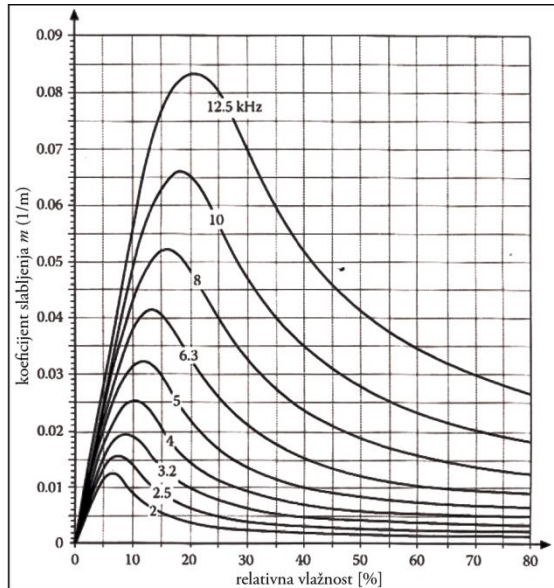


Fizička akustika, 4. deo

1.1 Slabljenje zvuka pri prostiranju u otvorenom prostoru

Već je navedeno da, pri prostiranju zvučnih talasa u otvorenom prostoru, intenzitet zvuka opada sa kvadratom rastojanja, odnosno pritisak opada sa rastojanjem, što je posledica širenja (divergencije) talasa i prenošenja akustičke energije na sve veći broj čestica vazduha. Ovo slabljenje usled širenja talasa uvek je prisutno.



Slika 1.17 – Koeficijent slabljenja zvuka u vazduhu usled apsorpcije u vazduhu na temperaturi od 20°C u funkciji vlažnosti vazduha i frekvencije signala

Pri prostiranju zvučnih talasa kroz vazduh, pored slabljenja usled divergencije, javljaju se i dopunska slabljenja usled apsorpcije zvuka u vazduhu, uticaja tla, prepreka (zakloni ili barijere, objekti, rastinje) i atmosferija (gradijent temperature, vetar, sneg, kiša, magla).

Ovde ćemo ukratko objasniti uticaj apsorpcije zvuka u vazduhu na njegovo slabljenje pri prostiranju. O uticaju gradijenta temperature i vetra biće nešto više govora u odeljku 1.17. Određivanje uticaja ostalih parametara je dosta složen proces koji izlazi iz obima ove knjige.

Na iznos slabljenja usled apsorpcije zvuka u vazduhu utiče više faktora, među kojima su najvažniji viskoznost vazduha, odvođenje toplote i pojave rezonanse u molekulima. Ne ulazeći u detalje pojedinačnih uticaja ovde ćemo samo navesti da se iznos apsorpcije menja sa temperaturom, vlažnošću vazduha i frekvencijom signala, kako je prikazano na slici 1.17. Kao što se vidi sa ove slike, apsorpcija postaje značajna na frekvencijama iznad 2 kHz i ima maksimum pri relativno malim vrednostima vlažnosti vazduha.

Ako se tokom prostiranja zvuka uračunaju jednovremeno i uticaj širenja zvučnih talasa i uticaj apsorpcije u vazduhu, jednačinu (1.7), za intenzitet zvuka na rastojanju r od tačkastog izvora tada moramo pisati u obliku:

$$J = \frac{P_a}{4 \cdot \pi \cdot r^2} e^{-m \cdot r} \quad (1.21)$$

pri čemu je m koeficijent slabljenja zvuka usled apsorpcije, čije su vrednosti date na dijagramu na slici 1.17.

