



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	21 ДЕЦ 2007
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	9/1680

AKUSTIKA PROSTORIJA

- diplomski rad -

Mentor:

Prof.Dr Radomir Kobilarov

Kandidat:

Zoran Aleksić

Novi Sad, 2007

Sadržaj

Uvod	2
1. OSNOVNI FIZIČKI POJMOVI	4
1.1 Zvuk	4
1.2 Brzina širenja zvuka	4
1.3 Frekvencija	5
1.4 Talasna dužina	7
1.5 Zvučni pritisak	7
1.6 Oscilatorna brzina i pomak čestica	8
1.7 Zvučni intezitet	9
1.8 Gustina zvučne energije	9
1.9 Zvučna snaga	10
1.10 Decibel	11
1.11 Nivo zvučnog pritiska, zvučnog inteziteta i zvučne snage	12
1.12 Zvučni spektar	13
1.13 Lokalizacija izvora zvuka	14
1.14 Efekat prvog talasnog fronta	15
1.15 Odjek	15
2. POJAVE KOJE PRATE ŠIRENJE ZVUKA	16
2.1 Refleksija zvuka	16
2.2 Difrakcija zvučnog talasa	18
2.3 Refrakcija zvučnog talasa	19
2.4 Apsorpcija zvuka	20
2.5 Difuzija zvuka	21
2.6 Prelaz zvučne energije kroz zvučne materijale	21
2.7 Doplerov efekat	22
2.8 Stojeci talasi	23
2.9 Treptajni talasi i interferencija zvuka	23
2.10 Usmerenost zvučnog izvora	24
3. AKUSTIKA PROSTORIJA	24
3.1 Oblik prostorije	25
3.1.1 Zvučni proces u prostoriji paralelopipednog oblika	26
3.1.2 Plan osnove	28
3.1.3 Visina i oblik plafona	31
3.1.4 Izdizanje izvora zvuka i sedišta	33
3.1.5 Reflektori zvuka	35
3.1.6 Difuzori zvuka	36
3.1.7 Echo i lepršajući echo	36
4. ZAPREMINA	38
5. ODJEK	40
5.1 Izračunavanje vremena odjeka	41
5.2 Merenje vremena odjeka	47
5.3 Apsorpcija zvuka u vazduhu	49
5.4 Odječni radius dvorane	50
5.5 Akustički spojene prostorije	51
5.6 Uticaj odjeka na govor	53
5.7 Uticaj odjeka na muziku	53
5.8 Frekventna karakteristika odjeka	56
6. PRIMERI IZVEDENIH PROSTORIJA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE	58
6.1 Spavaća soba	59
6.2 Dnevni boravak kao slušaonica	59
6.3 Školska učionica	60
6.4 Sportska dvorana "Pionir"	60
6.5 Koncertna dvorana "Sava" centra	61
6.6 Režije i studia	63
6.7 Crkve	65
Zaključak	67
Literatura	68

UVOD

Akustika (od grčke reči **akio-čujem**), je nauka tj. grana fizike o stvaranju, kontroli, prenosu, prijemu i efektima zvuka.

Akustika se deli na četiri oblasti:

- Fizička akustika
- Prostorna akustika
- Psiho-fizička akustika
- Buka

Akustika kao savremena naučna oblast postavljena je početkom XX veka. Za taj period vezano je ime Amerikanca **Valasa Klementa Sabina** (Wallace Clement Sabine), koji je postavio teorijske i naučne osnove akustike prostorija. Sve je to prethodilo pojavi električnih mernih instrumenata. Sa pojavom mikrofona, zvučnika i sistema za zapisivanje signala, razvoj akustike je dobio novi zamah. Taj zamah je posebno izražen u drugoj polovini XX veka, čemu je najviše doprineo razvoj tehnologije, pre svega elektrotehnike kaja je omogućila korišćenje moderne mjerne opreme, senzora i pretvarača. Takav razvoj stvorio je uslove za ozbiljniji eksperimentalni rad. Najzad, najnovija epoha u istorijskom razvoju akustike prepoznaje se u proteklih tridesetak godina zahvaljujući razvoju računara. Oni su omogućili dva ozbiljna pomaka: u oblasti modelovanja zvučnog polja i u oblasti merenja. Zahvaljujući tome, čak i neke klasične oblasti akustike koje se već dugo razvijaju, kao što je akustika prostorija, poslednje dve decenije su doživele veliki pomak. Kao ilustracija ovog najnovijeg razvoja, dovoljno je napomenuti da je teorija o kvalitetu koncertnih dvorana doživela najveći progres tek u novije vreme. Šta više, veza između subjektivnih atributa zvučnog polja i fizičkih karakteristika koncertnih dvorana još uvek je otvorene tema za istraživanje.

Akustika prostorija ima svoje veze sa arhitekturom jer se bavi prostorima u građevinskim objektima, zatim sa vizuelnim umetnostima, jer sve akustičke mere su i deo enterijera i sa muzikom jer akustika prostorija određuje ambijent za muzička izvođenja.

Akustika prostorija ili **prostorna akustika** je nauka o prostiranju zvuka unutar prostorija. Svrha joj je da se ostvare uslovi za prirodno, kvalitetno i priyatno slušanje. Cilj prostorne akustike je podešavanje akustičkog odjeka. To se može razumeti i kao upravljanje sudbinom zvučne energije kada neki zvučni izvor radi u toj prostoriji i stvara zvučno polje. Taj izvor može biti govornik, jedan ili više zvučnika, muzički instrument, ali i neki neželjeni izvor buke.

Unutrašnja akustika jedne prostorije je funkcija koja ima mnoštvo promenljivih veličina. Neke od najvažnijih su zapremina prostorije, oblik i veličina prostorije, vreme odjeka (eha) i porast i opadanje zvučne energije. Izostavljanje jedne od njih može dovesti do katastrofalnih akustičkih grešaka.

Valas Klement Sabin (1868-1919)

Po struci Sabin je bio fizičar. U početku stručnog i naučnog rada interesovao se za optiku i elektricitet, bez posebne sklonosti prema akustici. Akustikom prostorija počeo je da se bavi po nagovoru predsednika Veća Harvardskog univerziteta, koji ga je zamolio da reši problem akustike u univerzitetским amfiteatrima. Svoja istraživanja Sabin je proširio i na pozorište "Sanders" koje je imalo odlične akustičke osobine. Kasnija istraživanja obavio je na amfiteatru Džefersonove fizičke laboratorije, koja je imala osrednje akustičke osobine. U početku svojih istraživanja formirao je potrebne i dovoljne uslove za dobro slušanje. Pomoću orgulja kao izvora zvuka, štoperice i dobrim sluhom, Sabin je u navedenim prostorijama izveo prva istorijska merenja te vrste u akustici. Današnje moderne tehnologije, savremeni akustički materijali i konstrukcije omogućavaju da se na vreme odjeka i izolaciju od buke mnogo bolje utiče.

Valas Klement Sabin je svojim istraživanima i rezultatima utemeljio akustiku prostorija.



Valas Klement Sabin

1. OSNOVNI FIZIČKI POJMOVI

1.1 Zvuk

Zvukom se, u užem smislu značenja te reči, naziva sve ono što čujemo, što registrujemo sluhom. Prema fizičkoj definiciji zvuk je oscilovanje u gasovitim, tečnim i čvrstim elastičnim sredinama supstancija. Možemo, takođe, kazati da se zvuk sastoji od ritmičkog pomeranja molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju međumolekularne elastične sile. Zvuk je i promena pritiska koja se širi elastičnom sredinom. Zvuk se ne može širiti kroz vakuum (Robert Bojl (Robert Boyle, 1660.)). [1]

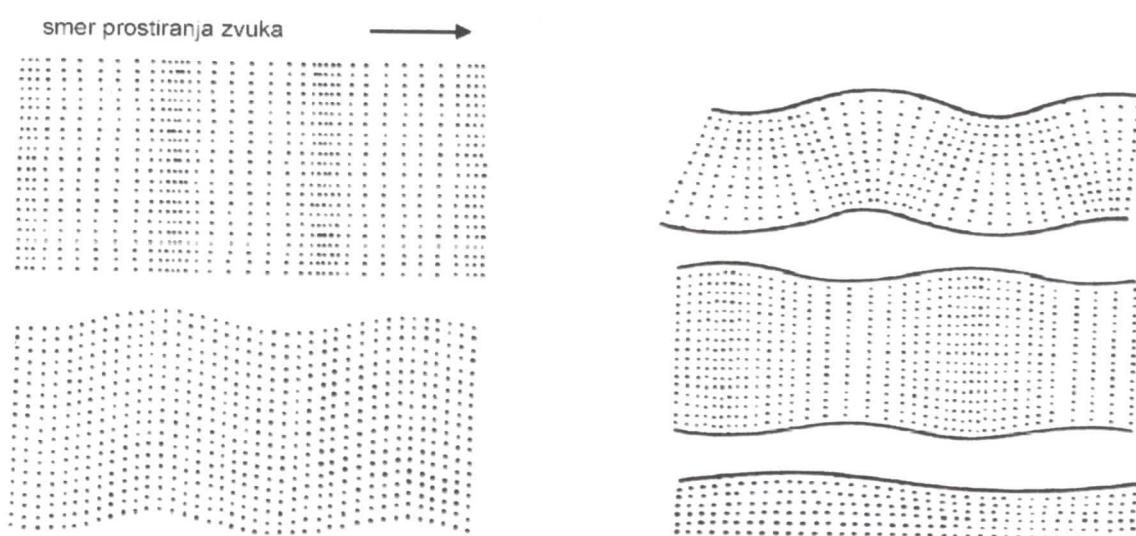
Oblast fizike koja se bavi zvukom naziva se **akustika** i pokriva sve oblasti generisanja, rasprostiranja i percepcije zvuka, bez obzira na prirodu njegovog izvora i prijemnika.

Zvuk se kroz neku sredinu prostire u obliku mehaničkih talasa. Razlikujemo dve vrste tih talasa:

- Transferzalne
- Longitudinalne

U čvrstim sredinama moguće je širenje i transferzalnih i longitudinalnih talasa, dok se kroz fluide mogu širiti samo longitudinalni talasi.

U pločama i štapovima talasi mogu biti i druge vrste, kao talasi savijanja i uvijanja, talasi rastezanja i površinski talasi.



Slika 1. Vrste talasa u čvrstim telima:
longitudinalni i transferzalni (levo) i talasi rastezanja, savijanja i površinski talasi (desno) [1]

1.2 Brzina širenja zvuka

Zvuk se širi mnogo sporije od svetlosti. Brzina širenja zvuka u vazduhu zavisi od njegove gustine ρ_0 , od atmosferskog pritiska p_0 i od konstante γ , koja daje odnos specifične toplotne vazduha uz konstantan pritisak i konstantnu zapreminu. Konstanta γ pojavljuje se ovde zato što je širenje zvuka adijabatski proces, a to znači da se toplota koja nastaje za vreme zgušnjavanja vazduha ne može zbog brzine procesa odvesti.

Brzina kojom se širi zvuk u vazduhu (ili u gasovima uopšteno) može se izračunati prema formuli:

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \gamma}{\rho_0}} \quad (1)$$

Za vazduh je $\gamma = 1,4$. S porastom nadmorske visine sve je manji atmosferski pritisak p_0 , no isto tako gustina vazduha ρ_0 . Zato promena atmosferskog pritiska neznatno utiče na brzinu zvuka. Naprotiv, brzina zvuka dosta zavisi od temperature. To približno izražava formula:

$$c = 331,4 + 0,6 \cdot t \left[\frac{m}{s} \right], \quad (2)$$

gde je t temperatura vazduha u $^{\circ}C$. Pri normalnoj sobnoj temperaturi od $20^{\circ}C$ brzina zvuka u vazduhu iznosi $343 \frac{m}{s}$, a zimi uz temperaturu od $-20^{\circ}C$ padne na $319 \frac{m}{s}$.

Brzinu zvuka u vazduhu prvi je pokušao da izmeri francuski matematičar Marin Mersen (Marin Merssens, 1640). On je izračunavao vreme za koje se odjek vrati do izvora zvuka, uz pozнатu udaljenost između tog mesta i površi od koje se zvuk reflektovao. Njegova procena je bila da se zvuk širi brzinom $316 \frac{m}{s}$.

Italijanski istraživači Boreli i Vivijani (Borelli i Viviani) poslužili su se 1660. god. u tu svrhu topovskim praskom. Tu metodu je 1708. god. usavršio Englez Vilijem Deram (William Derham). On je topovski prasak slušao na crkvenom tornju, a top je bio na brdu izvan grada na udaljenosti od 18 km. Ponavlјajući ogled više puta, uzimajući u obzir smer vetra, Deram je kao srednju vrednost dobio brzinu od $343 \frac{m}{s}$, što je vrlo blizu vrednosti utvrđenoj današnjim modernim metodama pri temperaturi od $20^{\circ}C$.

Brzina zvuka za neke gasove (pri temperaturi od $20^{\circ}C$ i uz atmosferski pritisak od 1 bar) [1] :

Tabela 1. Brzina zvuka za neke gasove

Gas	Brzina zvuka $\left[\frac{m}{s} \right]$
Vodonik	1270
Helijum	971
Azot	338
Kiseonik	317

Brzina zvuka u tečnostima zavisi od njihove kompresibilnosti K i gustine ρ_0 . Taj odnos je dat formulom:

$$c = \sqrt{\frac{1}{K \cdot \rho_0}} \quad (3)$$

Podaci za nekoliko tečnosti:

Tabela 2. Brzina zvuka za neke tečnosti

Tečnost	Brzina zvuka $\left[\frac{m}{s} \right]$
Glicerin, 20 °C	1920
Morska voda, 3,6% soli, 15 °C	1505
Voda, 21,5 °C	1484
Voda, 10 °C	1440
Petrolej, 15 °C	1330

Za brzinu zvuka u čvrstim telima vredi formula:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (4)$$

E je modul elastičnosti, a ρ_0 gustina čvrstog tela. Date su brzine zvuka u čvrstим materijalima:

Tabela 3. Brzina zvuka u čvrstim materijalima [1]

Čvrsti materijali	Brzina zvuka $\left[\frac{m}{s} \right]$
Aluminijum	5105
Gvožđe	5000
Staklo	3490
Jelovo drvo	3320
Srebro	2700
Olovo	1300
Pluta	500
Guma	40-150

Vrednosti iz tabele 3. se odnose na širenje longitudinalnih talasa (uzdužnih), jer je najveća brzina širenja u nekim materijalima.

1.3 Frekvencija

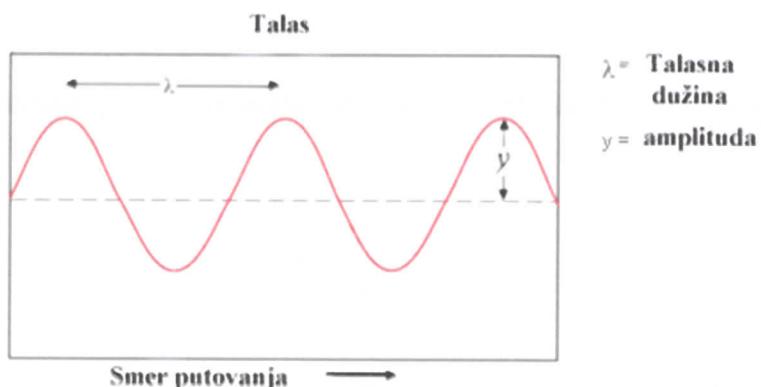
Broj talasa (oscilovanja) koji se proizvode u sekundi naziva se **frekvencija**. Izražava se u hercima (Hz i kHz i MHz). Čovečje uho može da čuje zvuk frekvencije od $16\ Hz$ do $20\ 000\ Hz$. Ono ne registruje kao zvuk zvučne talase koji do njega stižu u manjem broju od $16\ Hz$ ili u većem broju od $20\ 000\ Hz$. Frekvencije niže od $16\ Hz$ uho ne čuje kao tonove, već ih oseća kao potresanje. To se područje frekvencija naziva **infravezukom**, a ono sa frekvencijama iznad $20\ 000\ Hz$ je **ultravezuk**.

Sluh nekih životinja prilagođen je za slušanje zvuka mnogo viših frekvencija nego što ih čuje čovek. Tako pas reaguje na frekvencije do $50\ kHz$, mačka do $65\ kHz$, slepi miš do $120\ kHz$, a delfin i leptir do $150\ kHz$.

U tehničkoj akustici se za merne svrhe kao proizvođač tonova određene frekvencije upotrebljava ton-generator povezan sa zvučnikom. Uz pomoć skale na tom aparatu namesti se ton potrebne frekvencije, a regulatorom se može podešiti jačina tona. [1]

1.4 Talasna dužina

Razmak između dve susedne tačke najvećeg zgušnjavanja ili između dve tačke najvećeg razređivanja sredine u kojoj se zvučni talas širi naziva se **talasna dužina** (sl.2).



Slika 2. Talasna dužina i amplituda zvučnog talasa [7]

Na putu što ga zvuk prevali u jednoj sekundi ima upravo toliko talasa (ili talasnih dužina) kolika mu je frekvencija. Prema tome, talasna dužina se može izračunati iz brzine širenja zvuka i frekvencije:

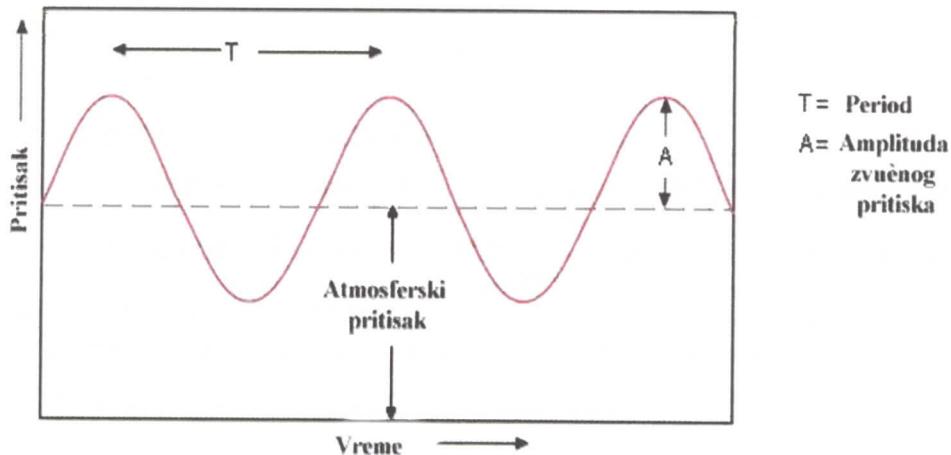
$$\lambda = \frac{c}{f} , \quad (5)$$

gde je brzina zvuka c , frekvencija f i talasna dužina λ .

U akustičnom području odnos talasnih dužina je isti kao i odnos frekvencija, a on je veliki. Frekvenciji od $16\ Hz$ pripada talasna dužina nešto veća od $20\ m$, a talasna dužina na čujnoj frekvenciji od $20\ 000\ Hz$ nešto je manja od $2\ cm$.

1.5 Zvučni pritisak

Dok se zvučni talas širi, zvučni pritisak se superponira atmosferskom pritisku, tako da u jednoj poluperiodi ukupni pritisak poraste iznad atmosferskog, a u sledećoj poluperiodi se snizi ispod njegove vrednosti (sl. 3)



Slika 3. zvučni pritisak je naizmeničan pritisak superponiran atmosferskom pritisku [7]

Pod **efektivnim zvučnim pritiskom** podrazumeva se amplituda zvučnog pritiska p_m smanjena $\sqrt{2}$ puta:

$$p = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Čovečje uho može osetiti izvanredno niske zvučne pritiske. Na pragu čujnosti i u području frekvencija u kojem je uho najosetljivije, ono registruje zvučne pritiske koji su 10^{-10} puta niži od atmosferskog pritiska. Oni koji su viši od 10^{-4} atmosferskog pritiska u uhu izazivaju bol.

Jedinica za merenje zvučnog pritiska je paskal (Pa). Vrednost 1 Pa jednaka je $1 \frac{N}{m^2}$. Često se upotrebljava i jedinica mikrobar ($1 \mu bar$). Vrednost $1 \mu bar$ jednaka je $0,1 Pa$. Vrednost $1 bar$ jednaka je $10^6 \mu bar = 10^5 Pa$ [1]

1.6 Oscilatorna brzina i pomak čestica

Prilikom širenja zvučnog talasa pojedine čestice zvuka osciluju oko svog srednjeg (ravnotežnog) položaja. Pomak od položaja mirovanja izvode čestice brzinom koja nije konstantna, već se menja od nule do neke maksimalne vrednosti. Ako je reč o sinusoidnom zvučnom talasu (sl.2) onda se brzina čestica i njihov pomak menjaju po **zakonu sinusoide**. Efektivna brzina čestica ili efektivna oscilatorna brzina je $\sqrt{2}$ puta manja od amplitudu oscilatorne brzine.

Između efektivnog zvučnog pritiska p i efektivne oscilatorne brzine vlada ovaj odnos:

$$p = \rho_0 \cdot c \cdot v, \quad (7)$$

gde je ρ_0 gustina vazduha, a c je brzina zvuka

Proizvod gustine vazduha i brzine zvuka, dakle, $\rho_0 \cdot c$ naziva se **specifičnim akustičnim otporom**. Kod vazduha taj otpor ima vrednost $410 \frac{N \cdot s}{m^3}$. U akustici se često izražava u akustičnim omima (tako da taj otpor iznosi 41 akustički om).

Oscilatorna brzina vazdušnih čestica je relativno mala. Uz zvučni pritisak od $200 \mu\text{bar}$ - a to je granični pritisak koji još nije opasan za uho- oscilatorna brzina je $5 \frac{cm}{s}$.

Amplituda pomaka čestica – a dobija se iz odnosa:

$$a = \frac{v_m}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (8)$$

gde je v_m amplituda oscilatorna brzine, a f frekvencija zvuka.

I amplituda pomaka je relativno mala. Uz zvučni pritisak od $200 \mu\text{bar}$ i na frekvenciji od 1000 Hz amplituda pomaka iznosi 10^{-2} mm .

1.7 Zvučni intezitet

U vezi sa oscilatornom brzinom zvučni talas sadrži kinetičku energiju, a s obzirom na zvučni pritisak i potencijalnu energiju. Zvučnim talasom, dakle, brzinom zvuka se prenosi mehanička energija. Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz površinu od 1 m^2 postavljenu normalno na smer širenja naziva se jačinom ili **intezitetom zvuka**.

Za intezitet zvuka vredi:

$$I = p \cdot v \quad (9)$$

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (10)$$

$$I = v^2 \cdot \rho_0 \cdot c R \quad (11)$$

Budući da je za vazduh $\rho_0 \cdot c = 410 \frac{N \cdot s}{m^3} = 41$ rej^{*} = 41 akustičkih oma, to će zvučni intenzitet biti:

$$I = \frac{p^2}{410} = 2.44 \cdot 10^{-3} p^2 \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (12)$$

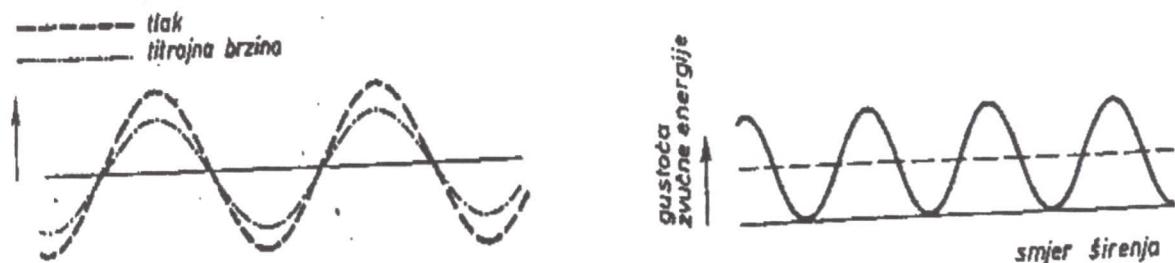
gde je p zvučni pritisak u paskalima.

