se prenosi preko čestica vazduha, koje osciluju oko svog ravnotežnog položaja. Za ovo oscilovanje je karakterističan pomeraj

čestica koji se obeležava sa ξ (ksi) i brzina kojom čestice osciluju. Brzina oscilovanja čestica obeležava se sa v i ona je mnogo manja (100 do 1000 puta) od brzine prostiranja zvučnih talasa - c . Veza između pomeraja čestica i brzine njihovog oscilovanja je:

$$\xi = \frac{v}{\omega} \quad (1.4)$$

gde je ω kružna frekvencija ($2\pi f$). Očigledno je da pomeraj čestice postaje sve manji što je frekvencija veća, pri istoj brzini v .

Tabela 1.1 - Brzina zvuka u različitim materijalima [8].

Materijal	Brzina zvuka (m/s)
Vazduh, 22 °C	345
Voda	1480
Pleksiglas	1800
Drvo, meko	3350
Beton	3400
Čelik	5050
Aluminijum	5150
Staklo	5200
Gips ploče	6800