Ako se zna intenzitet zvuka $J(r_1)$ na rastojanju r_1 onda je intenzitet zvuka na bilo kom rastojanju r dat relacijom:

$$J(r) = J(r_1) \frac{r_1^2}{r^2} e^{-m \cdot (r - r_1)} \quad (1.22)$$

a kada se umesto intenziteta radi o zvučnom pritisku onda izraz (1.22) ima oblik:

$$p(r) = p(r_1) \frac{r_1}{r} e^{-\frac{m}{2}(r - r_1)} \quad (1.23)$$

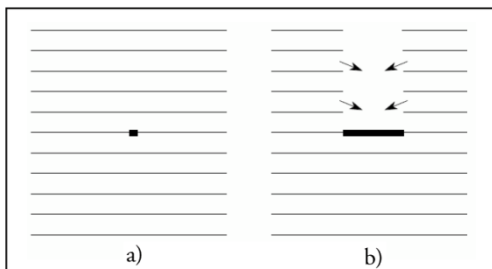
Obično je u praksi poznat nivo zvuka L_1 koji dati izvor daje na rastojanju $r_1 = 1\text{m}$, pa se iz izraza (1.23), dobija da je nivo zvuka na rastojanja r od izvora:

$$L_r = L_1 - 20 \log r - 4,34 \cdot m \cdot (r - 1), [dB] \quad (1.24)$$

Pri ovome treba naglasiti da na ukupan iznos slabljenja zvuka pri malim rastojanjima od izvora dominantan uticaj ima širenje zvučnih talasa, dok na većim rastojanjima i višim frekvencijama dominantan uticaj ima apsorpcija zvuka u vazduhu. Drugim rečima, na rastojanjima do oko 100 m dovoljno je uračunati samo slabljenje usled divergencije zvučnih talasa, dok se slabljenja usled svih ostalih uticaja ne moraju uzimati u obzir.

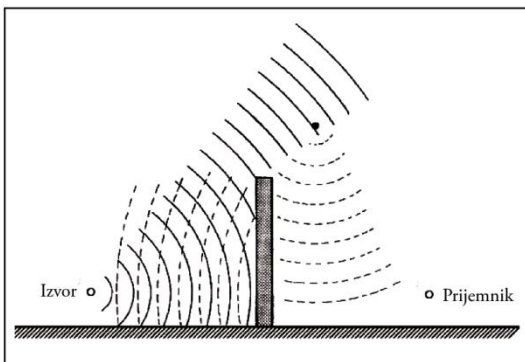
1.2 Difrakcija zvuka

U slobodnom prostoru zvučni talasi se kreću pravolinijski. Međutim kada se na putu talasa nađu prepreke onda oni po pravilu skreću sa pravolinijskog puta kretanja. Pojava zbog koje nastaje promena pravca kretanja zvučnih talasa kada naiđu na prepreke naziva se difrakcija.



*Slika 1.18 - Difrakcija
ravanskih zvučnih talasa:
a) na akustičkoj maloj
prepreci, b) na akustičkoj
velikoj prepreci*

Poznato je da se zvučni talasi prostiru iza uglova ili oko prepreka. Na primer muzika koja se reprodukuje u jednoj prostoriji u stanu može se čuti u hodniku ili u drugim prostorijama. Jedan od razloga ove pojave je difrakcija zvuka ili skretanje zvučnih talasa sa svog pravolinijskog kretanja. Karakter muzike koja se čuje u udaljenim prostorijama u stanu je izmenjen. Niski tonovi su dominantniji jer se zvuk niskih frekvencija usled većih talasnih dužina lakše prostire oko uglova i prepreka.



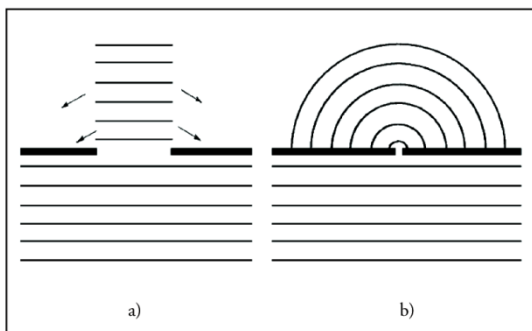
*Slika 1.19 - Zvučna barijera štiti
prijemnik od zvuka viših frekvencija*