^{*}(Imenom "rejl" nazvana je jedinica u čast lorda Rejleja (Rayleigha, 1842-1919), teoretičara akustike)

1.8 Gustina zvučne energije

Energija zvučnog talasa nije jednako raspoređena u prostoru. Ona je najveća u mestima najvećeg pritiska i brzine, a jednak je nuli tamo gde su pritisak i brzina jednak nuli (sl.4). U prostornoj akustici se pod **gustinom zvučne energije** podrazumeva vremenska srednja vrednost zvučne energije po m^3 . Budući da se intezitet zvuka odnosi na površ od $1m^2$ i put što ga zvuk pređe u $1s$, dakle $c \left[\frac{m}{s} \right]$, gustina zvučne energije dobija se iz odnosa:

$$E = \frac{I}{c} \quad (13)$$



Slika 4. Trenutno stanje u prostornoj raspodeli zvučnog pritiska, oscilatorne brzine i gustine zvučne energije ravnog talasa

Za vazduh vredi:

$$E = 7,1 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 \left[\frac{W \cdot s}{m^3} \right], \quad (14)$$

p - zvučni pritisak [Pa]

1.9 Zvučna snaga

Pod **zvučnom snagom** P podrazumeva se zvučna energija koja u jednoj sekundi prostruji kroz površ veličine S postavljenu normalno na smer kojim se širi zvuk:

$$P = S \cdot p \cdot v = S \cdot \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (15)$$

Za vazduh, i uz pritisak izražen u Pa odgovara:

$$P = 2,44 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot p^2 [W] \quad [2] \quad (16)$$

Za neke izvore zvuka zvučna snaga koju oni emituju u okolni prostor data je u tabeli 4:

Tabela 4. Zvučna snaga za neke zvučne izvore

Izvori zvuka	Zvučna snaga [W]
Normalan razgovor, srednja vrednost	oko $7 \cdot 10^{-6}$
Ljudski glas	oko $2 \cdot 10^{-3}$
Violina	oko 10^{-3}
klavir	oko $2 \cdot 10^{-1}$
Truba	oko $3 \cdot 10^{-1}$
Orgulje	1-10
Bubanj	oko 10
Veliki zvučnik, najveća snaga	preko 10^2

Koliko je mala snaga čovečjeg glasa možemo videti iz ovog primera: Kada bi svi Novosađani, kojih ima oko 600 000, govorili istovremeno ukupna proizvedena zvučna snaga iznosila bi, $P = 6 \cdot 10^5 \cdot 7 \cdot 10^{-6} W = 42 \cdot 10^{-1} W = 4,2 W$. Bila bi to, dakle, skoro 10 puta manja snaga od one koju troši najslabija sijalica za kućnu rasvetu.

1.10 Decibel

U zvučnoj akustici rasponi zvučnih snaga i rasponi zvučnih pritisaka su vrlo veliki. Bol ili nelagodnost u uhu nastaje pri zvučnoj jačini $1 \frac{W}{m^2} = 10^{-4} \frac{W}{cm^2}$. Na pragu čujnosti uho oseti kao zvuk već zvučni intezitet $10^{-12} \frac{W}{m^2} = 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$. Ti se zvučni inteziteti odnose kao $10^{12} : 1$, što odgovara odnosu zvučnih pritisaka $10^6 : 1$.

Zbog tako velikih raspona, odnosno velikih brojeva, vrlo je praktično da se zvučne snage i pritisci izražavaju **logaritmom raspona** (odnosa).

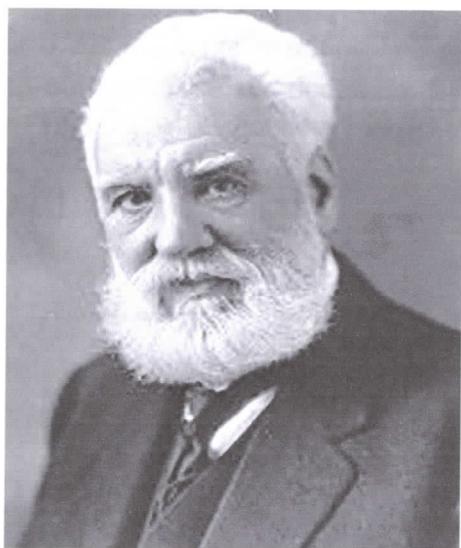
Logaritam odnosa dve snage izražava se u "belima" (u čast **Grejema Bela** (Alexander Graham Bell, 1847-1922)), pronalazača telefona. Iz praktičnih razloga koristi se logaritamski odnos snaga u **decibelima** (dB).

Ako su zvučni inteziteti I_1 i I_2 , a n broj decibela koji označavaju njihov odnos, onda možemo zapisati:

$$n = 10 \log \frac{I_1}{I_2} [\text{dB}] \quad (17)$$

Budući da je zvučni intezitet srazmeran kvadratu zvučnog pritiska, odnosno kvadratu oscilatorne brzine, to se za odnos zvučnih pritisaka ili odnos oscilatornih brzina, broj decibela dobija prema formuli:

$$n = 20 \log \frac{p_1}{p_2} = 20 \log \frac{v_1}{v_2} [\text{dB}] \quad (18)$$



Aleksandar Grejem Bel (1847-1922) [7]

1.11 Nivo zvučnog pritiska, zvučnog inteziteta i zvučne snage

Odnos zvučnih pritisaka ili zvučnih inteziteta izražen u decibelima (dB) ne omogućava da se nađe njihov iznos. Da bi se to ostvarilo, potrebno je imati podatak vrednosti jedne od tih veličina. Međunarodnim dogovorom akustičara utvrđeno je da referentni zvučni pritisak bude $2 \cdot 10^{-5} Pa = 2 \cdot 10^{-4} \mu bar$. Uz taj pritisak zvučna jačina iznosi $10^{-12} \frac{W}{m^2}$, pa je to vrednost referentnog zvučnog inteziteta.

Nivo zvučnog pritiska dobija se iz izraza:

$$L_p = 20 \log \frac{P[Pa]}{2 \cdot 10^{-5}} [dB] , \quad (19)$$

gde je $2 \cdot 10^{-5} Pa$ nulti nivo pritiska (P_0).

Nivo zvučnog inteziteta se dobija iz izraza:

$$L_i = 10 \log \frac{I \left[\frac{W}{m^2} \right]}{10^{-12}} [dB] , \quad [3] \quad (20)$$

gde je $10^{-12} \frac{W}{m^2}$ nulti nivo inteziteta zvuka (I_0).

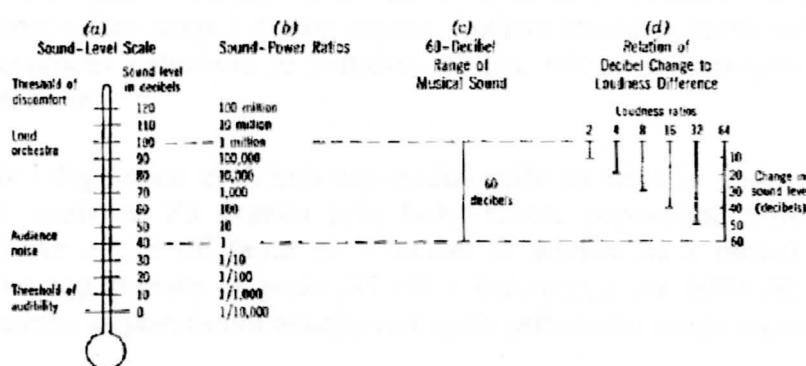
Kao što se može govoriti o nivou zvučnog pritiska i nivou zvučnog inteziteta tako je opravдан i pojam **nivoa zvučne snage**. Referentna zvučna snaga (ili zvučna snaga nultog nivoa) je $10^{-12} W$. Prema tome sledi:

$$L_p = 10 \log \frac{P(W)}{10^{-12}} [dB] , \quad (21)$$

gde je $10^{-12} W$ nulti nivo zvučne snage (P_0) [1]

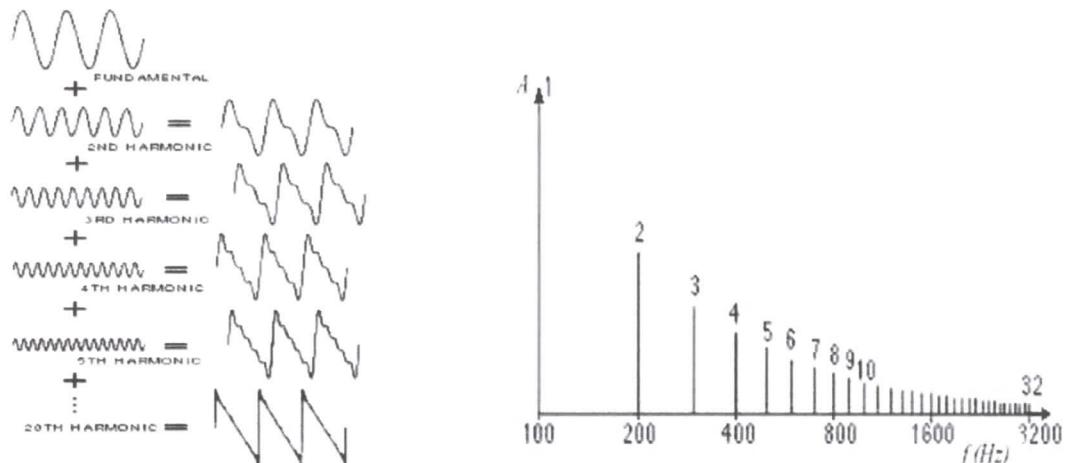
Standardno se intezitet zvuka u dB prikazuje u odnosu na referentni iznos od $20 \mu Pa$, koji odgovara pragu čujnosti, pa se to obično naznačava dodatkom SPL. Npr. šapat ima $20 dB(SPL)$, govor $50 dB(SPL)$, buka $90 dB(SPL)$, a za zvuk inteziteta $140 dB(SPL)$, kaže se da je granica bola.

Veber-Fehnerov zakon (sl.5) [7]



1.12 Zvučni spektar

Pri proučavanju neke zvučne pojave potrebno je poznavati vremensku karakteristiku zvučnog pritiska. Svaki periodičan proces može se rastaviti na niz jednostavnih periodičnih oscilovanja – **Furieov red**. Slično se analiziraju neperiodični procesi (Furieov integral). Kao i u optici i u akustici se pojedine sastavne komponente nekog zvuka prikazuju linijama.



Slika 6. Frekvencijski spektar složenog zvuka [4]

Prema obliku zvučnog spektra zvukove delimo na sledeće vrste:

- **Čist ton** je jednostavno sinusoidno oscilovanje. U spektralnom prikazu je prikazan kao jedna linija na određenoj frekvenciji (slika 6). Ovakvi tonovi gotovo uopšte ne nastaju u prirodi, ali se u elektroakustici mnogo upotrebljavaju za merne svrhe.
- **Muzički ton** sastoji se od osnovnog tona i manjeg ili većeg broja harmonijskih tonova. Amplituda osnovnog tona ne mora uvek biti veća od onih koji imaju druge komponente. **Visina tona**, kako je čujemo uhom, određuje osnovni ton. Zanimljivo je da se ona ne menja ako se osnovni ton priguši, pa čak i onda kad se on potpuno isluči. Broj i jačina harmonijskih tonova određuje **boju tona** nekog instrumenta.
- **Šum** je nepravilno oscilovanje u kojem nema ni stalnih frekvencija ni stalnih amplituda. Spektar šuma nije linijski već kontinualan, što znači da pojedini tonovi gusto ispunjavaju celo jedno frekventno područje. Posebna vrsta šuma je **prasak**. To je vrlo kratkotrajna zvučna pojava velike snage i strmog uspona. Spektar praska je kontinualan, za sve vrste tog zvučnog fenomena uglavnom je jednakog oblika, tek sa pomeranjem u horizontalnom i vertikalnom smeru.
- **Buka** je jak i dugotrajan zvuk koji nepogodno utiče na zdravlje ljudi. Ona predstavlja zbir nepravilnih zvukova. Po pravilu jaka buka stvara nepovoljne fiziološke i psihološke promene. Buka od 75 dB (auto na 5 metara ili telefon na 2 metra) već stvara umor i povišenje krvnog pritiska, a preko 85 dB i frekvencije od 1000 Hz stvara oštećenja u slušnom aparatu, sa povećanim uticajem na opšte psihološko stanje organizma.

1.13 Lokalizacija izvora zvuka

Lokalizacija je većim delom bazirana na:

- vremenskoj razlici između levog i desnog uha
- razlici u čujnosti levog i desnog uha zbog položaja glave i ušnih školjki u odnosu na izvor zvuka
- faznih razlika između oba uha pri kontinuiranom signalu

1.14 Efekat prvog talasnog fronta

Ako je vremenska razlika između oba signala na mestu slušaoca veća od 1 ms, pozicija slušnog doživljaja zavisi od pozicije izvora čiji signal je prvi stigao do slušaoca. Drugi izvor postaje irelevantan u lokalizacijskom smislu.

1.15 Odjek

Prekorači li kašnjenje neku gornju granicu, nastaju dva slušna doživljaja, čije pozicije uglavnom zavise od pozicija izvora zvuka. To se naziva **odjek**. Prag odjeka nije oštra granica, zavisi od vrste i jačine signala i od smera upada i kreće se između 35 i 50 ms. Povećanjem jačine zvuka prag se smanjuje, tj. odjek se pojavljuje kod manjeg vremena kašnjenja. Zvuk može da bude i više puta odbijen, a ta pojava se naziva **echo**.

Sve ono što danas znamo o zvuku, a pogotovo o tonu, prikupio je čuveni lekar, fiziolog i fizičar **Herman fon Helmholtc** (Hermann von Helmholtz, 1821-1894) u svojoj poznatoj knjizi čiji je naziv "**Učenje o osećaju tonova kao fiziološka osnova teorije muzike**".



Herman von Helmholtc (1821-1894) [7]

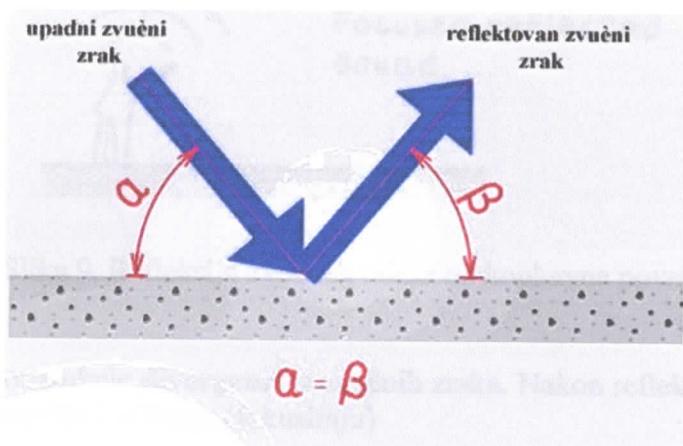


2. POJAVE KOJE PRATE ŠIRENJE ZVUKA

2.1 Refleksija zvuka

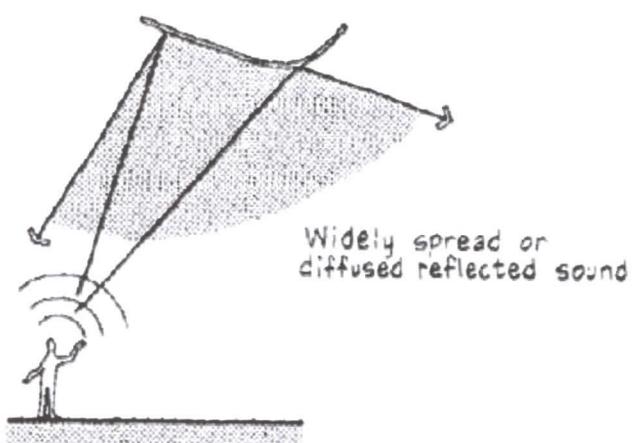
Put širenja zvuka može se prikazati zvučnim zracima. To su zamišljeni pravci normalni na front talasa, koji izlaze iz izvora zvuka. Optički zakoni vezani za refleksiju svetlosti primenjuju se i u akustici. Mora biti ispunjen uslov da je talasna dužina zvučnog talasa mnogo manja od dimenzije površi od koje se talas reflektuje.

Slika 7 sadrži prikaz refleksije ravnog zvučnog talasa. Prema zakonima refleksije upadni ugao jednak je reflektovanom uglu, a upadni i reflektovani zrak su u istoj ravni. [1]



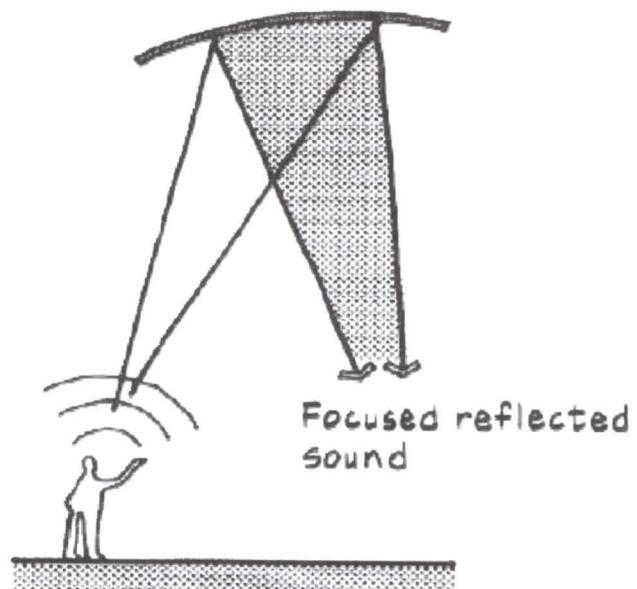
Slika 7. Refleksija zvučnog talasa od ravne površi [7]

Na sl. 8 izvor zvuka je u blizini konveksne površi koja je sastavljena od malih ravnih delova pa se može primeniti zakon refleksije.



Slika 8. Refleksija zvučnog talasa od konveksne površi

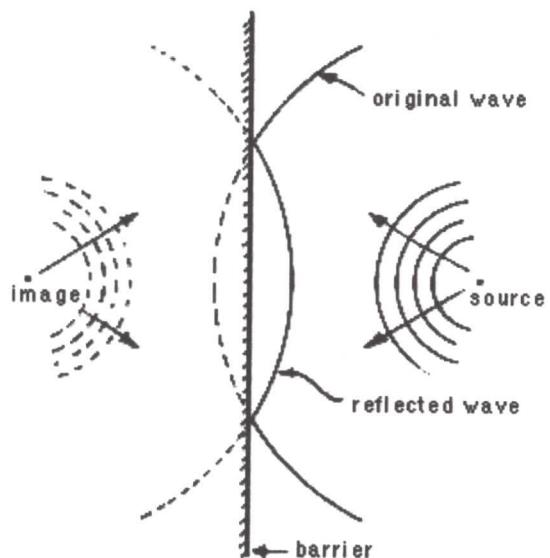
Isti postupak će nam poslužiti za refleksiju od konkavne površi (sl.9)



Slika 9. Refleksija zvučnog talasa od konkavne površi

Konveksna površ prouzrokuje **divergenciju** zvučnih zraka. Nakon refleksije od konkavne površi zraci se, naprotiv, koncentrišu i sabiraju (fokusiraju)

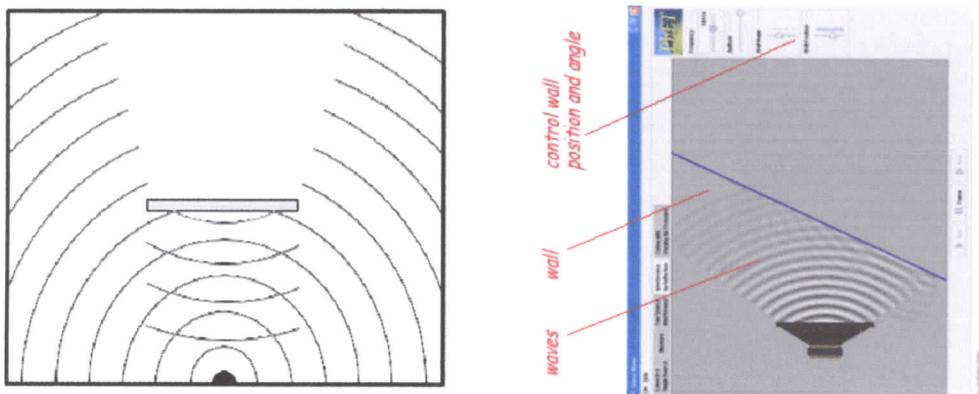
Prema **Frenl-Hajgensovom (Fresnel-Huygens) principu** svaki poremećaj u nekoj elastičnoj sredini izaziva elementarni okrugli talas. Na sl. 10 takav reflektovan talas je nastao udarom okruglog talasa o ravnu površ (ploču). Reflektovan talas, takođe, možemo smatrati direktnim talasom ogledalskog izvora zvuka.



Slika 10. Reflektovanje okruglih talasa od ravne ploče [4]

Sledeća slika (sl.11) daje dva primera zvučne refleksije od prepreke mnogo većih dimenzija nego što je dužina zvučnih talasa (λ). U prvom se zvučni talasi potpuno odbijaju od prepreke, pa ih iza nje praktično nema. Taj prostor naziva se "zvučna senka". U drugom slučaju je prepreka prema smeru zvučnih talasa postavljena pod tupim uglom, tako da deluje na reflektor. I tu se zvučni talasi u potpunosti reflektuju, a iza reflektora nastaje "zvučna senka".

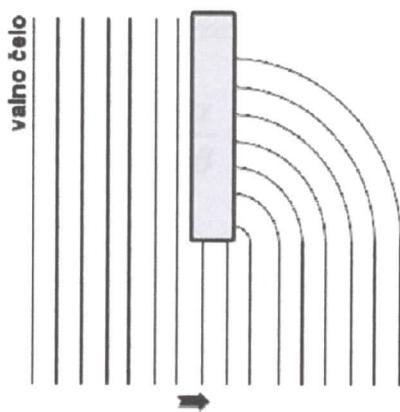
Zakoni refleksije zvuka koji su ovde primenjeni sasvim odgovaraju onima u geometrijskoj optici, pa odatle i naziv **geometrijska akustika**.



Slika 11. Zvučne refleksije od prepreka mnogo većih dimenzija nego što je talasna dužina zvučnih talasa [7]

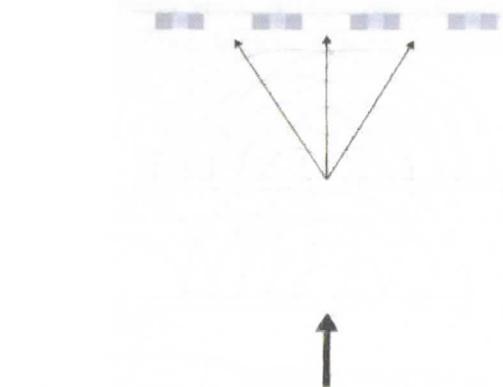
2.2 Difrakcija zvučnog talasa

Već je napomenuto da zakoni refleksije, poznati u optici, vrede u akustici samo onda ako su talasi mnogo kraći od dimenzija prepreke na koju se reflektuju. Iz svakodnevnog iskustva znamo da možemo čuti i ono što se događa iza neke prepreke. Zvučni talasi zaobilaze prepreke, menjajući pri tome smer širenja (sl.12). Kod njih zapažamo **difrakciju** ili skretanje. Što je veći odnos talasne dužine prema dimenzijama prepreke, difrakcija je veća. [1]



Slika 12. Difrakcija ravnog zvučnog talasa oko ruba prepreke

Difrakcija zvučnih talasa prilikom prolaska kroz mali otvor vidi se na sl. 13. Tu je zamišljeno da je talasna dužina mnogo veća od dužine otvora. Kao što pokazuje slika, otvor tada postaje izvor okruglog talasa, koji se širi na sve strane iza prepreke. Pošto kroz uzan otvor može proći mala količina zvučne energije, intezitet zvuka iza prepreke je mali. To znači da se praktično od prepreke reflektuje sva upadna zvučna energija.



Slika 13. Difrakcija zvučnog talasa po prolasku kroz otvor manjih dimenzija od talasne dužine [4]

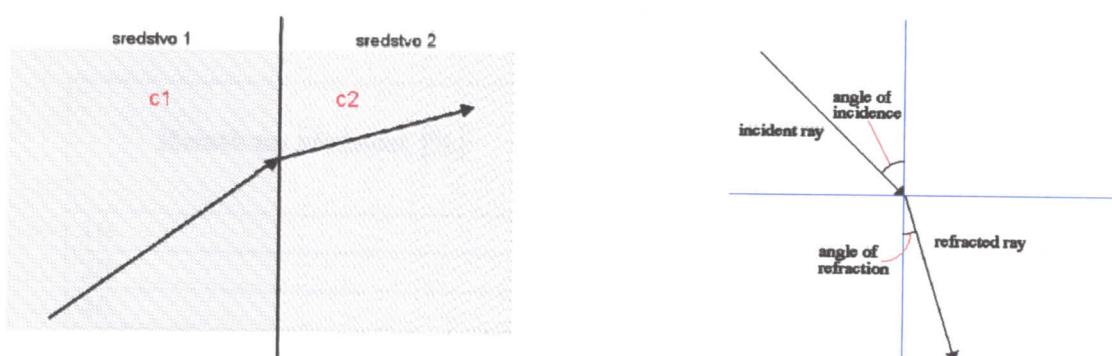
Ako je otvor u prepreci mnogo veći od talasne dužine, on ne slabiti intezitet zvuka, već mu se oblik zvučnog "mlaza" geometrijski određuje otvorom. Deo zraka koji udari o prepreku se odbija.

Ako je prepreka mala prema talasnoj dužini ona praktično ne utiče na širenje zvučnog talasa. Zvučne senke iza prepreke gotovo da i nema, a neznatna je i reflektovana energija.

2.3 Refrakcija zvučnog talasa

Slično svetlosnim zracima i zvučni zraci se lome pri prelazu iz jedne u drugu sredinu. Veličina promene smera ili **refrakcije** zavisi od odnosa brzine širenja zvuka (sl.14)

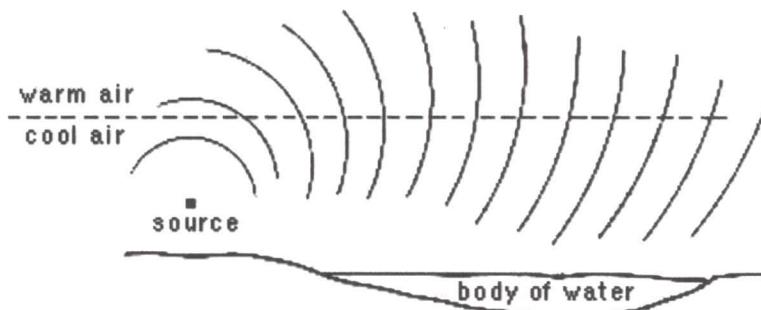
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (22)$$



Slika 14. Refrakcija zvučnih talasa [7]

Prelaskom zvučnih zraka iz sredine sa jednom brzinom širenja u sredinu sa drugom brzinom širenja, nastaje prelamanje zraka jer su talasne dužine različite. Između brzine zvuka u vazduhu i one u čvrstim materijalima velika je razlika, s toga prema izrazu br.22, proizilazi da pri prelasku zvuka iz vazduha u čvrst materijal i obrnuto zvučni zraci izlaze ili ulaze gotovo normalno na dodirnu ploču.

Iznad tla slojevi vazduha su različite temperature. U onima koji su toplijii brzina zvuka je veća pa je prema tome njihova talasna dužina veća. S toga zaključujemo da su u toplijem vazduhu zvučni talasi međusobno više razmaknuti. Zbog toga se smer u kome se zvuk širi savija kao na slici 15.



Slika 15. Refrakcija zvučnih talasa iz hladnog u topli atmosferski sloj

Ako je pri zemlji vazduh toplij u odnosu na više slojeve, zvuk će se kretati prema gore. Obrnuto je uz toplige gornje slojeve. Time se razjašnjava zašto se u proleće, kad se prvi topli vazduh nađe iznad zaledene površine ili uopšteno pri dolasku toplih vazdušnih struja, zvuk čuje iz velike daljine. Suprotno, leti, kad je vruć vazduh pri samom dnu domet zvuka je mali.

2.4 Apsorpcija zvuka

Apsorpcija zvuka je proces slabljenja zvuka prilikom njegovog prolaska kroz neku sredinu ili prelaza preko neke površine. Zvučna energija se pri tome najvećim delom pretvara u toplotu.

Apsorpcija zvuka u vazduhu nastaje zbog fizičke reakcije molekula vode i molekula kiseonika. Iz toga se zaključuje da pojava zavisi od vlažnosti vazduha.

Tabela pokazuje kako na apsorpciju vazduha utiče relativna vlažnost i frekvencija pri temperaturi od 20 °C (prema Knudsenu):

Tabela 5. apsorpcija vazduha u odnosu na vlažnost i frekvenciju [1]

Relativna vlažnost [%]	Prigušivanje $\left[\frac{dB}{m} \right]$		
	3000 Hz	6000 Hz	10 000 Hz
10	0,08	0,15	0,20
20	0,045	0,15	0,27
40	0,02	0,08	0,17
50	0,02	0,07	0,15

Uopšteno se može kazati da se apsorpcija sa povećanjem vlažnosti vazduha smanjuje, a da se sa porastom frekvencije povećava. Zbog velike apsorpcije zvuka na višim frekvencijama daleka grmljavina se čuje kao prigušeno bruanje.

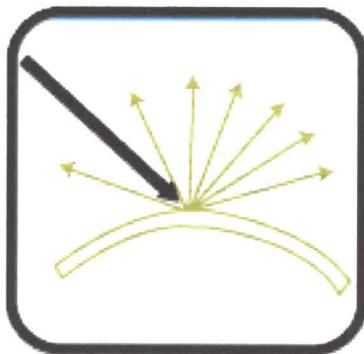
Kod materijala koji se koriste za apsorpciju zvuka definiše se **koeficijent apsorpcije (α)**, kao odnos apsorbovane i upadne zvučne energije. Koeficijent apsorpcije vezan je s **koeficijentom refleksije (r)** i to preko formule:

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (23)$$

Taj koeficijent važan je da bismo mogli oceniti koji je materijal pogodan za određenu svrhu pri projektovanju prostorija u praksi (svrha može biti: skraćivanje vremena odjeka, prigušenje buke itd.). Pomoću apsorpcijskih materijala i njihovih akustičkih svojstava dobija se kontrolisana apsorpcija u prostoriji i kontroliše se raspodela zvučne energije.

2.5 Difuzija zvuka

Kod apsorpcije i refleksije ugao upada zvučnog talasa jednak je uglu refleksije. Za materijale i površi čija je **talasnost h** reda veličine talasne dužine zvučnog talasa ($h \approx \lambda$) dolazi do reflektovanja zvučnih talasa i pod uglovima koji nisu jednaki uglu upada.



Slika 16. Difrakcija zvučnog talasa [7]

2.6 Prelaz zvučne energije kroz zvučne materijale

Kad zvučni talasi udare o površ nekog predmeta jedan deo energije se reflektuje i apsorbuje, a ostatak se prenese na drugu stranu površi tog predmeta. Količina energije koja se od neke granične površi reflektuje, odnosno koju telo propusti, zavisi od odnosa akustičkog otpora materijala i granične površi. Zvučna energija manje će prelaziti iz jednog materijala u drugi što se više razlikuju u tvrdoći i gustini, što je veća razlika u akustičnim otporima. Za prelaz zvuka iz jednog materijala (sredine) u drugi, važi odnos:

$$\frac{E_1}{E_2} = k = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad , \quad (24)$$

gde je E_1 gustina zvučne energije u jednom materijalu (sredini), E_2 u drugom materijalu, a Z_1 i Z_2 akustični otpori, a k je koeficijent koji važi za prelaz zvuka iz vazduha u neki materijal i obrnuto.

2.7 Doplerov efekat



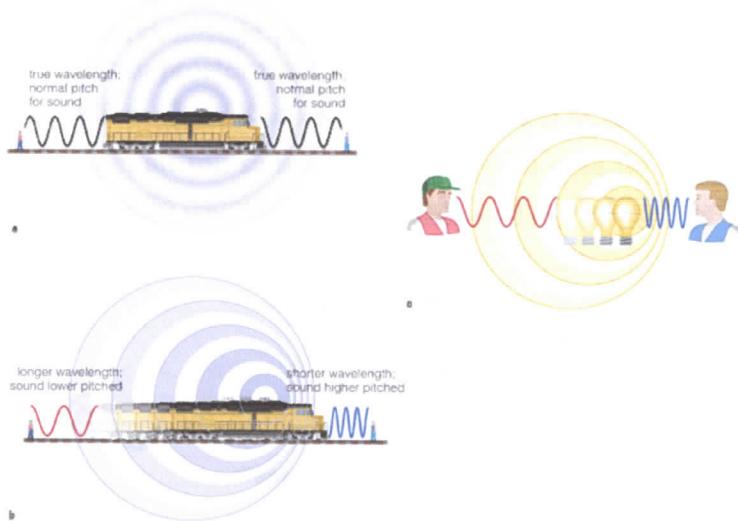
Kristijan Andreas Doppler

Pojava promene visine tona što ga proizvodi izvor zvuka koji se kreće u odnosu na slušaoca (npr. automobil koji velikom brzinom projuri kraj slušaoca) zove se **Doplerov efekat** (Cristian Andreas Doppler 1803-1853, profesor matematike u Pragu i Beču). Uzrok toj promeni visine je to što pri približavanju izvora zvuka slušaocu, do slušaoca dolazi više zvučnih talasa u jedinici vremena nego kad izvor zvuka stoji, tj. frekvencija zvuka koji slušaoc čuje je tada viša od one koju izvor zapravo emituje (sl. 17). Situacija je obrnuta kad se izvor udaljava od slušaoca. Pri tome nije važno da li se kreće izvor zvuka ili slušaoc, u najopštijem slučaju kreću se oba istovremeno.

Frekvencija koja se dobija kao rezultat Doplerovog efekta izražena je formulom:

$$f_p = \frac{c \pm c_p}{c \mp c_i} \cdot f_i \quad (25)$$

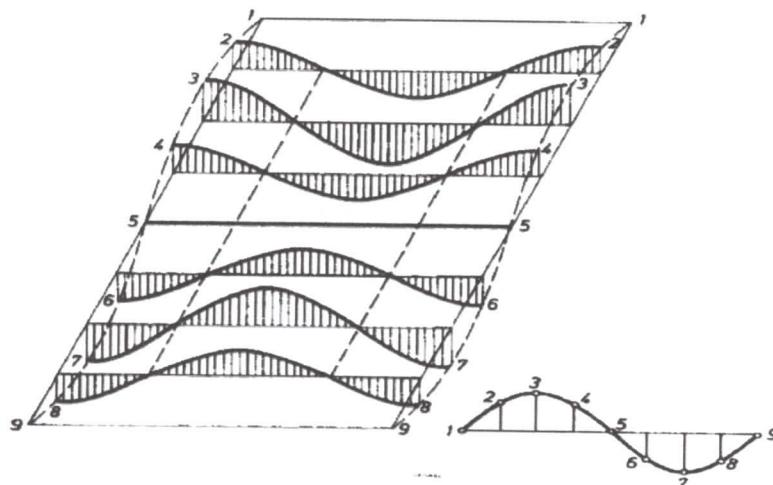
gde je c brzina širenja zvuka u vazduhu, c_p brzina kretanja slušaoca, c_i je brzina izvora zvuka, a f_i njegova frekvencija. Ova formula važi ako vazduh miruje. [1]



Slika 17. Doplerov efekat [7]

2.8 Stojeći talasi

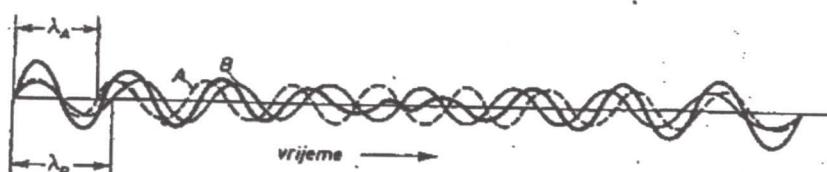
Kad se dva jednaka zvučna talasa kreću jedan prema drugome u istom smeru nastaje **stojeći talas**. Osnovna osobina takvih talasa je u tome što je efektivna vrednost pritiska na nekim mestima sredine, u kojoj se zvuk širi, trajno jednaka 0. Ta mesta koja mogu biti tačke, crte ili površine nazivaju se **čvorovima**. Za četvrtinu talasne dužine ($\frac{\lambda}{4}$), udaljenija mesta, odnosno tačke u kojima je zvučni talas maksimalan, nazivaju se **vrhovima (trbusima)**. Sl. 18 pokazuje prostorno vremenske dijagrame zvučnog pritiska za vreme jedne periode oscilovanja (T).



Slika 18. Stanja zvučnog pritiska u stojećem talasu
za vreme jedne periode

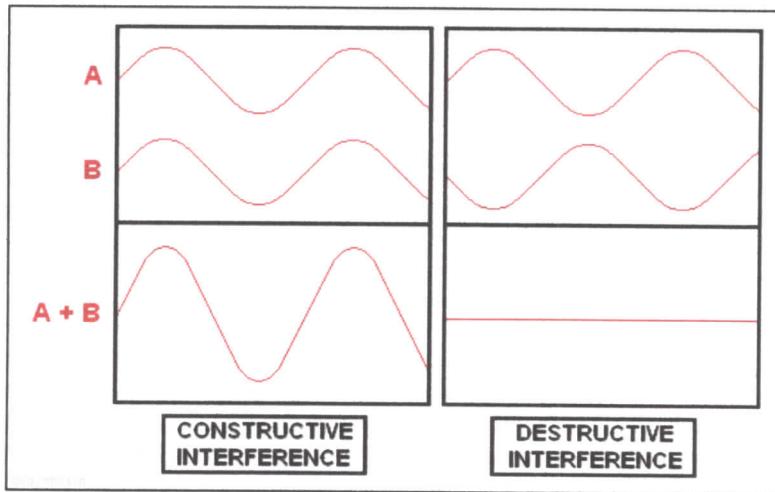
2.9 Treptajni talasi i interferencija zvuka

Za stojeće talase je bitno da su to dva talasa potpuno jednake talasne dužine koji putuju u suprotnim smerovima. Ta pojava nastaje prilikom udara talasa o neku prepreku na kojoj dolazi do refleksije. Ako se, pak, u nekom prostoru nađu dva talasa kojima su talasne dužine različite, nastaju tzv. **treptaji** što se jasno vidi na sl.19. Kao rezultat nastaje novi talas frekvencije f_s koja je srednja vrednost osnovnih frekvencija, ali mu se amplituda menja od nule do maksimuma. Frekvencija f_s je tada jednak razlici frekvencija osnovnih tonova (npr. ako su frekvencije osnovnih tonova 10 i 9 Hz, onda će nastati treptaji s frekvencijom od 1 Hz).



Slika 19. Treptajni talasi

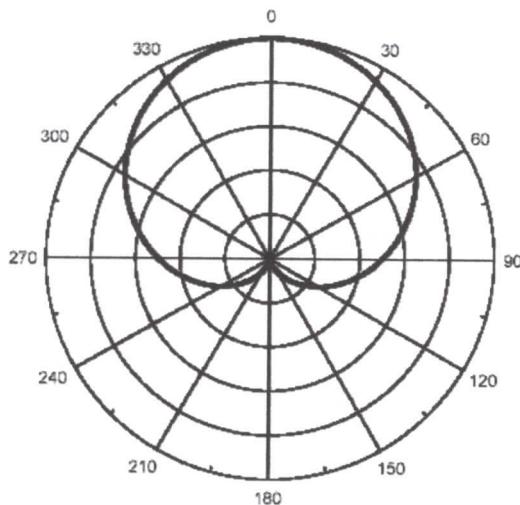
Interferencija se sastoji u povećanju ili brisanju zvučnog talasa. Kada su zvučni talasi u fazi dolazi do pojačanja intenziteta, a van faze do slabljenja tj. brisanja.



Slika 20. Interferencija zvučnih talasa

2.10 Usmerenost zvučnog izvora

Pri posmatranju pojava koje nastaju u prostoru kad neki izvor emituje zvuk, treba paziti na **usmerenu karakteristiku izvora**. Uopšteno se može kazati da je intezitet talasa, kojima je talasna dužina mnogo veća od dimenzija izvora zvuka (zvučnika), približno jednak u svim smerovima. Na višim frekvencijama talasna dužina je približna dimenzijama izvora zvuka ili manja od njih. U tom frekventnom području dolazi do usmeravanja zvučnih talasa. Ta pojava se vidi iz usmerenih karakteristika zvučnog izvora kakve prikazuje sl. 21.



Slika 21. Dijagram usmerenosti zvučnog izvora [6]

3. AKUSTIKA PROSTORIJA

Svrha joj je da se ostvare uslovi za **dobro, kvalitetno i prijatno slušanje**. Važno je da pri tome ne budu zadovoljni samo slušaoci, nego i izvođači. Tzv. *dobra akustika* postiže se uspešnim zadovoljavanjem više objektivnih i subjektivnih uslova

Prvo sistematsko istraživanje ove relativno mlade naučne discipline izvršio je krajem XIX i početkom XX veka američki fizičar Valas Klement Sabin. Najvažniji njegov prilog ovoj nauci je uvođenje **vremena odjeka prostorije**.

Akustički kvalitet koji se dobija prenosom pomoću komunikacijskih sistema, umnogome zavise od akustičkih osobina prostorija iz kojih se prenosi ili reprodukuje. Danas su akustički principi veoma važni pri projektovanju i izgradnji soba, učionica, sportskih i koncertnih dvorana, studia, režije, bolnica, hotela...

"Dobra akustika" se postiže zadovoljavajući ove uslove:

- U prostoriji ne sme biti buke (spoljašnje i unutrašnje)
- Zvuk u prostoriji mora biti u svim mestima dovoljne jačine
- u prostoriji ne sme biti eha ili lepršajućeg eha
- Na mestima koja su udaljenija od izvora zvuka treba direktnom zvuku dodati onaj reflektovan zvuk od pravilno postavljenih površi u prostoriji
- U prostoriji ne sme nastati neželjena rezonancija
- Odjek mora biti dovoljno mali da bi se izbeglo preklapanje zvuka nastalih govorom ili muzikom

Teorijska merenja i razmatranja koja se koriste prilikom izgradnje prostorija nam daju optimalnu dužinu odjeka koji mora da zavisi od veličine prostorije i od svrhe korišćenja prostorije. Takođe je važan i oblik prostorije jer utiče na raspodelu zvuka.

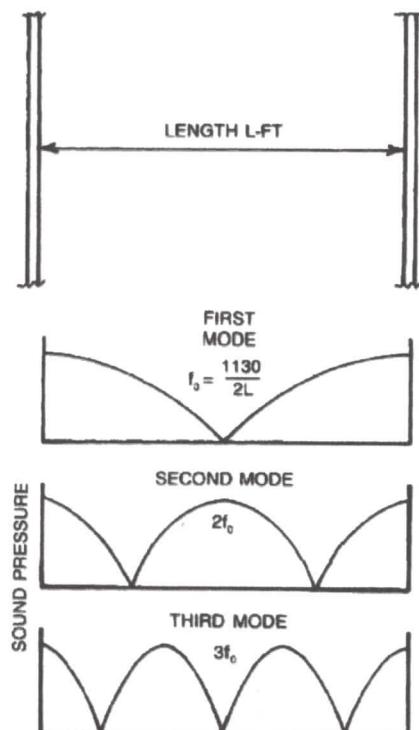
Oblik, zapremina i odjek (reverberacija) nam određuju i osobine prostorije. [1]

3.1 Oblik prostorije

To je jedan od najvažnijih faktora akustike prostorije. Svaki izvor zvuka u nekom prostoru može imati do beskonačno mnogo vlastitih ogledalskih slika, virtualnih izvora. U slučaju npr. dva paralelna, beskonačna zida, između kojih se postavi zvučni izvor (npr. beli šum), pojaviće se između zidova *stojeći talas*, čija je osnovna frekvencija (prvi (nulti) mod oscilovanja) zavisna od udaljenosti zidova d:

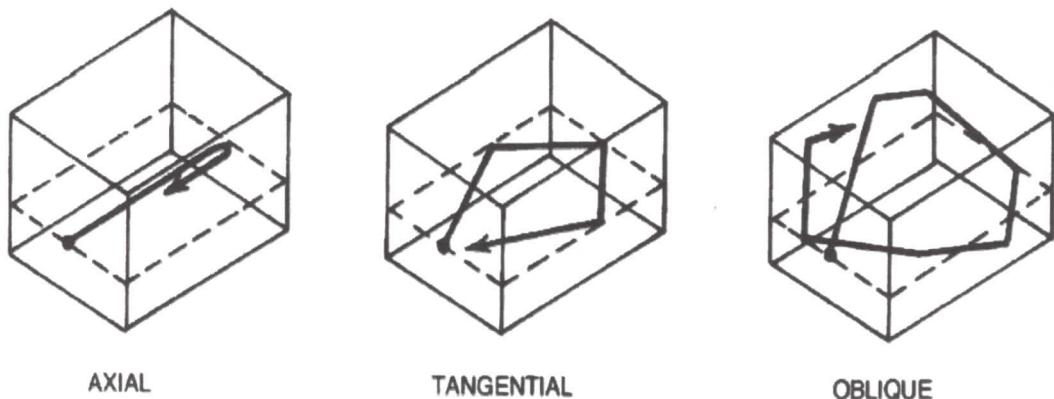
$$f_0 = \frac{c}{2d} = \frac{343}{2d} \text{ [Hz]}, \quad (26)$$

kao i viši *modovi* ($2f_0, 3f_0, \dots$).