Da li će određena prepreka biti uzrok difrakcije zvuka zavisi od njene „akustičke veličine“ odnosno od odnosa njenih dimenzija prema talasnoj dužini zvuka. Prepreka koja je mnogo manja od talasne dužine zvuka ne utiče na pravac kretanja zvučnih talasa, slika 1.18a. Međutim, prepreka koja

je veća od talasne dužine zvuka formira senku u koju zrače izvori koji potiču od talasnih frontova zvuka koji je prošao pored prepreke. Ova pojava se zasniva na Hajgensovom principu koji glasi da svaka tačka na talasnom frontu zvuka koji je prošao kroz neki otvor ili je prošao pored difrakcione ivice može se smatrati tačkastim izvorom zvuka koji zvučnu energiju zrači u zonu senke.

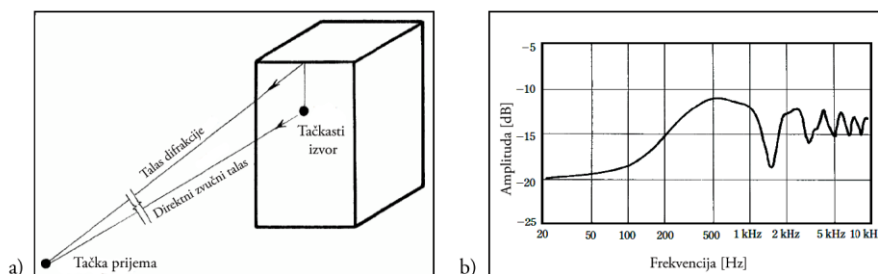
Zvučne barijere koje se postavljaju pored prometnih puteva i železničkih pruga su primeri prepreka čije su dimenzije velike u poređenju sa talasnom dužinom upadnog zvuka, slika 1.19.

Deo zvuka koji pogađa barijeru se reflektuje, kao da potiče od virtuelnog zvučnog izvora sa druge strane barijere. Talasni frontovi koji prolaze pored gornje ivice barijere mogu se posmatrati kao linije tačkastih izvora koji zrače zvuk u zonu senke. Nivo zvuka u zoni senke iza barijere je veći što je njegova frekvencija niža. Dakle, zona senke je zaštićena od zvuka visokih frekvencija dok zvuk niskih frekvencija dospeva u zonu senke zbog difrakcije.



Slika 1.20 Difrakcija zvuka
na otvorima:
a) veliki otvor,
b) mali otvor

Slika 1.20a prikazuje difrakciju zvuka na otvoru čija je širina jednaka većem broju talasnih dužina. Zvučni talasi pogađaju krutu prepreku, deo zvučne energije se reflektuje, dok deo prolazi pravo kroz širok otvor. Strelice pokazuju da deo energije iz glavnog snopa skreće u zonu senke. Svaki talasni front koji je prošao kroz otvor postaje niz tačkastih izvora koji zrače difrakovani zvuk u zonu senke. Isti princip važi i za sliku 1.20b, izuzev što je otvor veoma mali i samo mali deo zvučne energije prolazi kroz njega. Tačke na malom talasnom frontu koji je prošao kroz otvor tako su međusobno blizu da njihovo zračenje ima oblik polusfere.

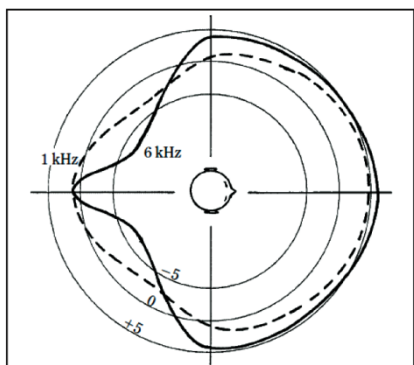


Slika 1.21 – Difrakcija na ivicama zvučnih kutija [17]

Kada zvučnik montiran na prednjem zidu zvučničke kutije zrači zvučne talase u okolni prostor, deo zvučne energije se reflektuje od ivica zida, slika 1.21a, i može dovesti do promene kvaliteta zvuka na mestu slušaoca, slika 1.21b. Ako zvučnik smatramo tačkastim izvorom zvuka, koji je montiran na sredini prednje ploče kutije dimenzija 40 cm x 64 cm x 32 cm, onda će na mestu slušanja zvuk biti jednak kombinaciji direktnog zvuka i zvuka reflektovanog od ivica. Fluktuacije ukupnog nivoa zvuka usled uticaja difrakcije u ovom slučaju iznosiće ± 5 dB [17], što predstavlja značajnu promenu frekvencijske karakteristike zvučničkog sistema.