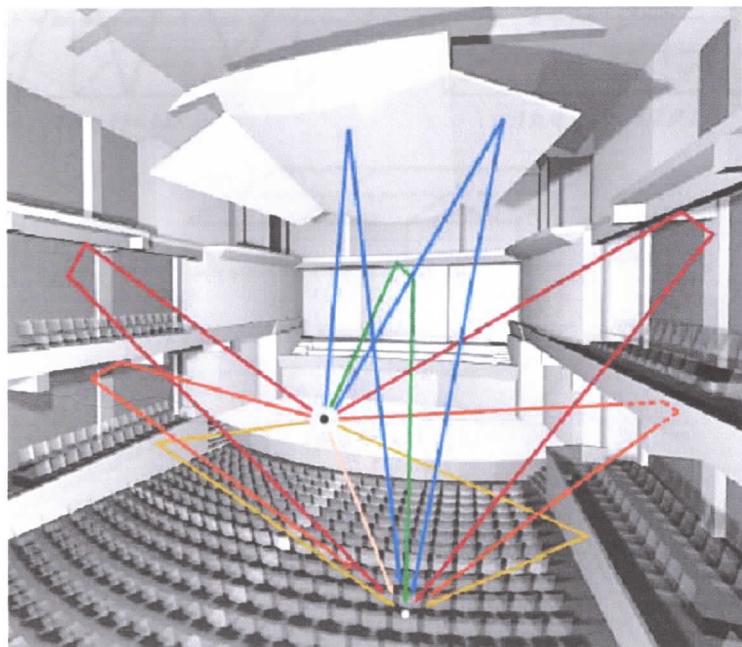


Slika 22. Pojava stojećih talasa u zavisnosti od veličine frekvencije i dimenzija prostorije.
Prikaz I, II i III moda. [6]

Širenje zvuka u prostoru može se prikazati i zracima ako je talasna dužina znatno manja od dimenzija prostora, dakle na višim frekvencijama. Tada se može za objašnjenje pojave koristiti korpuskularna metoda (“ray tracing”) umesto talasne:



Slika 23. Vizualizacija aksijalnih, tangencijalnih i kosih modova prostora upotrebom ray-tracing metode



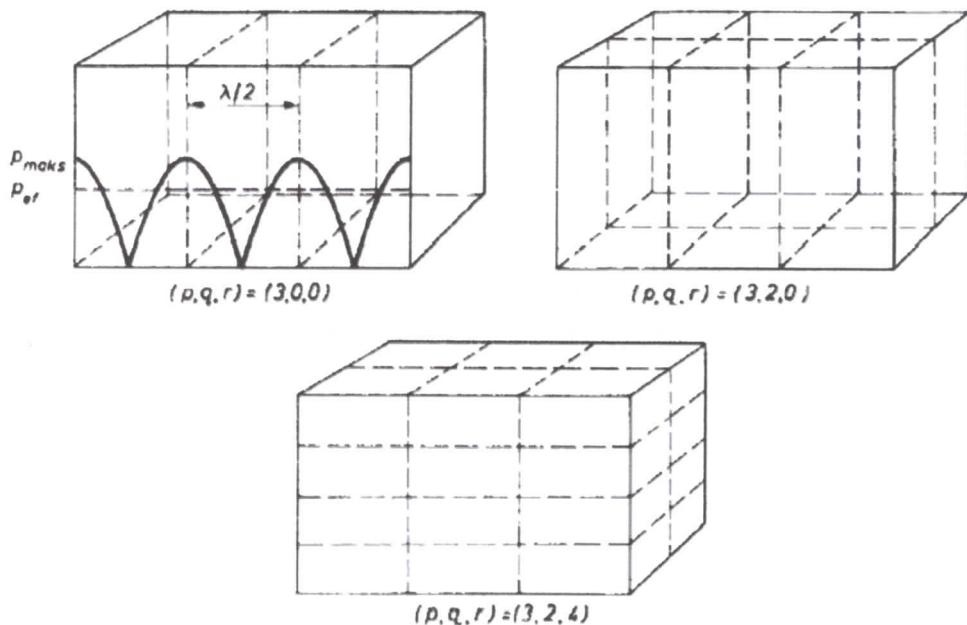
Slika 24. Zvuk u prostoru

3.1.1 Zvučni proces u prostoriji paralelopipednog oblika

Najčešći oblik prostora je paralelopipedni. Upotrebom talasne metode Lord Rejlej (Rayleigh) je 1869. izračunao prirodne (sopstvene) frekvencije nekog prostora paralelopipednog oblika:

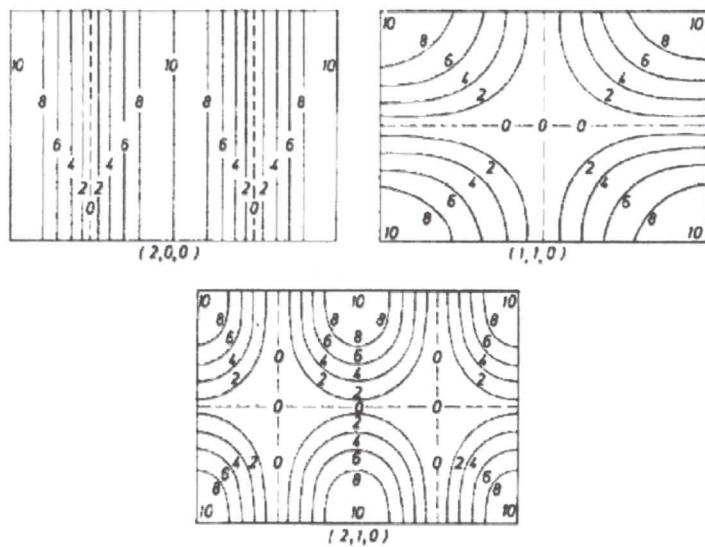
$$f = \left(\frac{c}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{p^2}{d^2} \right) + \left(\frac{q^2}{s^2} \right) + \left(\frac{r^2}{v^2} \right)}, \quad (27)$$

gdje su p , q i r celi brojevi ($0, 1, 2, 3\dots$) koji označavaju mod oscilovanja (aksijalni, tangencijalni, kosi, višestruki), a d , s i v su dužina, širina i visina (dimenzije) prostorije.

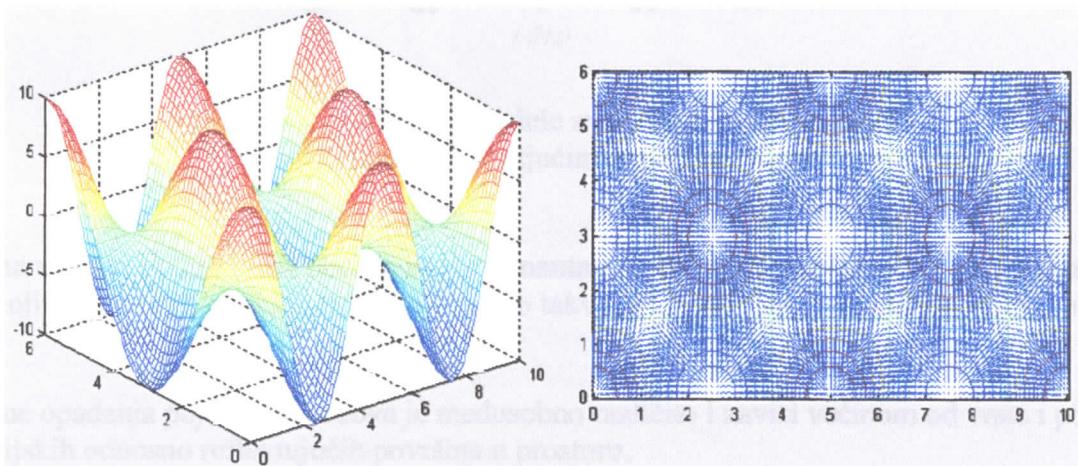


Slika 25. Modovi oscilovanja u nekoj prostoriji.

Zbog interferencije i rezonantnih pojava stojećih talasa pojedinih sastava nastaje nejednolika raspodela zvučnog pritiska.



Slika 26. Raspodela izobara (kriva jednakog zvučnog pritiska) u prostoriji zbog interferencije talasa sopstvenih frekvencija [1]



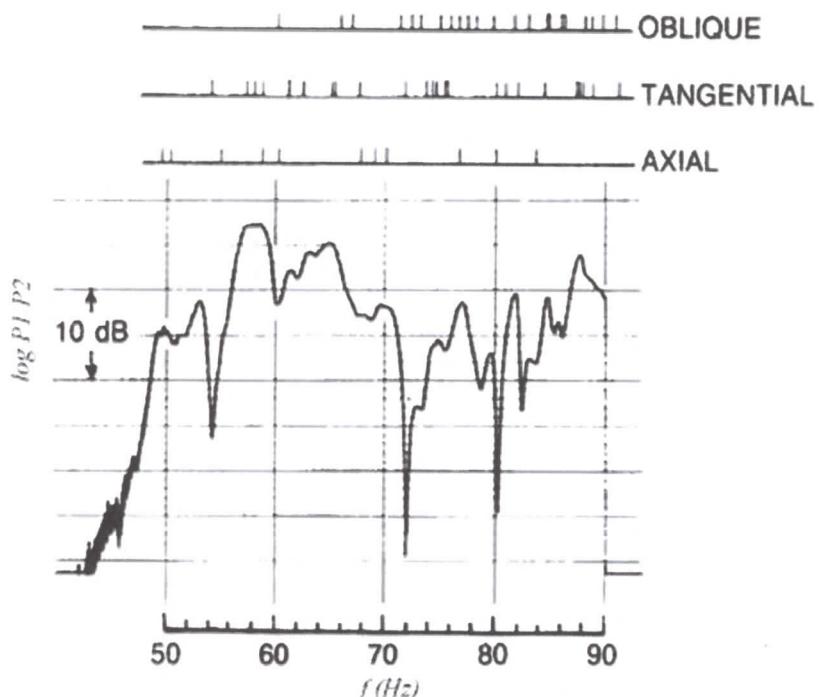
Slika 27. Raspodela zvučnog pritiska u prostoriji $A=10$, $B=6$, $C=3$, i uz $p=4$, $q=2$ i $r=0$ [6]

Broj rezonantnih frekvencija između nekih frekvencija f i $(f+df)$ se može približno izračunati po formuli:

$$dN = \frac{4\pi \cdot V \cdot f^2 \cdot df}{c^3}, \quad (28)$$

gde je V volumen, a c brzina zvuka.

Na niskim frekvencijama je razmak između pojedinih frekvencija veći, što slušno deluje vrlo nepovoljno. Merenje rezonantnih frekvencija može se obaviti npr. klizajućim sinusnim tonom između zadatih frekventnih granica. Merni rezultat je kompozitivni oblik raspona zvučnog pritiska u prostoriji unutar frekventnih granica, te će pokazati frekventnu zavisnost na nekom određenom mestu. O kojem modu se radi treba utvrditi proračunom prema konkretnim dimenzijama prostora.



Slika 28. Merenje raspodele zvučnog pritiska u sve tri ravni prostora klizajućim sinusnim tonom.

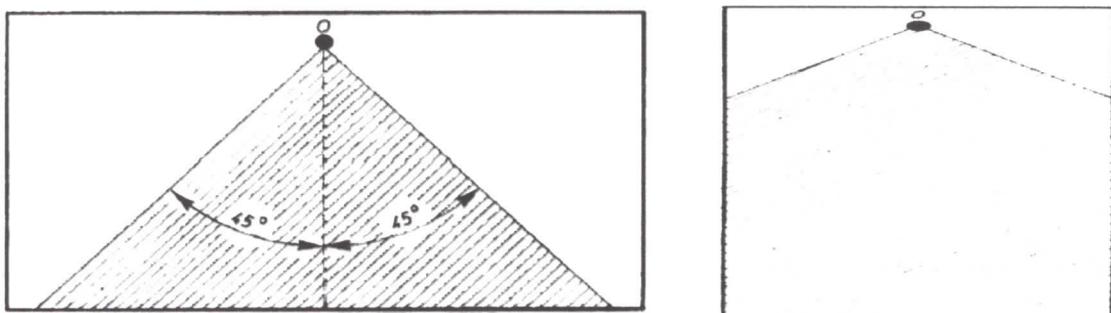
Prema višim frekvencijama postaje broj rezonantnih frekvencija uopšteno sve veći i razmak između njih sve manji, pa rezonantna pojava kao takva, osim što povećava jačinu, utiče na boju tona.

Vreme opadanja pojedinih modova je međusobno različito i zavisi većinom od vrste i položaja apsorpcijskih odnosno reflektujućih površina u prostoru.

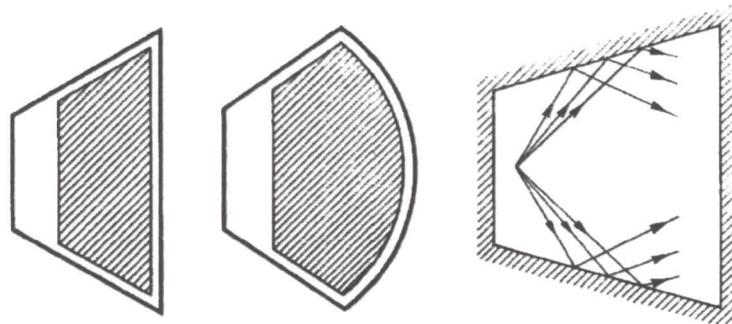
Širina pojasa pojedinih modova se povećava sa smanjenjem vremena odjeka. U uobičajenim studijima širina moda je u proseku oko 5 Hz (do pada amplitude za -3 dB).

3.1.2 Plan osnove

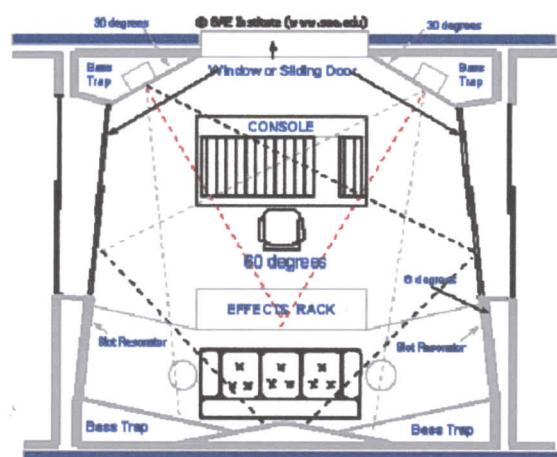
Osim oblika prostorije izuzetno je važan i njen plan osnove. Važno je da zvuk do slušaoca dolazi što kraćim, direktnim putem.



Slika 29. Zavisnost ozvučenja od oblika osnove prostorije

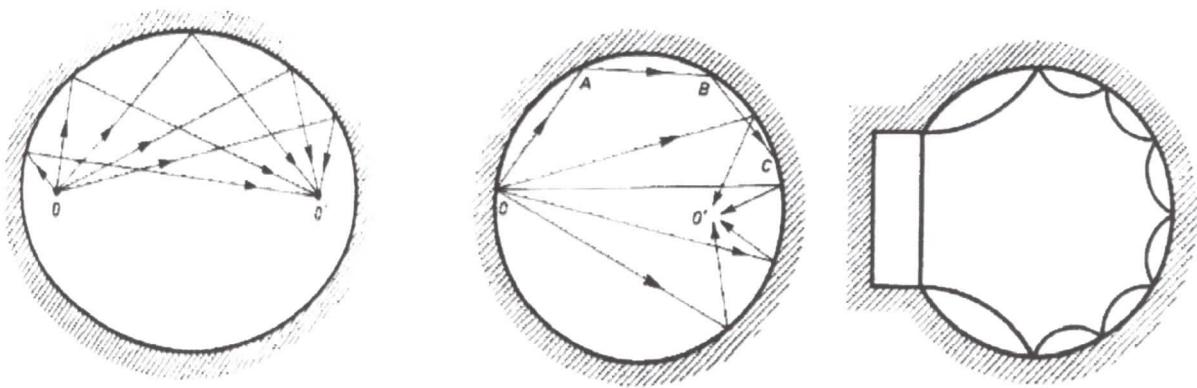


Slika 30. Za veće auditorije povoljna je lepezasta, trapezasta ili slična osnova [1]

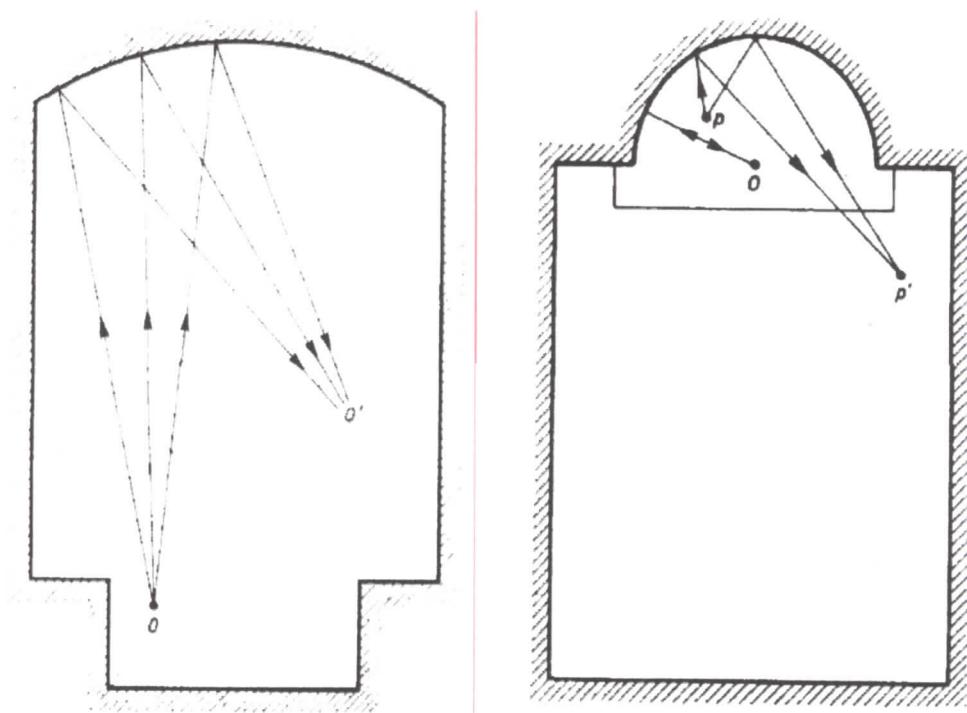


Slika 31. Plan osnove dnevnog boravka [5]

Kružne, eliptične i kombinovane osnove, kao i različiti konkavni ili kružni zidovi su vrlo nepovoljni zbog fokusiranja zvuka, ali se mogu delimično korigovati odgovarajućim difuzorima i reflektorima.



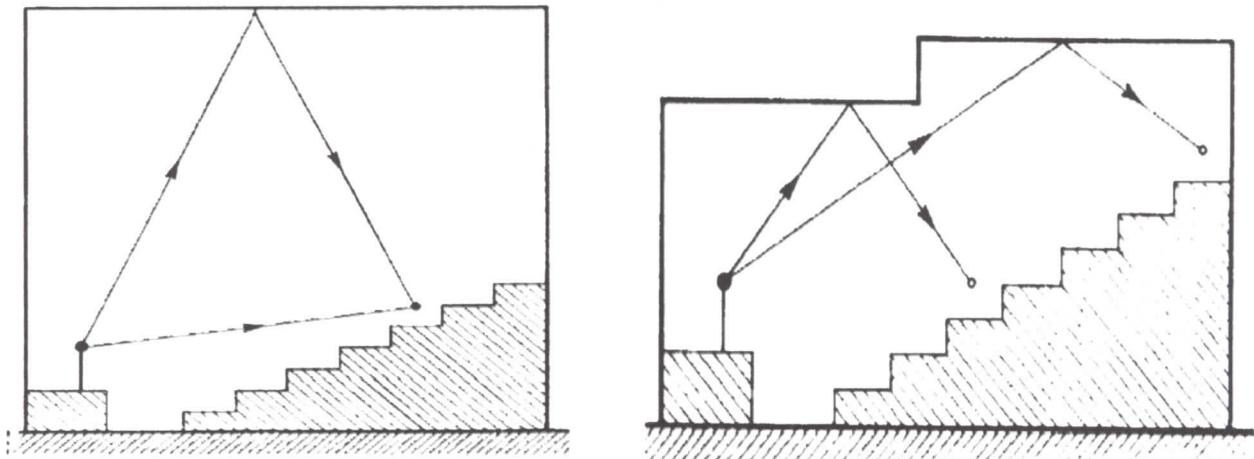
Slika 32. Korekcije nepovoljnih oblika prostorije



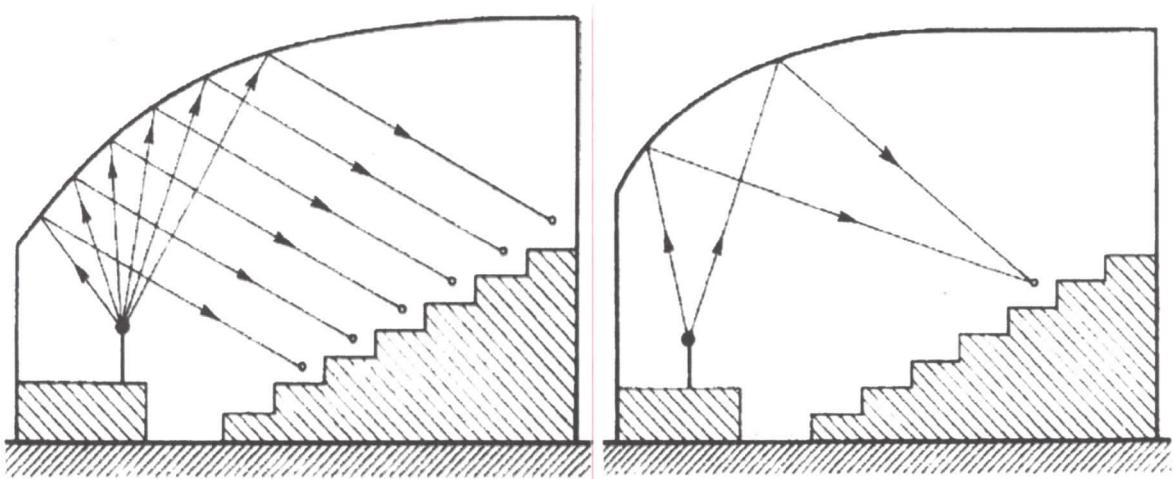
Slika 33. Pojava virtuelnih izvora zbog fokusiranja zvuka

3.1.3 Visina i oblik plafona

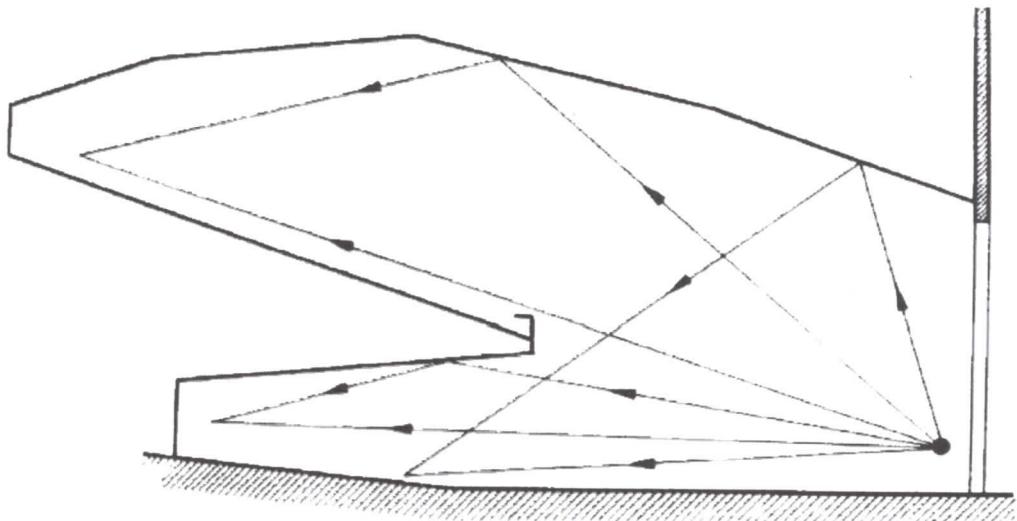
Za akustiku prostorija vrlo je važna visina i oblik plafona. Plafon treba da reflektuje što više energije prema sedištima u pozadini dvorane, jer su ona u pogledu glasnosti najlošija. Pri tome treba paziti da reflektovani zvuk do sedišta u pozadini ne stigne suviše kasno, jer će se inače pojavitи echo koji će npr. govor učiniti slabo razumljivim.



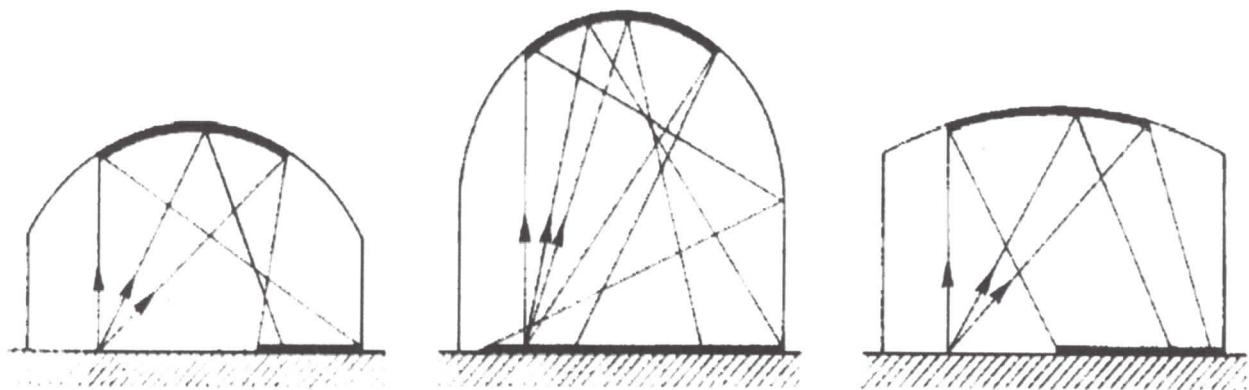
Slika 34. Nepovoljna visina plafona (levo) i povoljna izrada plafona (desno)



Slika 35. Ispravno i loše zakrivljen konkavni plafon



Slika 36. Površinu plafona treba iskoristiti kao reflektor



Slika 37. Različiti radijusi zakrivljenosti plafona imaju različite efekte

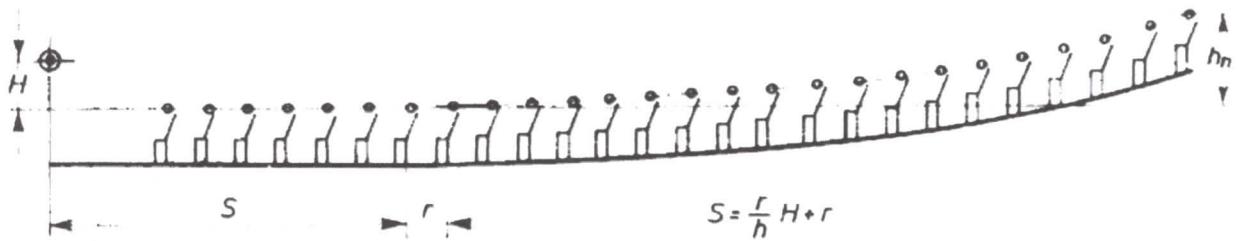
U zavisnosti od zakrivljenosti plafona prema njegovoj visini i poziciji zvučnog izvora, raspodela zvuka na podu može biti povoljna ili ne (sl. 37).

Ako je plafon u obliku svoda, poluprečnik bi trebao da mu je manji od polovine visine ili veći od dvostruke visine.

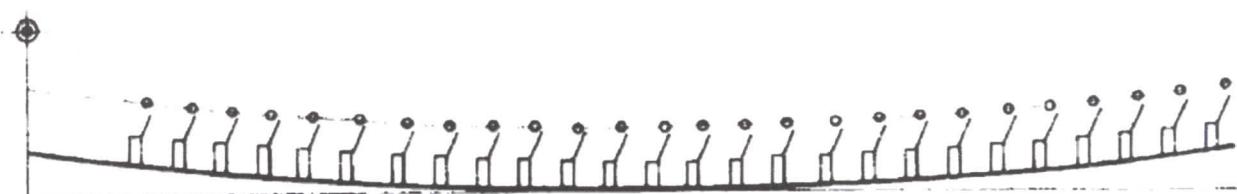
3.1.4 Izdizanje izvora zvuka i sedišta

Za kvalitetno slušanje na različitim pozicijama u dvorani važan je i razmeštaj sedišta:

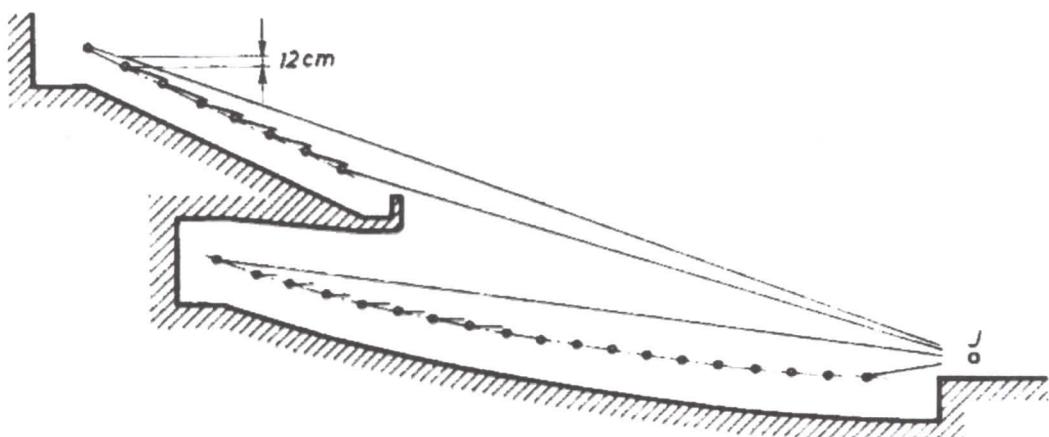
a)



b)

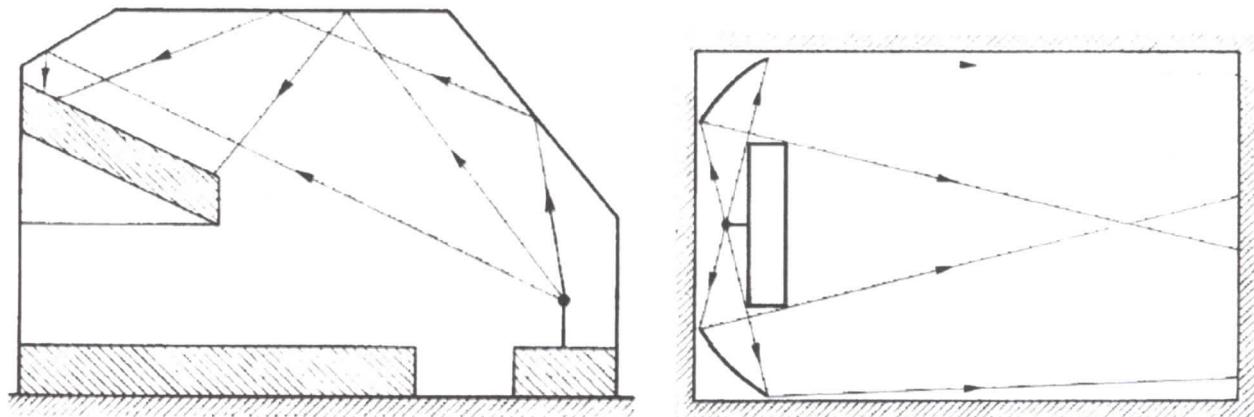


Slika 38. Visinski razmeštaj sedišta: (a) povoljan, b) nepovoljan)



Slika 39. Različita uzdignutost sedišta omogućava slušanje izvornog zvuka na različitim pozicijama u dvorani

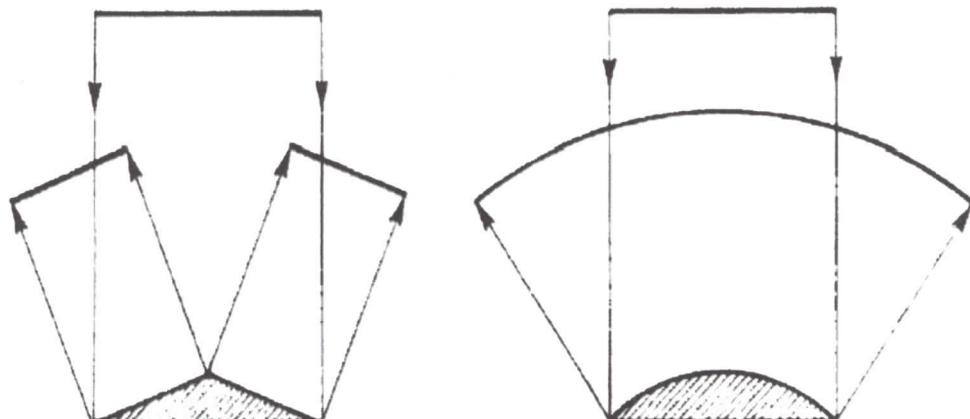
3.1.5 Reflektori zvuka



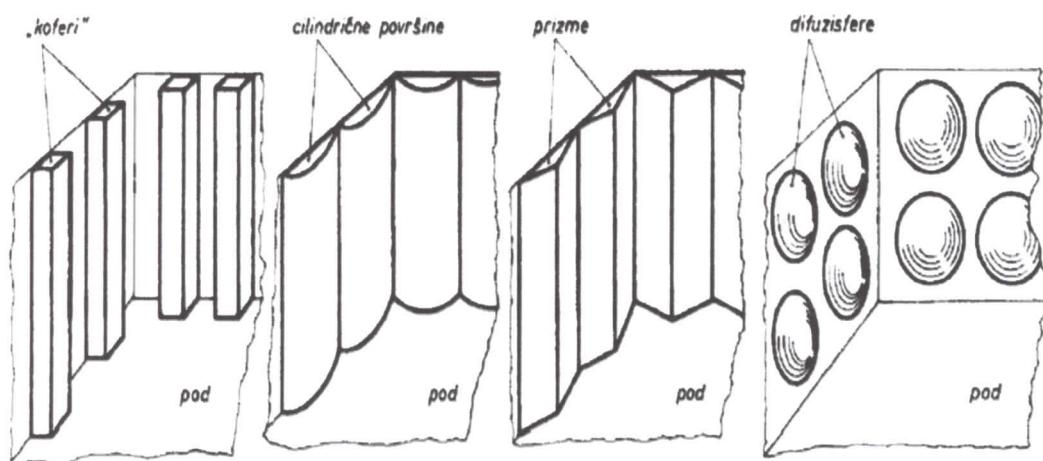
Slika 40. Za poboljšanje raspodele zvučnog polja često se upotrebljavaju **reflektori**

3.1.6 Difuzori zvuka

Veća difuzija zvuka omogućava bolju raspodelu zvučnog polja i povećava subjektivnu "zaokruženost" zvukom.



Slika 41. Nastajanje difuzije zvuka

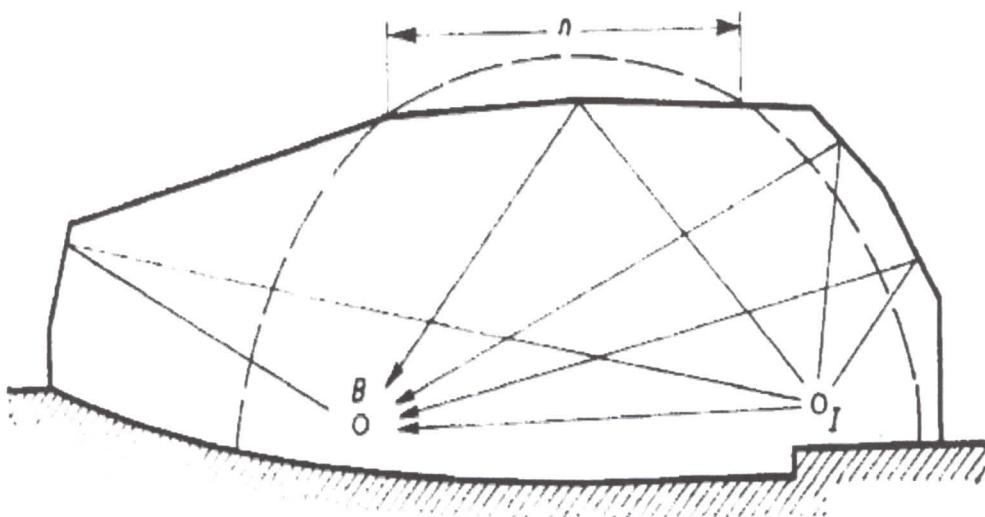


Slika 42. Neki oblici difuzora zvuka

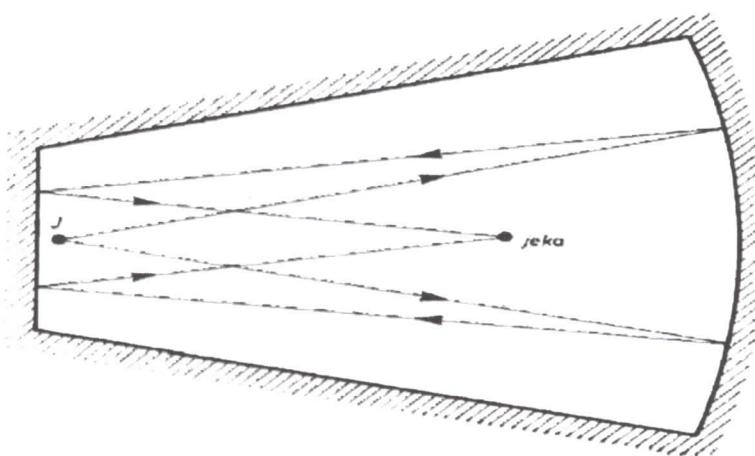
3.1.7 Echo i lepršajući echo

Echo se može pojaviti u različitim prostorijama i može loše uticati na razumevanje govora i opšti slušni utisak.

Echo se može pojaviti i zbog višestrukih refleksija u prostoru (sl. 43)

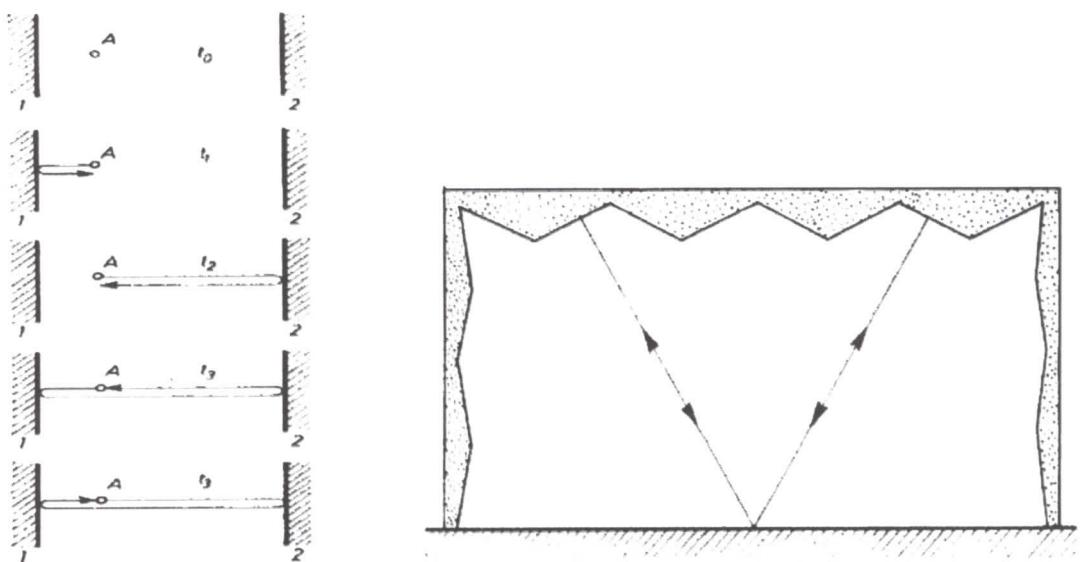


Slika 43. Dimenzije prostora bitno utiču na pojavu eha



Slika 44. Uz višestruke refleksije o tvrde zidove, echo nastaje i u manjim prostorijama

Lepršajući echo (flatter-echo) pojavljuje se u manjim prostorijama tvrdih i glatkih zidova. Zvučni impuls reflektuje se o zidove dok se energija ne "potroši"(sl. 45).

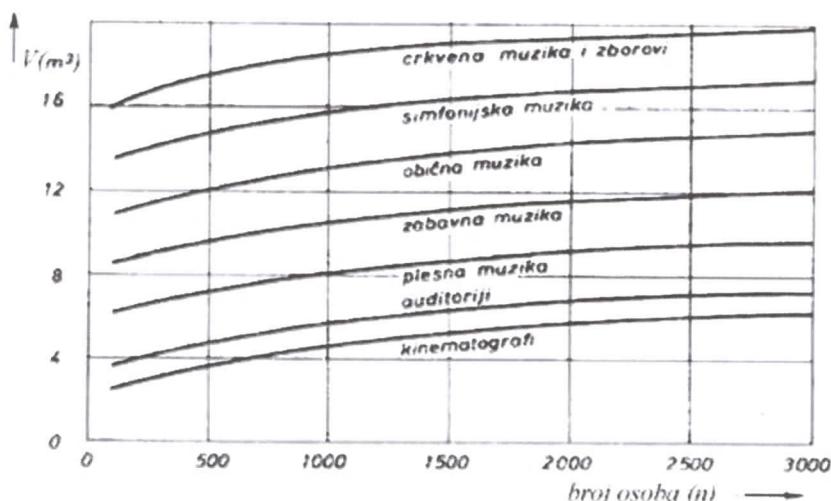


Slika 45. Korpuskularni prikaz refleksije od planparalelne ploče ili pod posebnim uglovima postavljenih površina

4. ZAPREMINA

Svakom izvoru zvuka odgovara posve određena zapremina do koje se može ići, a da pri tome jačina zvuka ne postane premalena. Ako raste zapremina, povećava se i unutrašnja površina, pa je i apsorpcija zvuka veća, odnosno uz jednak emitovanu zvučnu energiju jačina zvuka je manja. Od zapremine delimično zavisi najniža rezonantna frekvencija prostorije. Polovina talasne dužine najniže rezonantne frekvencije je upravo jednaka razmaku dva suprotna zida. [3]

Potrebna zapremina neke prostorije za slušanje određuje se prema broju slušalaca, odnosno broju sedišta. Smatra se da je optimalna zapremina $7 - 8 \text{ m}^3$ po slušatelju (sl. 46).



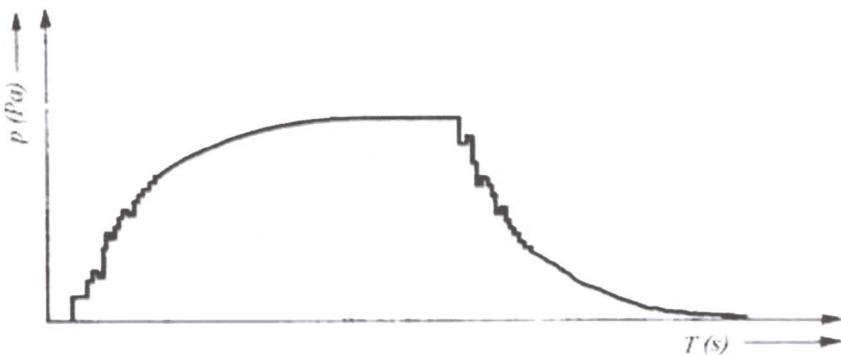
Slika 46. Zavisnost optimalne zapremine od vrste muzike i broja gledalaca [6]

Koncertne dvorane imaju između 14000 i 20000 m^3 , dakle predviđene su za oko 1800 do 2400 a i više slušalaca. Pri maksimalnoj zapremini može doći do poteškoća pri solističkim nastupima. Odnos između zapremine (m^3) i površine (m^2) koju zauzimaju slušaoci i izvođači je važan. Odnos 10:1 će na srednjim frekvencijama dati vreme odjeka od oko 1,4 s.

U muzičkim studijima, u kojima nema publike, može se smanjiti zapremina, ali umereno, jer bi se inače za, npr. dvostruko manju zapreminu, povećala glasnost studia za oko 3 fona, što bi moglo uticati na vrhunsko izvođenje. Za slušaoce prenosa porast glasnosti studia nije važan.

5. ODJEK

Kad zvučni izvor počne da emituje zvuk, zvučni pritisak na prijemnom mestu počne da raste, zadržava neko vreme postignutu maksimalnu vrednost i onda počinje da opada (sl. 47).

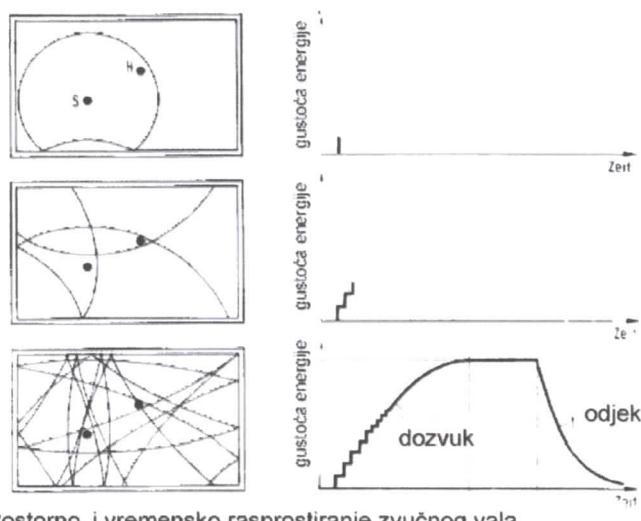


Slika 47. Vremenski oblik porasta, stacionarnog stanja i opadanja zvučnog pritiska

Na otvorenom prostoru će zvučni pritisak rasti eksponencijalno.

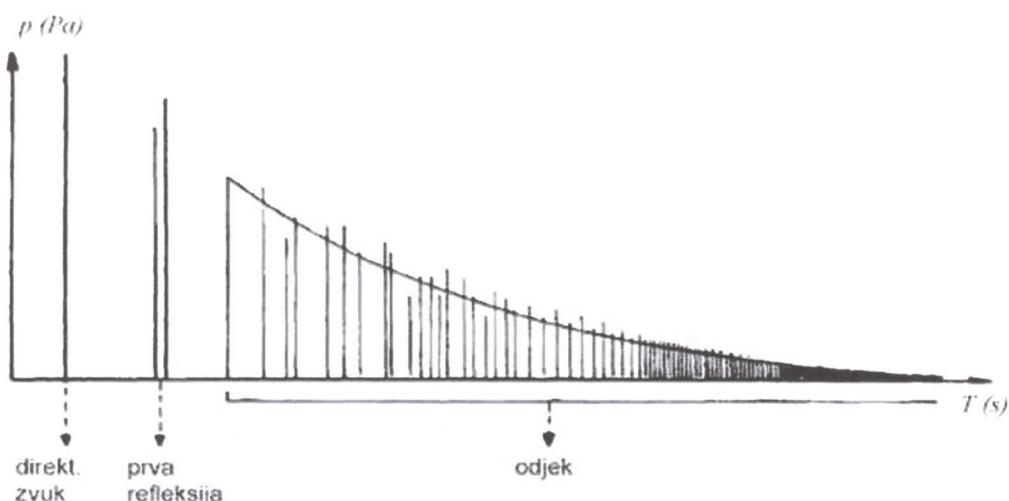
Početna faza se naziva **predzvuk**, a nakon stacionarnog stanja se pojavljuje **odjek** ili **reverberacija**.

Ako se zvučni izvor ne nalazi u slobodnom polju, predzvuk i odjek će pokazati nazubljenu, stepeničastu strukturu, koja potiče od refleksija.