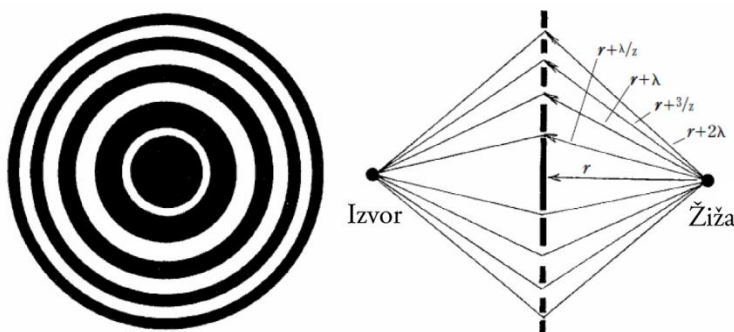
Difrakcija zvuka koju stvara čovečja glava kao i refleksije i difrakcija od ušnih školjki i torza utiču na prijem zvuka od strane čoveka. Tako zvuk, u opsegu frekvencija od 1-6 kHz, koji dolazi

spreda, usled difrakcije biva pojačan ispred i oslabljen iza glave. Za niže frekvencije direkcionalna karakteristika glave je približno kružna, slika 1.22 [17].



Slika 1.22 – Različita osetljivost prijema zvuka od pozadi zbog uticaja difrakcije oko čovečje glave [17]

Korišćenjem mehaničkih prepreka odgovarajućeg oblika moguće je postići da zvuk prolazeći kroz prepreku stigne na drugu stranu istovremeno sa onim zvukom koji je zaobilazi. Na tom se principu zasnivaju akustička sočiva.



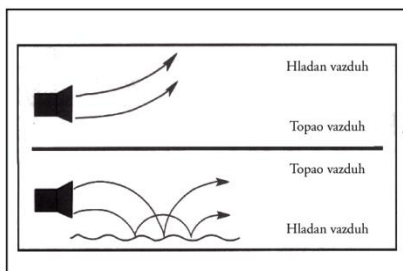
Slika 1.23 – Difrakcija zvuka i akustičko sočivo

Ploča sa kružnim koncentričnim prorezima, slika 1.23, može se smatrati akustičkim sočivom. Ukoliko je žiža na rastojanju r od ploče, sledeći duži put mora biti $r + \lambda/2$, gde je λ talasna dužina zvuka koji stiže od izvora do ploče. Dužine narednih puteva zvuka su redom $r + \lambda$, $r + 3\lambda/2$, i $r + 2\lambda$ itd. Ove dužine puteva se razlikuju za $\lambda/2$, što znači da zvučni talasi u žižu stižu u fazi dajući zvuk povećane jačine.

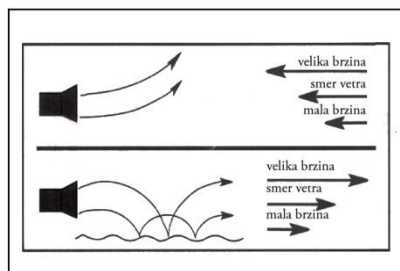
Na istom principu rade i akustičko rasipno sočivo, i akustička prizma, s tim što sočivo raspršuje zvuk a prizma menja pravac prostiranja zvučnih talasa.

1.3 Refrakcija zvuka

Refrakcija je pojava pri kojoj takođe nastupa promena pravca prostiranja zvučnih talasa, odnosno savijanje zvučnih talasa. Uzrok ove pojave su vremenske prilike, među kojima su najznačajnije vetar i temperaturne razlike slojeva vazduha kroz koje zvuk prolazi. U oba slučaja dolazi do promene brzine prostiranja zvuka na različitim visinama od zemlje usled čega nastaje savijanje zvučnih talasa.



Slika 1.24 – Refrakcija zvuka usled temperaturnog gradijenta

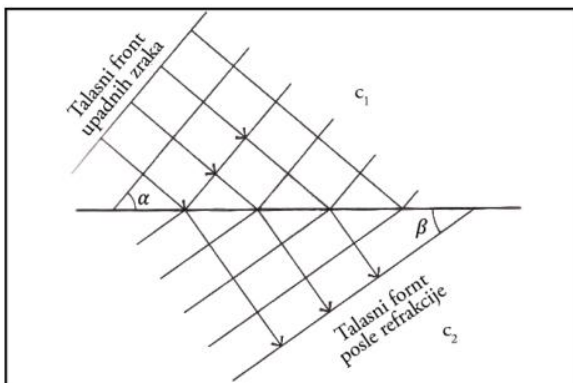


Slika 1.25 – Refrakcija zvuka usled uticaja vetra

Tokom dana vazduh je najtopliji na površini zemlje i njegova temperatura postepeno opada sa povećanjem visine od zemlje, a sa njom i brzina zvuka. To znači da kod zvučnih talasa koji se prostiru u blizini zemlje deo talasa najbliži zemlji putuje najbrže, a deo talasa koji je najudaljeniji od zemlje putuje najsporije. Kao rezultat ovoga, talas menja pravac i savija nagore, slika 1.24 gore. Na ovaj način može nastati zona senke ili mrtva zona u kojoj se zvuk slabije čuje, ili uopšte ne čuje. Slušalac koji stoji u zoni senke neće čuti zvuk iako je siguran da vidi izvor. Zvučni talasi su skrenuli naviše i ne stižu do slušaoca.

Obratno, noću po zalasku sunca, zemlja se brzo hladi i temperatura vazduha je najniža na površini zemlje i raste sa povećanjem visine. Ova pojava se naziva temperaturna inverzija i može se protezati do visine od 100 m i više, iznad površine zemlje. Sada će zvučni talas koji se prostire u blizini zemlje, čiji se deo najbliži zemlji kreće najsporije, savijati nadole, Slika 1.24 dole.

Na prostiranje zvučnih talasa mogu znatno da utiču pravac i jačina vetra. Brzina vetra nije na svim visinama jednaka; veća je u visini, a manja uz površinu zemlje. Treba imati u vidu da je brzina zvuka jednaka vektorskom zbiru brzine zvuka u mirnoj atmosferi i brzine vetra. Zbog toga zvučni talasi koji se prostiru uz vetar imaju veću brzinu u slojevima bližim zemlji pa skreću naviše. Obratno, kada se prostiru niz vetar imaju veću brzinu u slojevima dalje od zemlje pa skreću naniže, slika 1.25. I jedno i drugo skretanje pravca prostiranja smanjuje domet jer odvodi zvuk van željenog pravca.



Slika 1.26 – Promena pravca kretanja zvučnih talasa na granici dve sredine

Do refrakcije zvučnih talasa dolazi i kada pređu iz jedne sredine u drugu (iz vazduha u vodu, na primer). Zvučni talasi tada menjaju pravac prostiranja kao što je slučaj i sa svetlosnim zracima. Veličina promene pravca na granici dve sredine zavisi od brzina prostiranja zvuka u njima, i data je izrazom:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1.25)$$