Slika 48. Prostorni i vremenski prikaz predzvuka i odjeka

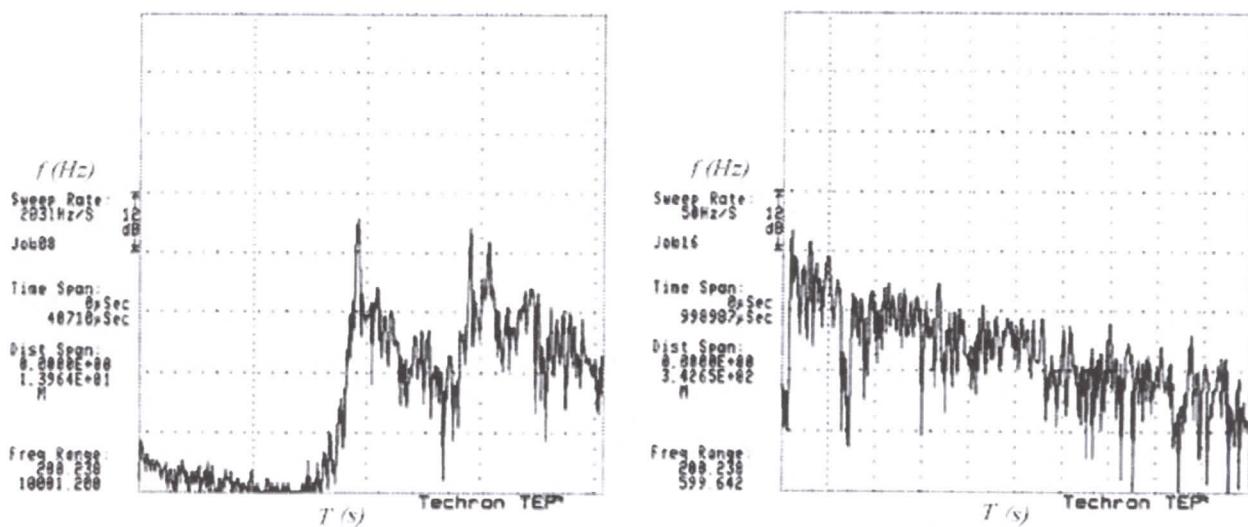
Ako se izazove echo u prostoriji zvukom impulsnog oblika, predzvuk i odjek će izgledati kao na sl. 49:



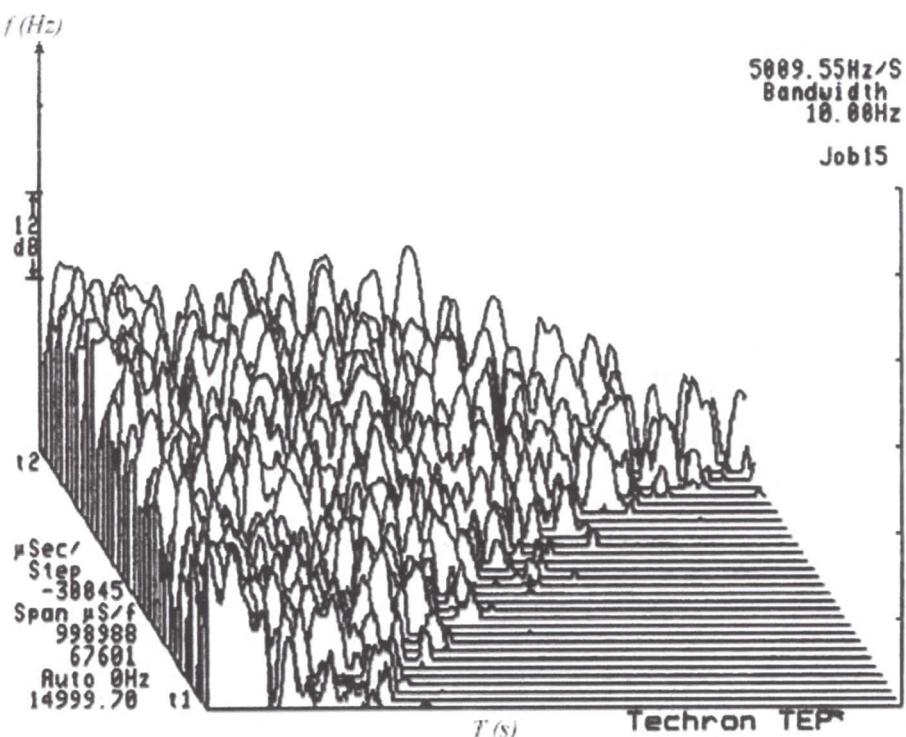
Slika 49. Vremenski prikaz direktnog zvuka, prve refleksije, odjeka i difuznog polja

O međusobnom rasporedu ranih i kasnih refleksija zavisi trajanje predzvuka i odjeka, a time i difuznost prostora i prostorni utisak. Sve refleksije u predzvuku povećavaju glasnost prostorije, ali i razumljivost govora samo ako ne kasne više od oko 20 - 30 ms iza direktnog zvuka. Rane refleksije definišu zvuk što se tiče njegove subjektivne dimenzije, te daju informaciju o prostoru, delimično i zbog njihove frekventne i amplitudne promenljivosti. [3]

Prikaz energije i vremenskog kašnjenja svake pojedine refleksije je **reflektogram**, odnosno ETC (Energy Time Curve). Prikaz može biti i trodimenzionalan, TEF (Time-Energy- Frequency).

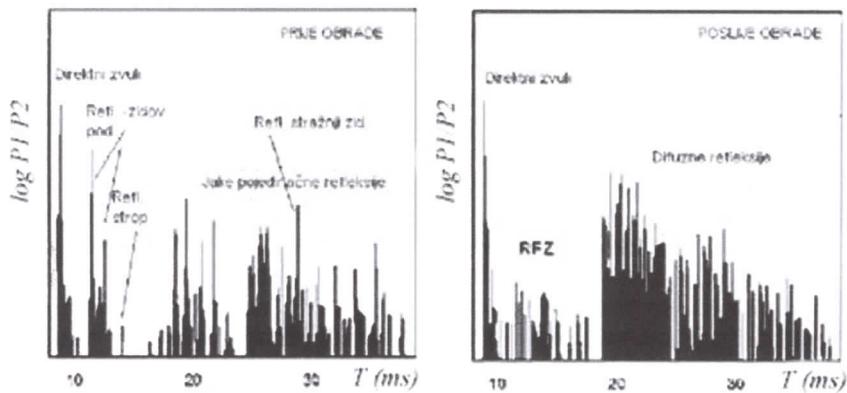


Slika 50. Reflektogrami (ETC) istog zvuka pri različitim vremenskim rezolucijama

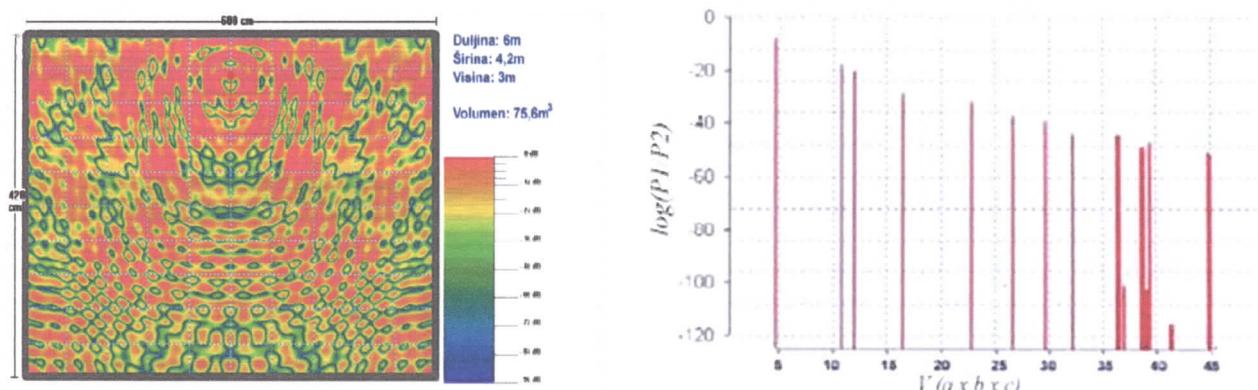


Slika 51.Trodimenzionalni reflektogram

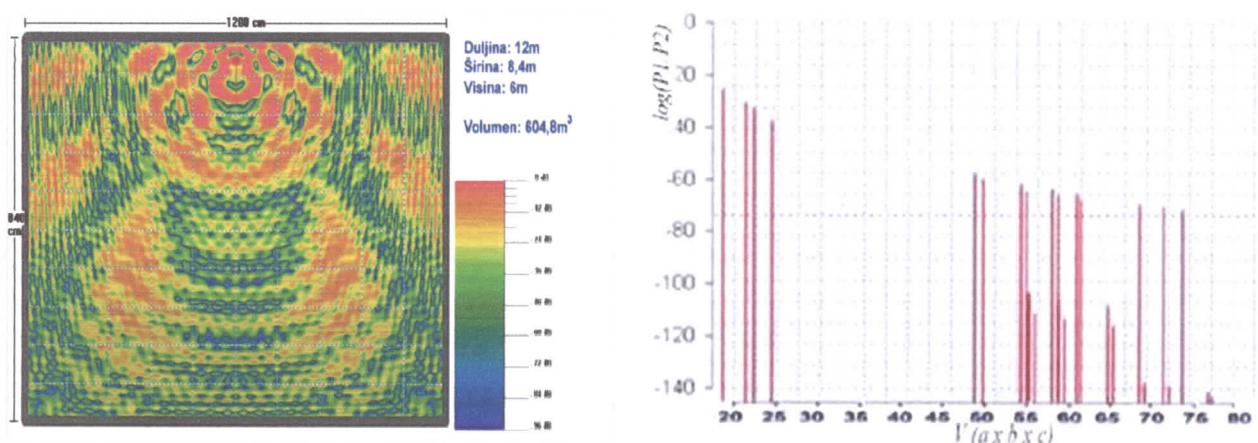
- Rezultat akustičke obrade



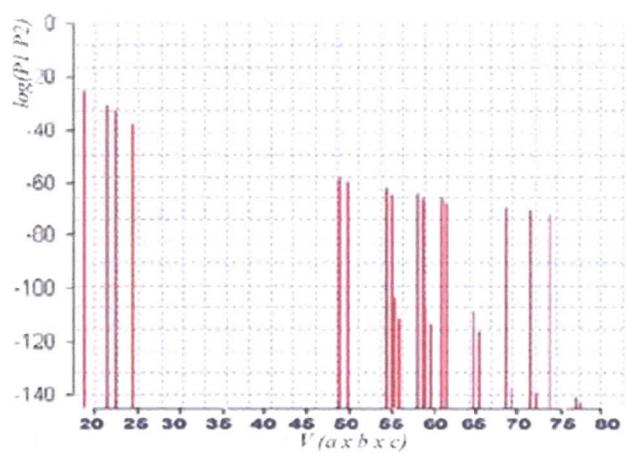
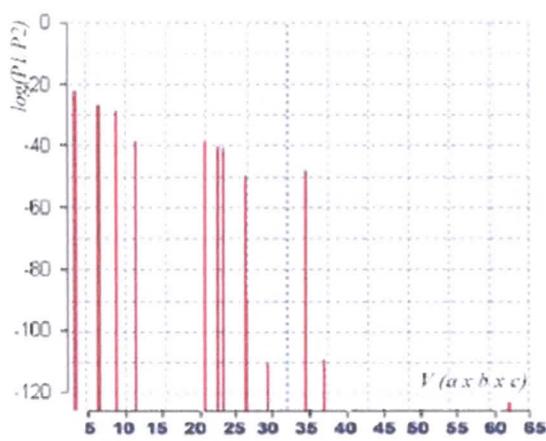
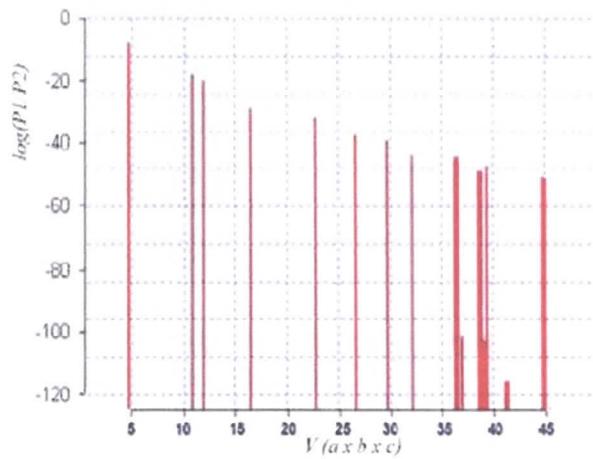
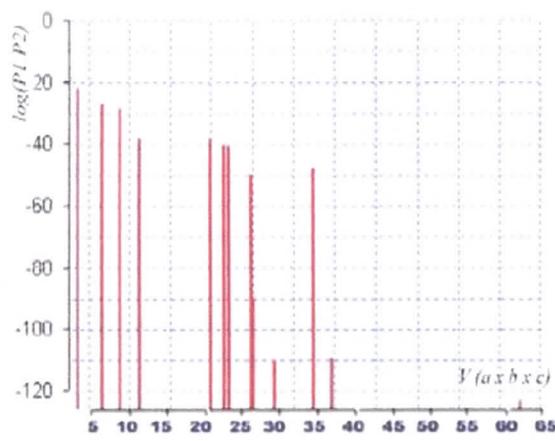
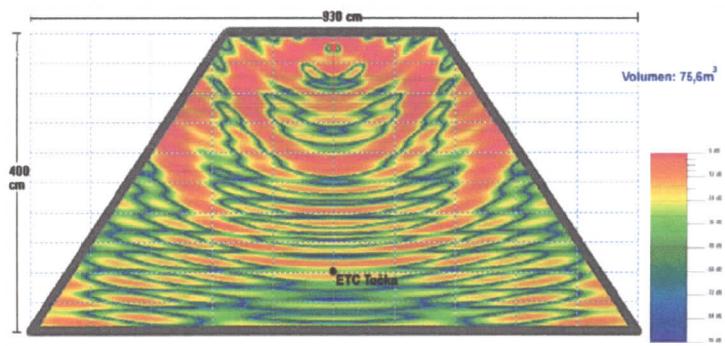
Slika 52. Rezultat akustičke obrade



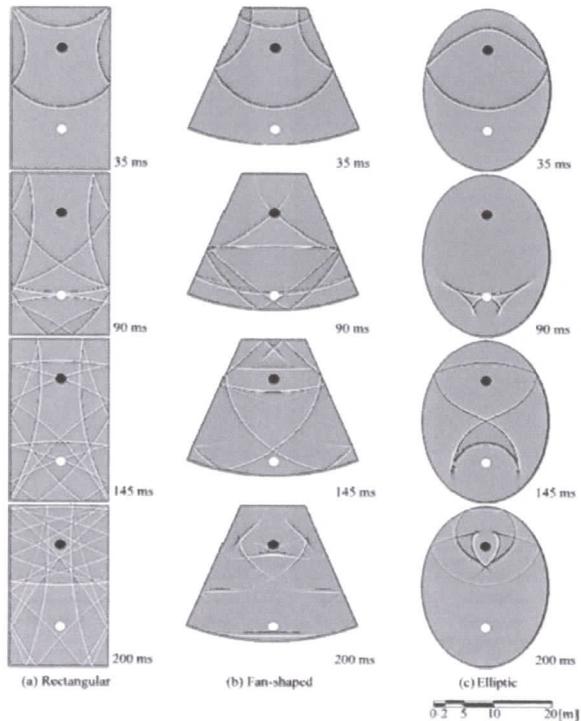
Slika 53. Uticaj zapremine i oblika na odjek



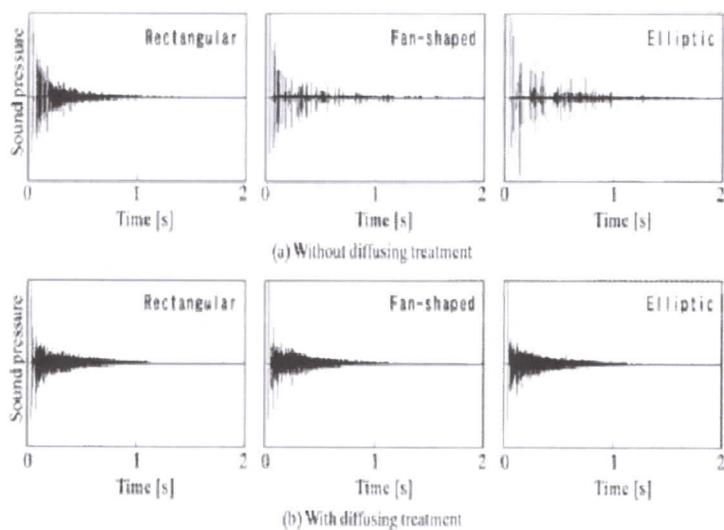
Slika 54. Uticaj zapremine na odjek



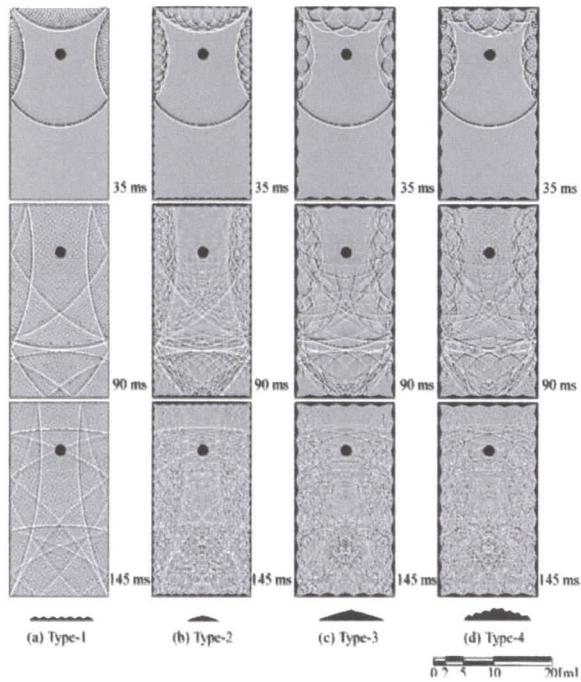
Slika 55. Uticaj oblika na objek [6]



Slika 56. Vremensko premeštanje zvučnog talasa u pravouganoj, trapeznolepezastoj i eliptičnoj prostoriji bez difuzorske obrade zida (videti sl. 57)



Slika 57. Oblici impulsnih odziva u pravouganoj, trapeznolepezastoj i eliptičnoj prostoriji bez (a) i s (b) difuzorskim obradom zidova



Slika 58. Vremensko premeštanje zvučnog talasa pri različitim položajima i oblicima reflektorskih površina

S obzirom na reflektogram definisano je više pojnova kojima se opisuje:

- slušnost (akustička prikladnost prostora za govorne, muzičke ili druge svrhe)
- razumljivost govora
- prozirnost
- prostorni utisak
- živost
- difuznost prostora

5.1 Izračunavanje vremena odjeka T

V.K. Sabin, 1895.:

“Vreme odjeka je ono vreme za koje zvučna energija padne na 10^{-6} deo. To odgovara padu zvučnog pritiska na 10^{-3} deo, dakle za $60 dB$.”

Ustanovljeno je da:

1. vreme utišavanja zvuka praktično je svuda u prostoriji jednako
2. vreme utišavanja zvuka praktično ne zavisi od položaja zvučnog izvora
3. efikasnost apsorpcijskih materijala postavljenih u prostoriji ne zavisi od njihovih pozicija

Vreme odjeka se može izračunati i meriti. Računa se po jednostavnoj empirijskoj formuli (**Sabinova formula**) koja vredi samo za relativno odječne ($T > 0,8$ s) prostore:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{A} , \quad (29)$$

T = vreme odjeka u s, V = zapremina u m^3 , A =ukupna apsorpcija. A je apsorpcija u m^2 "otvorenog prozora", ili u sabinima.

Zapravo je $A = \alpha \cdot S$, gdje je α koeficijent apsorpcije (za otvoreni prozor $\alpha = 1$), a S je ukupna površina svih površina u prostoriji. Ako prostorija ima različite površine S_1, S_2, S_3, \dots od kojih svaka ima svoj $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, prema Sabinu je:

$$\alpha \cdot S = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \alpha_3 \cdot S_3 + \dots + \alpha_i \cdot S_i \quad (30)$$

Pri potpunoj apsorpciji ($A=1$) vreme odjeka ipak nije 0, što ukazuje na samo delimičnu upotrebljivost formule.

Stoga je **Eiring** (Eyring) 1930. izveo novu, tačniju formulu, uzimajući u obzir broj refleksija u prostoru, srednji slobodni put i pad zvučne energije koji nastaje prilikom svake refleksije. Srednji koeficijent apsorpcije α definisao je kao:

$$-In(1-\alpha) = \frac{\alpha_1}{1} + \frac{\alpha_2}{2} + \frac{\alpha_3}{3} + \dots \quad (31)$$

pa je:

$$T = \frac{0,161V}{[-S \cdot In(1-\alpha)]} \quad (32)$$

čime je Sabinova formula zapravo specijalan slučaj Eiringove formule.

Sličan rezultat je dobio i **Milington** (Millington), koji je prepostavio da za vreme odjeka nastaje N refleksija na površini S , pa onda i N_1 na S_1 , N_2 na S_2 itd. Prepostavio je i da je broj refleksija srazmeran površini, pa je dobio:

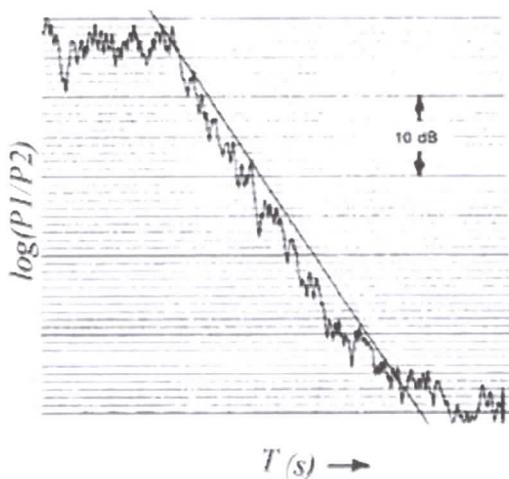
$$T = \frac{0,161V}{[-S_1 \cdot In(1-\alpha_1) - S_2 \cdot In(1-\alpha_2) - \dots - S_i \cdot In(1-\alpha_i)]} \quad (33)$$

$$T = \frac{0,161V}{[-\sum S_i \cdot In(1-\alpha_i)]} \quad [2] \quad (34)$$

5.2 Merenje vremena odjeka

Moguće je na nekoliko načina:

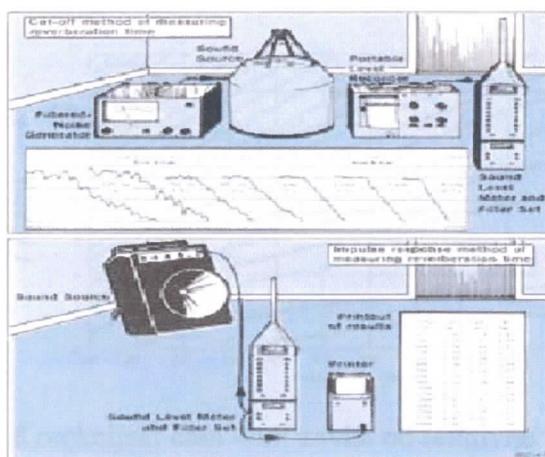
1. **praskom**, koji je zadovoljavajućeg intenziteta kako bi se postigao zvučni pritisak barem 60 dB iznad granice smetnje
2. **šumom**, kojim se može postići slično kao i s praskom. Oba merenja su tercijarna u području od 63 Hz do 4 kHz.



Slika 59. Aproksimacija krive pada zvučnog pritiska pri merenju vremena odjeka

3. **TEF- Techron merna metoda**: integracijom zvučne energije u određenom vremenu (**Šrederova (Schröder) integracija**) može se prema njenom padu izračunati vreme odjeka

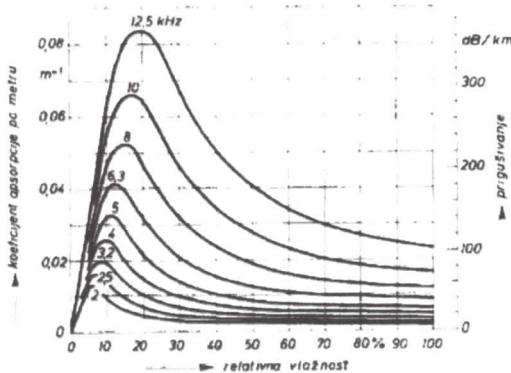
4. **B&K impulsna metoda**: rađena prema **Šreder-Kutrufovoj (Schröder-Kuttruff) metodi** (kratak pravougaoni impuls propušten kroz tercijarni filter pobuđuje prostoriju, te se nakon prijema mikrofonom pojačava, filtrira, kvadrira i integriše, pa je time usrednjjen i bez nepotrebnih oscilovanja. Time je ponovljiv i pouzdan za merenje).



Slika 60. Prikaz osnovne B&K opreme za merenje vremena odjeka

5.3 Apsorpcija zvuka u vazduhu

Na višim frekvencijama zvučna energija se, osim na površinama prostorija, apsorbuje i u vazduhu. Apsorpcija prvenstveno zavisi od vlažnosti vazduha.



Slika 61. Zavisnost α vazduha od relativne vlažnosti s frekvencijom kao parametrom

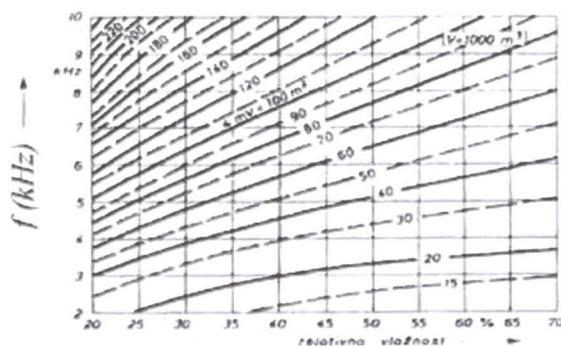
Ekvivalentna apsorpcijska površina vazduha izražena je članom ($4 m V$), pa je onda korigovan izraz:

$$T = \frac{0.161V}{(4mV + A)} , \quad (35)$$

$$T = \frac{0.161V}{[4mV - S \cdot \ln(1 - \alpha)]} , \quad [3] \quad (36)$$

gdje je m koeficijent apsorpcije vazduha, a V je zapremina.

Za frekvencije niže od 1 kHz , m je zanemarljiv, ali iznad brzo raste pa apsorpcija vazduha ima sve veći uticaj. Iznad 4 kHz ekvivalentna apsorpcijska površina vazduha u velikim dvoranama može imati i veći uticaj od apsorpcijskih površina.



Slika 62. Korekcijski član $4mV$ zavisi od relativne vlažnosti i koristi se pri izračunavanju vremena odjeka većih dvorana.

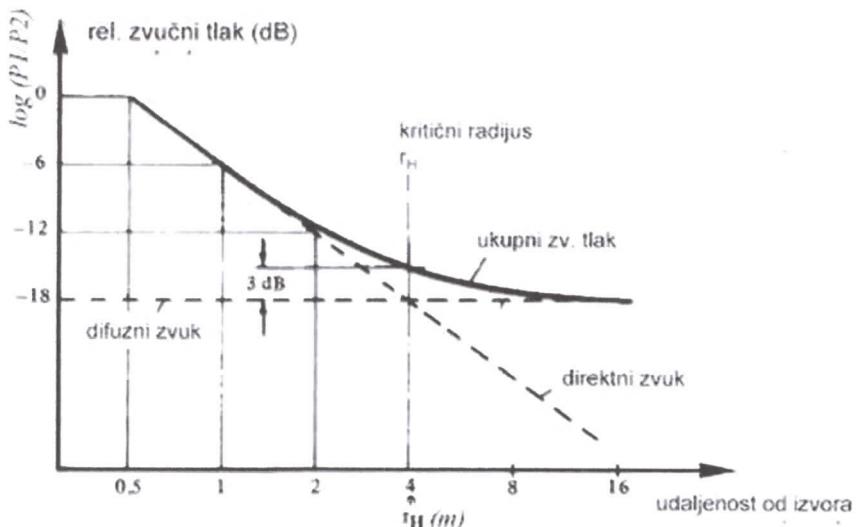
5.4 Odječni radius dvorane

U neposrednoj blizini zvučnog izvora dominira direktni zvuk. Na nekom radijusu r_H od centra izvora izjednačen je pritisak direktnog zvuka i difuznog polja nastalog mnogobrojnim refleksijama. Dalje od tog kritičnog radiusa je pritisak difuznog polja veći. Kritični radius se naziva **odječnim radijusom prostorije**. r_H se povećava s zapreminom, ali se smanjuje s povećanjem vremena odjeka.

$$r_H = 0,057 \sqrt{\left(\frac{V}{T}\right)} [m] \quad (37)$$

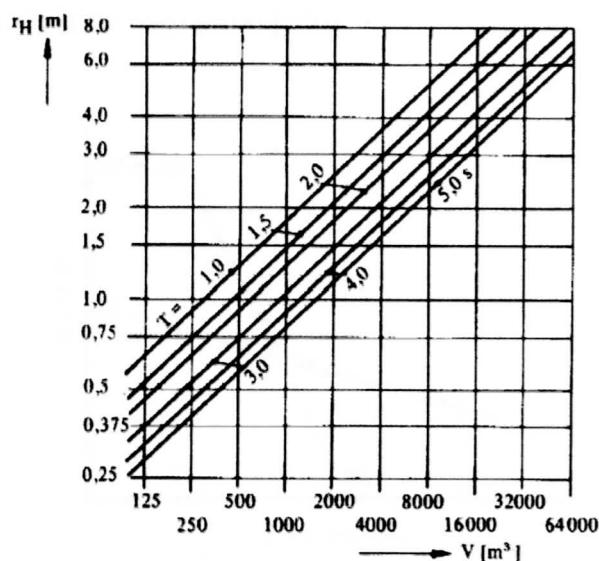
U realnosti nema neusmerenih izvora zvuka, pa treba uzeti u obzir i njihov **koeficijent usmerenosti Q** i u izračunavanju efektivnog odječnog radijusa.

$$r_{H\text{eff}} = 0,057 \sqrt{Q} \sqrt{\frac{V}{T}} [m] \quad (38)$$

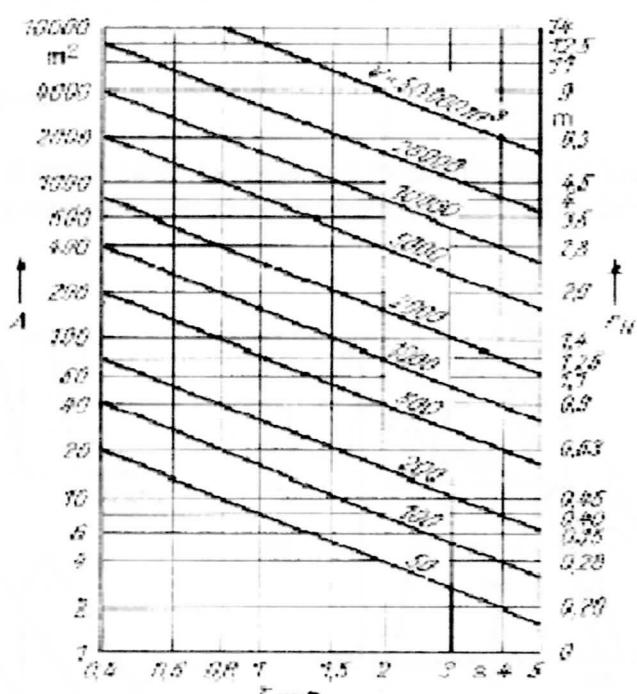


Slika 63. Raspodela direktnog i difuznog zvuka i mesto pojave kritičnog radijusa r_H

Odječni radijus je relativno blizu izvora zvuka, pa ni u velikim dvoranama njegova udaljenost od centra izvora obično ne prelazi 4 - 5 m. Najčešće je 2 - 3m.



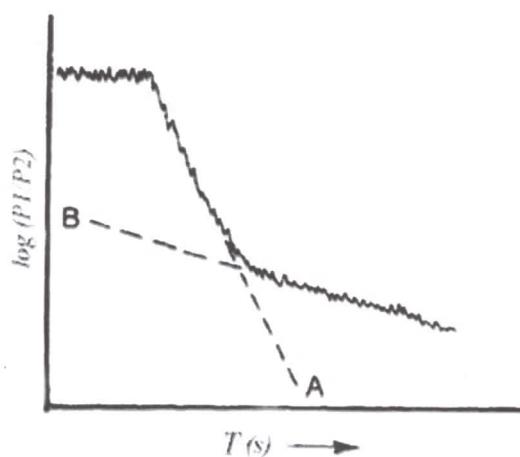
Slika 64. Zavisnost odječnog radijusa od zapremine prostora



Slika 65. Zavisnost odječnog radijusa od ekvivalentne apsorpcijske površine A , zapremine V i vremenu odjeka T

5.5 Akustički spojene prostorije

Ako su dve prostorije povezane otvorom, rezultantno vreme odjeka u svakoj od njih zavisiće i od druge prostorije, i uvek će biti duže nego samo jedne.

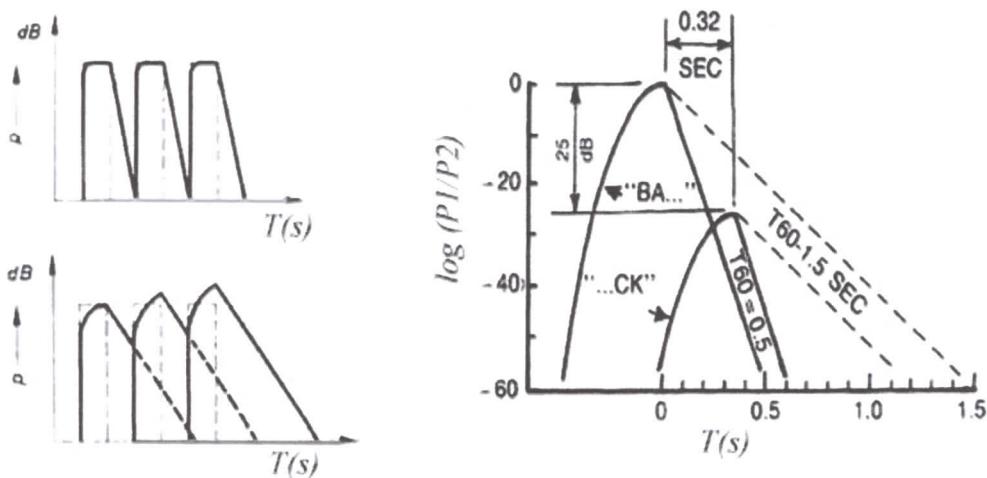


Slika 66. Tipična karakteristika vremena odjeka za akustički spojene prostorije

Efekat spojenih prostorija je veći što su one međusobno po svojim akustičkim karakteristikama sličnije.

5.6 Uticaj odjeka na govor

Duže vreme odjeka direktno utiče na slogovnu razumljivost. Uz kraće vreme odjeka pojedini slogovi ili glasovi se ne preklapaju, a uz duže se preklapaju, pojedini delovi reči postaju maskirani i time nerazumljivi.



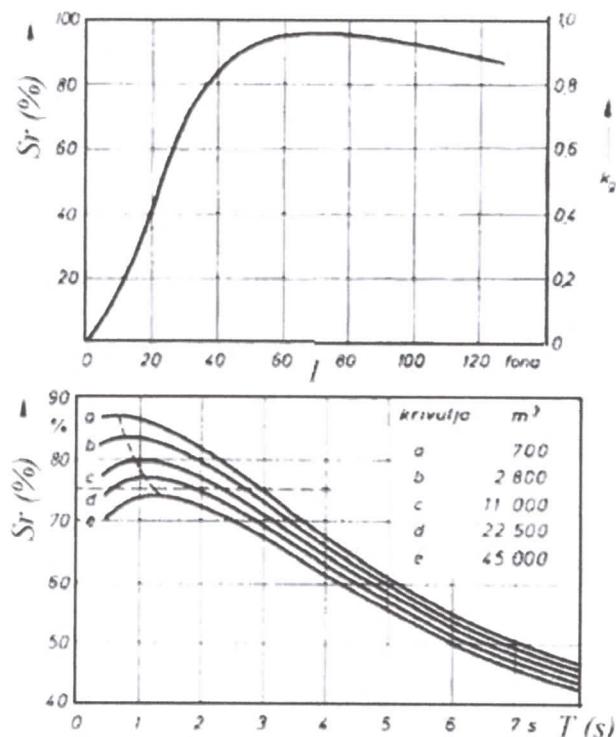
Slika 67. Primeri uticaja odjeka na razumljivost govora [6]

Budući da odjek povećava glasnost prostorije, nepoželjno je da je više zakasneli zvuk još i pojačan, jer onda deluje kao buka. Uho će čuti glasove koji stignu do njega unutar 140 ms nakon direktnog zvuka kao koristan zvuk, ali veća kašnjenja će se pokazati maskirajućim. Prostori namenjeni prvenstveno govornim svrhama procenjuju se na osnovu **slogovne razumljivosti** S_r :

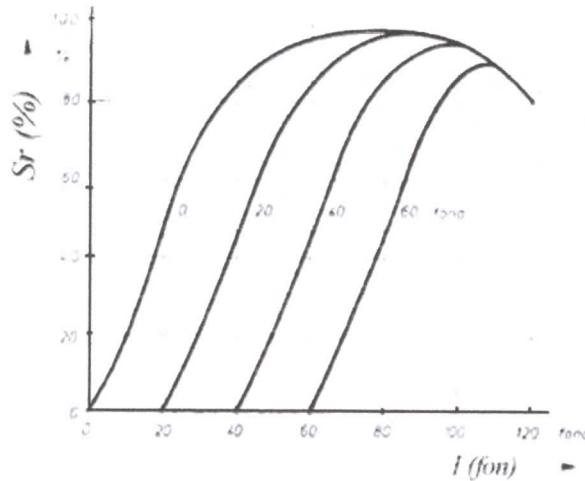
$$S_r = 96 \cdot k_g \cdot k_o \cdot k_b [\%] , \quad (39)$$

k_g je faktor zavisan od glasnosti prostorije, k_o od vremena odjeka, a k_b od buke.

Merenje se vrši subjektivno, beležeći razumljivost određenog broja logatoma.



Slika 68. Slogovna razumljivost zavisna od opsega glasnosti prostorije i vremena odjeka



Slika 69. Slogovna razumljivost zavisna od buke

Uz $S_r = 85\text{-}96\%$ razumljivost je vrlo dobra, uz $75\text{-}85\%$ razumljivost je dobra, $65\text{-}75\%$ govor se prati s naporom, manje od 65% razumljivost nije zadovoljavajuća.

Govorna razumljivost zavisi i od odječnog radijusa dvorane.

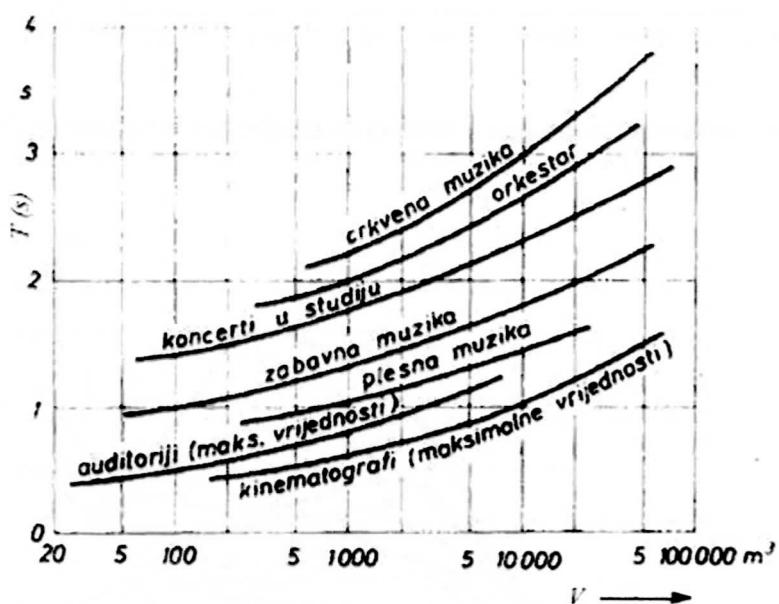


Slika 70. U direktnom polju razumljivost je vrlo dobra, blizu odječnog (kritičnog) radijusa dobra, a u difuznom polju često nedovoljna

5.7 Uticaj odjeka na muziku

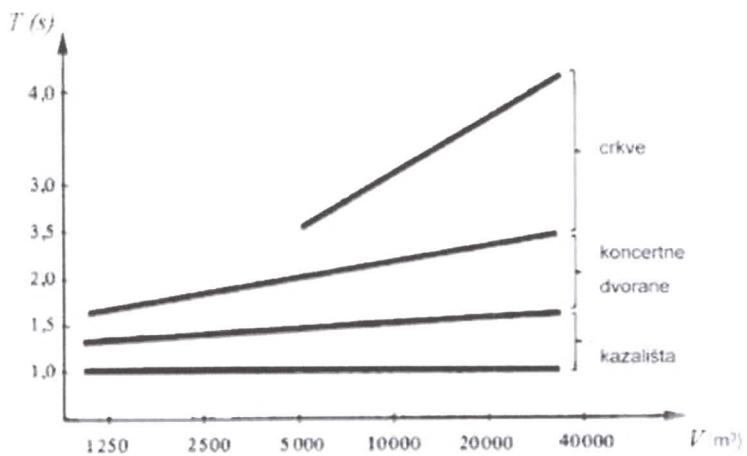
Kod muzike se pojavljuju slični problemi kao i kod govora. Ako su niskofrekventne komponente odjekom maskirane sluh ih može restaurirati. Maskiranje visokih frekvencija može prouzrokovati loše prepoznavanje instrumenata i gubitak jasnoće i briljantnosti.

Uticaj odjeka kod muzike je povezan s ukusom, navikama i tradicijom slušalaca. Npr. na otvorenom prostoru simfonijski orkestar zvuči bezbojno, prazno i loše. Razlog tome je nagli pad glasnosti i subjektivni nedostatak svih komponenti vezanih s prostorom. Smatra se da postoji optimalan odjek za pojedine vrste muzike.

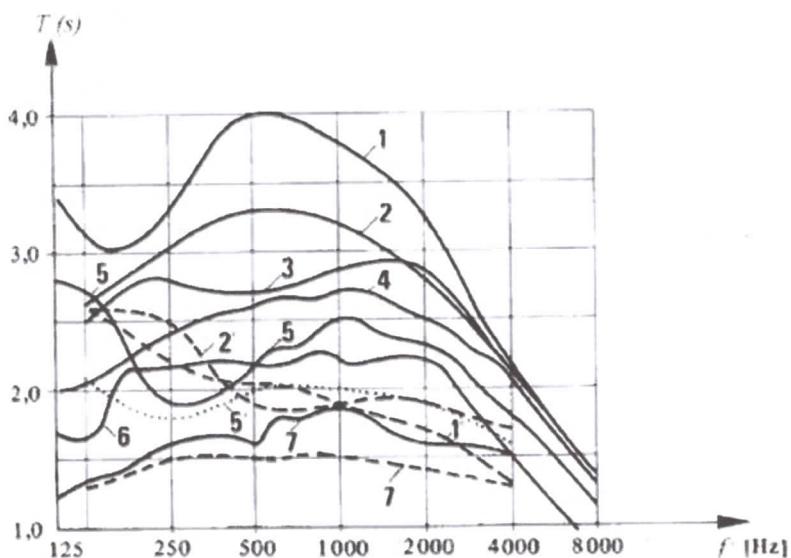


Slika 71. Zavisnost optimalnog vremena odjeka na srednjim frekvencijama od zapremine za različite vrste izvođenja.

Pri razmatranjima optimalnog odjeka određenih prostorija, pretpostavci da udaljenost između izvora i slušaoca (mikrofona) raste сразмерно dužini pojedine dvorane, te uz određena zanemarivanja, zaključeno je da je vreme odjeka сразмерno sa $\sqrt[3]{V}$.



Slika 72. Optimalno vreme odjeka za pojedine namene u zavisnosti od zapremine

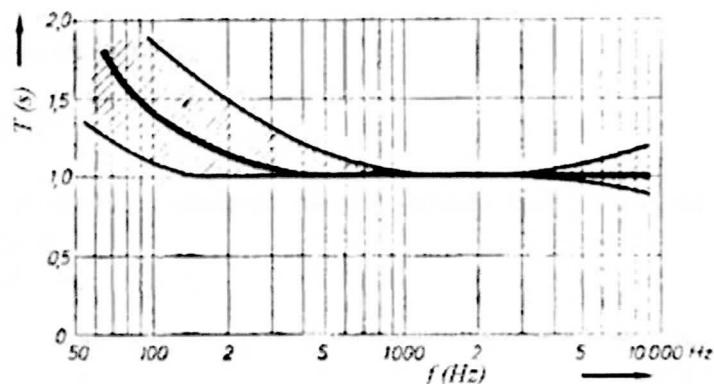


Slika 73. Frekventne karakteristike nekoliko poznatih koncertnih dvorana [6]

1. Musikvereinssaal, Wien, 2. Alte Philharmonie, Berlin, 3. Symphony Hall, Boston, 4. Oetkerhalle, Bielefeld, 6. Herkulessaal, München, 6. Musikhalle Hamburg, 7. Royal Festival Hall, London

5.8 Frekventna karakteristika odjeka

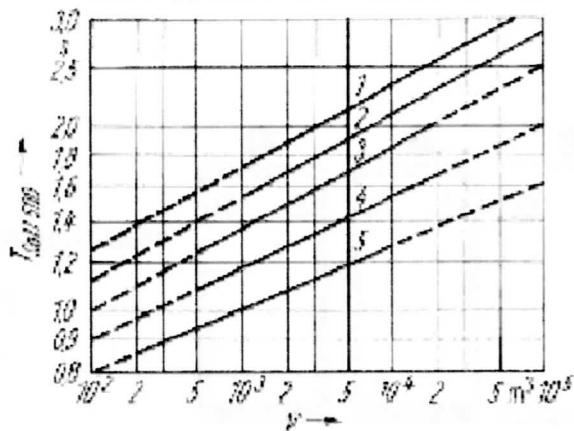
Nije sve jedno kakva će biti frekventna karakteristika. Mnogi tradicionalni autori su preporučili karakteristike kao na slici 74.



Slika 74. Frekventna karakteristika vremena odjeka

Uopšteno se može smatrati da:

- u govornim studijima treba smanjiti vreme odjeka na niskim frekvencijama
- u studijima za pop-muziku i modernim koncertnim dvoranama treba vreme odjeka da bude frekventno neutralno, uravnoteženo na niskim i visokim frekvencijama
- u starijim dvoranama (često s drvenom obradom) karakteristika je u srednjem frekventnom pojasu, podignuta i naglašena
- u starim crkvama velikih zapremina i s pretežno tvrdim površinama naglašene su niske frekvencije
- moderne crkve trebale bi da zvuče prigušenije, s manjim vremenom odjeka na niskim frekvencijama



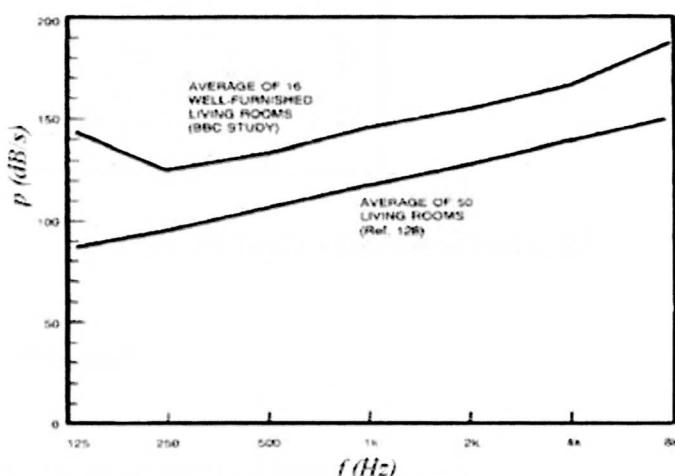
Slika 75. Preporučene vrednosti vremena odjeka (pri 500 Hz) za prostore: 1. za govorništvo, 2. simfoniju muziku, 3. solo i kamernu muziku, 4. pozorišta, 5. dvorane

6. PRIMERI IZVEDENIH PROSTORIJA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE

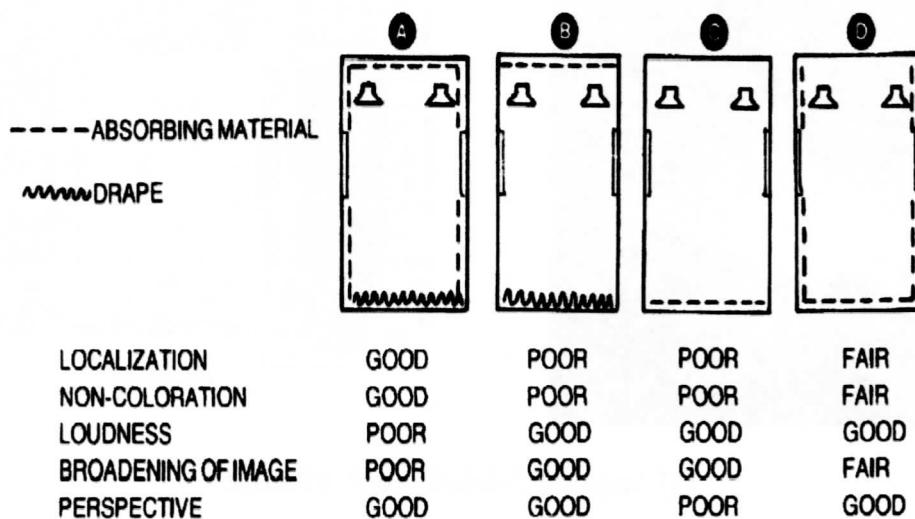
6.1 Spavaća soba: tiha ($<30 \text{ dBA}$), prigušena

6.2 Dnevni boravak kao slušaonica:

- prigušen ($T = 0,3 - 0,5 \text{ s}$),
- zapremina $>80 \text{ m}^3$
- simetričan raspored zvučnika s obzirom na osu između njih i slušaoca. Simetrična apsorpcija zidova, po površini i po α
- opseg buke $<35 \text{ dBA}$



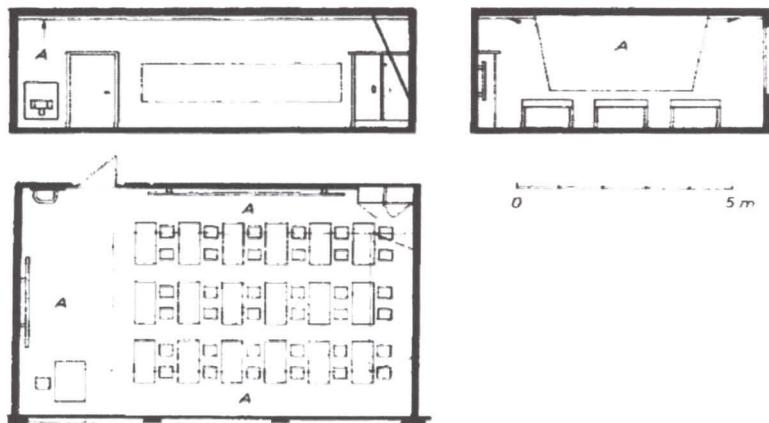
Slika 76. Srednje vrednosti pada zvučnog pritiska u akustički obrađenim i neobrađenim dnevnim boravcima - slušaonicama.