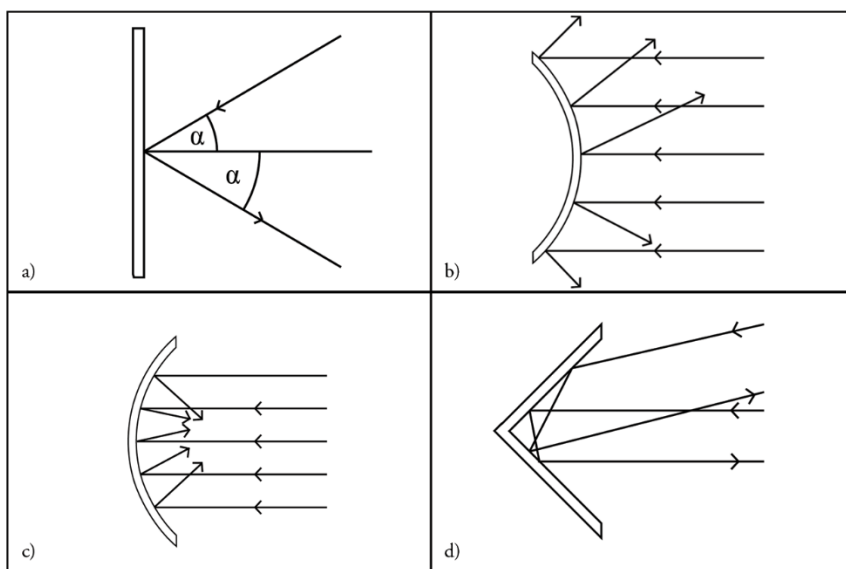
gde su α i β uglovi koje talasni frontovi zaklapaju sa graničnom površinom a c_1 i c_2 brzine u sredinama koje se graniče, slika 1.26. Često se u literaturi može sresti jednačina (1.25), gde su umesto uglova α i β dati **uglovi ...** koje zatvaraju zvučni zraci na normalom na površinu razdvajanja dve sredine. Sa

slike 1.26 se vidi da se praktično radi o istim uglovima, ($\alpha = \dots$ i $\beta = \dots$) pošto su to uglovi sa normalnim kracima.

Razlika brzina prostiranja zvuka u vazduhu i čvrstim telima je velika. Stoga pri prelazu zvuka iz vazduha u čvrsta tela, i obratno, zvučni zraci izlaze ili ulaze skoro pod pravim uglom na površinu razdvajanja.

1.4 Refleksija zvuka

Korišćenjem zvučnih zraka moguće je optičke zakone vezane za refleksiju svetlosti primeniti u akustici. Zato se ova oblast akustike naziva geometrijska akustika, po ugledu na geometrijsku optiku gde se mnogi problemi rešavaju primenom geometrije. Pri tome mora biti ispunjen uslov da je talasna dužina zvuka mnogo manja od dimenzija tela od kojeg se zvuk reflektuje.



Slika 1.27 – Refleksija zvučnih talasa

Ako se radi o refleksiji ravnog zvučnog talasa od ploče velikih dimenzija onda je upadni ugao jednak uglu refleksije, dok su upadni i reflektovani zvučni zrak u istoj ravni. Na slici 1.27 su prikazani primeri refleksije zvuka od ravne (a), konveksne (b) i konkavne (c) površine kao i od reflektora koji čine dva zida međusobno spojena pod uglom od 90° (ugaoni reflektor).

Kada se radi o konveksnoj ili konkavnoj ploči, tada zamišljamo da su sastavljene od malih ravnih površina koje pogađa upadni zrak pod određenim uglom, pa se reflektovani zrak odbija od ove površine pod istim tim uglom.

Konveksna površina rasipa zvuk. Na ovom principu rade difuzori koji se često koriste za akustičku obradu prostorija. Konkavne površine fokusiraju zvuk i obično su sa akustičke tačke gledišta veoma problematične. Kod ugaonog reflektora imamo specifičnu situaciju da su upadni i reflektovani zvučni zrak paralelni. To znači da u bilo kojoj tački u prostoriji reflektovani zrak će se vratiti prema izvoru. Situacija postaje još složenija ako se ima u vidu da u prostoriji pored ugaonih reflektora sa dva zida postoje i ugaoni reflektori sa tri zida (uglovi koje čine zidovi i plafon ili zidovi i pod).