Slika 77. Subjektivne procene postignuća određenih akustičnih parametara u delimično obrađenim prostorijama za slušanje

6.3 Školska učionica

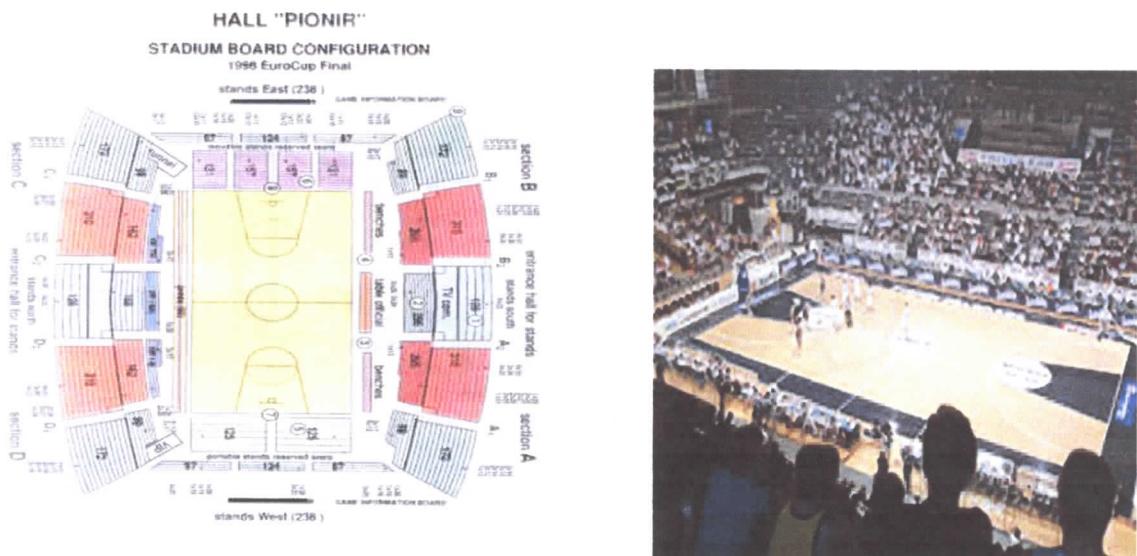
- zapremina $>160 m^3$
- $T<0,8$ s
- opseg buke <40 dBA



Slika 78 Tipična školska učionica [1]

6.4 Sportska dvorana "Pionir"

- oko 7000 gledalaca
- $T<2,5$ s, po mogućnosti što nezavisniji od broja gledalaca
- Odstranjen echo



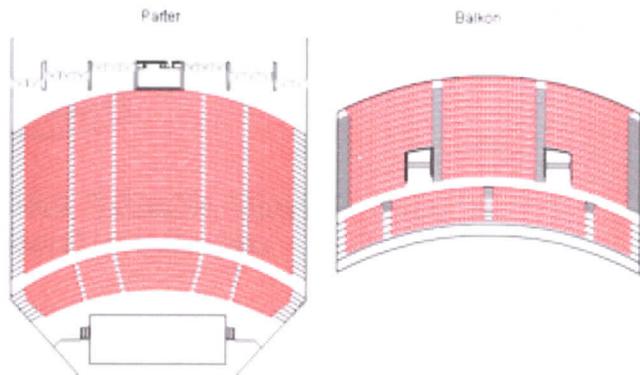
Slika 79. Hala "Pionir", Beograd [7]

6.5 Koncertna dvorana "Sava" centra

Površina sale: 3220 m²

Ukupan broj sedišta: 3672, (u parteru 2446, na balkonu 1226)

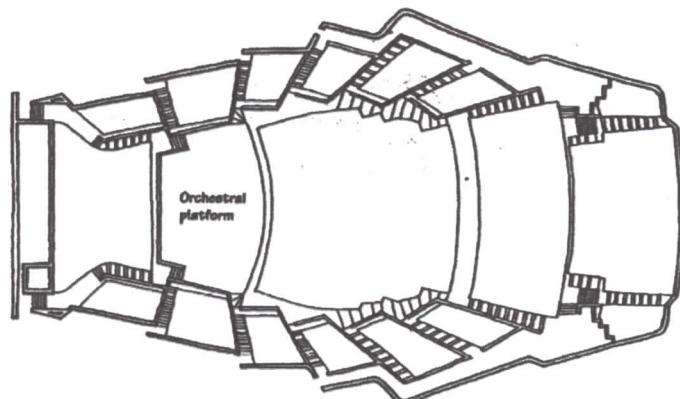
Površina scene: 850 m², (širina 32 m, dubina 26 m)



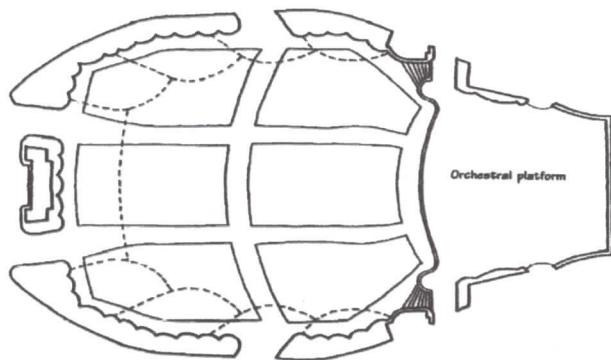
Slika 80. Velika sala "Sava" centra

Najakustičnija sala u Beogradu je sala u sklopu centra "Sava", koja je predviđena za izvođenje najkomplikovanijih baletskih i pozorišnih predstava, kao i opera uz pratnju kamernog orkestra. Napravljena je krajem 70-ih godina XX veka po uzoru na najveći kongresni centar na Svetu u Briselu i čuven je po tome što u sali od 5000 mesta instrumenti ne moraju da se ozvuče. Zvuk se kroz nju savršeno prostire zahvaljujući kupoli koja se spušta iza glavne bine. Velike lože u sali sa strane imaju funkciju vazdušnih džepova zbog kojih se sala sužava ka izlazu i ima kupast oblik.

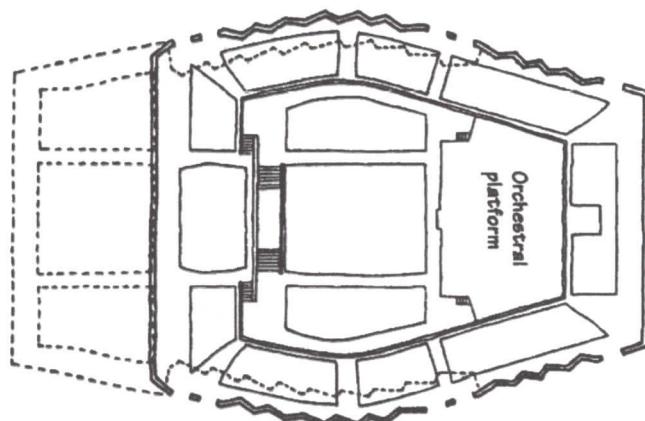
Nacrti i oblici pojedinih koncertnih dvorana u svetu



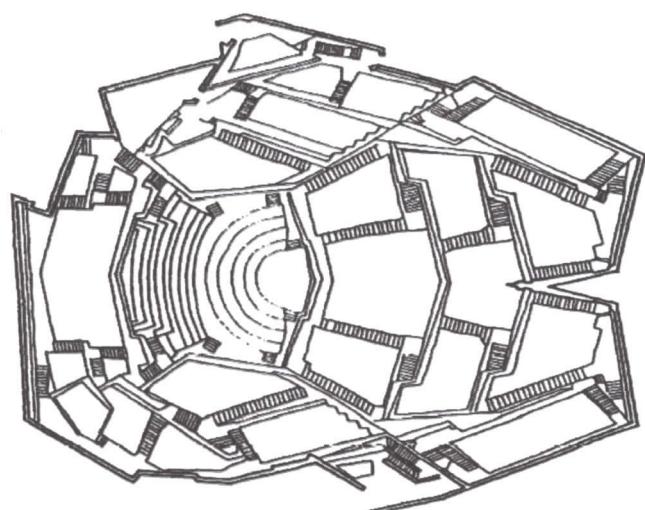
Slika 81. Koncertna dvorana Sydney Opera House, Australija, "inverzna lepeza"



Slika 82. Joseph Meyerhoff Hall, Baltimore, Maryland, SAD,
dvorana sa višestrukim balkonima



Slika 83. De Doelen Concertgebouw, Rotterdam, Holandija, "dvorana u dvorani"



Slika 84. Berlin Philharmonie, Berlin, Nemačka

6.6 Režije i studia

Režije

Podjela režija prema nameni optimalne površine:

1. Referentne režije i slušaonice ($S=60 \text{ m}^2 \pm 10 \text{ m}^2$)
2. Dramske i muzičke režije ($S=40 \text{ m}^2 \pm 10 \text{ m}^2$)
3. Druge produkcijske režije ($S=30 \text{ m}^2 \pm 10 \text{ m}^2$)
4. Montažne režije ($S=20 \text{ m}^2 \pm 10 \text{ m}^2$)

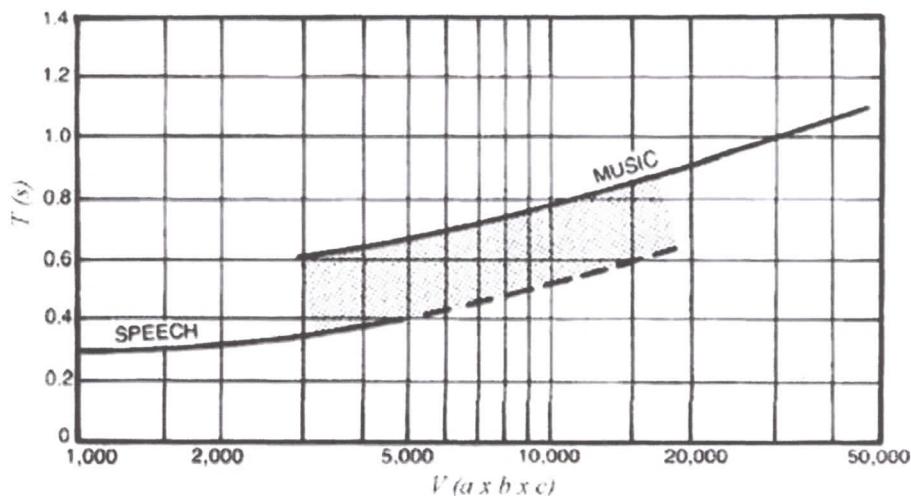
Preporučene vrednosti vremena odjeka:

$$T = T_0 \sqrt{\frac{S}{S_0}} \pm 0,05s , \quad (40)$$

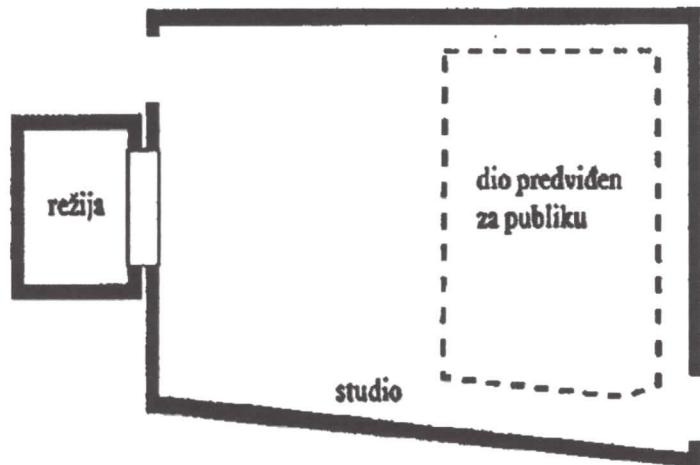
gde je $T_0 = 0,35 \text{ s}$, a $S_0 = 60 \text{ m}^2$, što daje srednji koeficijent apsorpcije $\alpha_s = 0,35$.

Studia

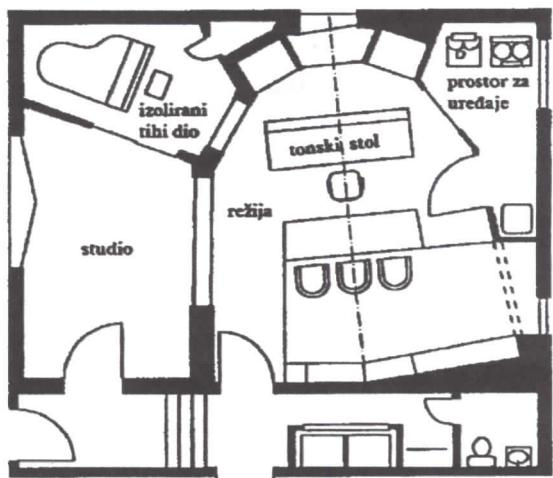
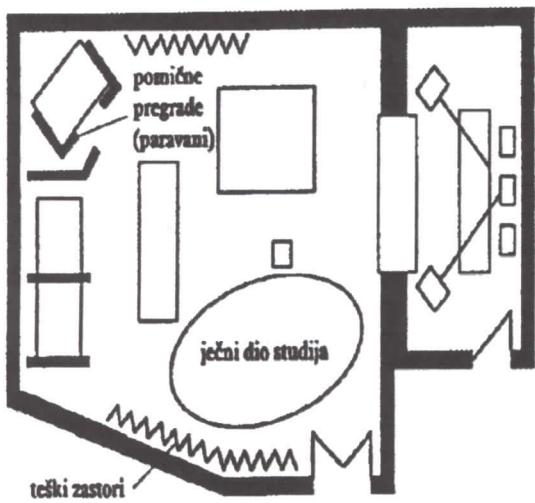
Različitih su namena s obzirom na tonski materijal: TV, radio, govorni, dramski, parcijalno snimanje, višekanalno. Delimo ih na muzičke, govorno-dramske, programske i terenske. Moraju biti relativno prigušeni, dakle i malog vremena odjeka, ali, zbog prenosa "uživo" moraju prirodno zvučati. Važne su sopstvene frekvencije, naročito na području ispod 300 Hz.



Slika 85. Preporučljivo vreme odjeka u zavisnosti od zapremine



Slika 86. Muzički studio sa režijom



Slika 87. Muzički studiji [6]

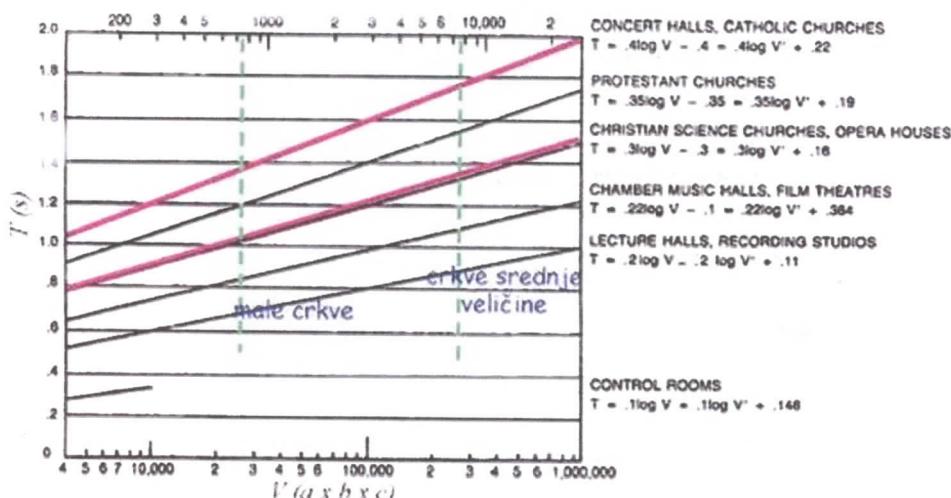
6.7 Crkve

Opis prostora

Razlike između pojedinih religija, načina obavljanja i vrste verskih obreda uticale su i na razlike u akustičkim zahtevima. Ono što je zajedničko za veliku većinu svih religijskih prostora je njihova multifunkcionalnost. Najčešće je potrebno **istovremeno** ostvariti optimalne uslove za govor i muziku.

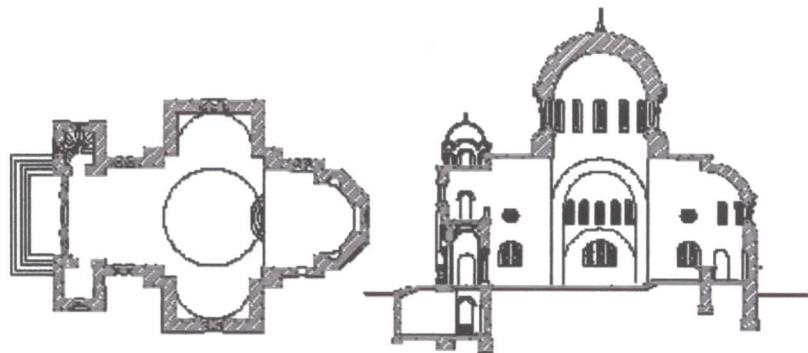
Akustički zahtevi

- vrlo dobra razumljivost govora
- akustički zahtevi za muziku zavise od vrste muzike, što opet zavisi od karakteristika pojedinih religija
- veličina prostora određuje prihvatljive vrednosti vremena odjeka

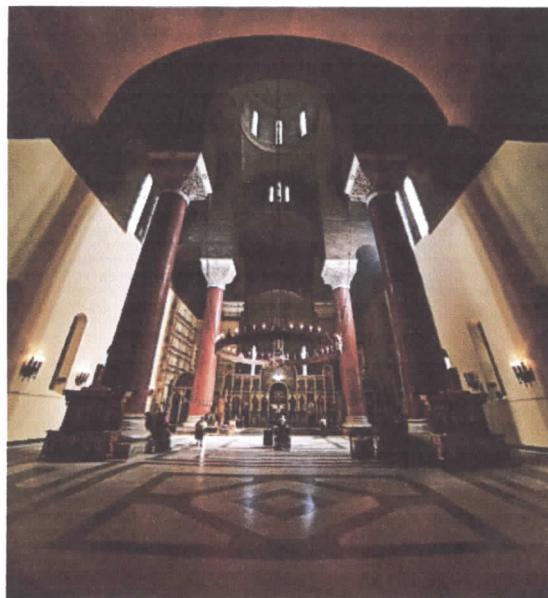


Slika 88. Optimalno vreme odjeka

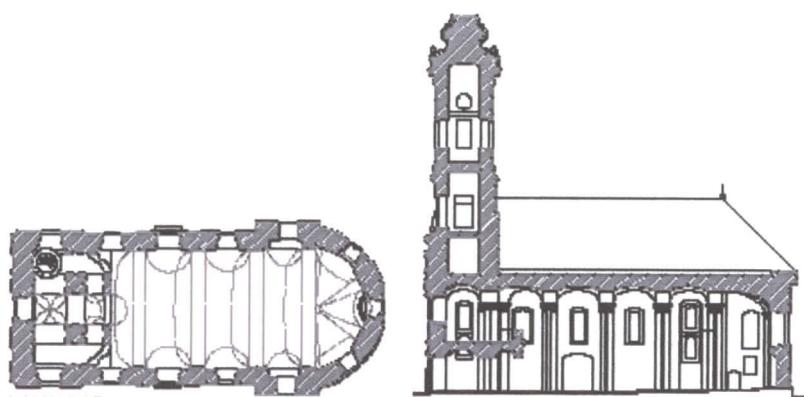
Kod svih **pravoslavnih crkava** bitno je da se obezbede akustički uslovi za razgovetno pojanje (crkveno pevanje), jer se ne koriste instrumenti u bogosluženjima. Zapremina određuje dužinu vremena odjeka. Takođe je potrebno obezrediti dobru akustičku intimnost, razumljivost govora koja se ostvaruje i bez ozvučenja. Različiti stilovi gradnje pravoslavnih crkava moraju da se uzmu u obzir radi što boljeg akustičkog utiska. [6]



Slika 89. Pravoslavna crkva moravsko-vizantijskog stila



Unutrašnjost crkve Sv. Marka u Beogradu



Slika 90. Pravoslavna crkva baroknog stila [7]

ZAKLJUČAK

Svako od nas barem jednom je postavio zadatak da sobu, dnevni boravak, ospesobi kao akustičku prostoriju, kao sobu za slušanje muzike ili čak kao kućni studio. Takvi pokušaji, da se soba prilagodi nekoj akustičkoj funkciji, iziskuju potrebno znanje i pravila navedena u ovom radu. Akustička obrada prostorije postavlja i zadatak da se akustički ospesobi i enterijer prostorije. To podrazumeva da se primeni sinteza forme, funkcije prostorije koja će sjediniti lepo i funkcionalno sa svim zakonima primenjivim u zatvorenoj prostoriji. Sama sinteza estetike i fizike je formula akustički uspešno rešenog prostora. Subjektivni utisak mora da bude dovojno mali u odnosu na zvučno polje prostorije koja zadovoljava više zahteva slušalaca. Energija koja se dobija u akustičkoj prostoriji mora da bude dobra, da nam poboljša raspoloženje i učini nas veselijim. Kao što su potrebni određeni standardi prilikom izrade prostorija, mora se i voditi računa da se ona zaštiti od neželjenih zvukova (šuma ili buke). Time bi se zaštitila akustika jednog objekta od prenosa i uticaja buke iz drugog objekta. Svi ovi standardi moraju da vode računa da ljudi imaju različite nivoje osjetljivosti prema zvuku uopšte. Životno okruženje će nam biti mnogo lepše ako tehnička rešenja prostorija posvetimo našim potrebama za lepo uz prijatan zvuk.

Literatura

1. "Zvuk, sluh, arhitektonska akustika", Prof dr Tihomil Jelaković, Zagreb, 1978. Školska knjiga
2. "Buka u životnoj sredini", Prof dr Dragan J. Veličković, Niš, 1999.
3. "Osnovi tehničke akustike", Kuturović H., Beograd, 1990. Naučna knjiga
4. <http://www.kettering.edu/~drussell/Demos/waves/wavemotion.html>
5. www.sfu.ca/~truax/handbook.html
6. http://64.233.183.104/search?q=cache:AzI2GhpNAkJ:www.fer.hr/_download/repository/U6_Prostorna_akustika.pdf+prostorna+akustika&hl=en&ct=clnk&cd=2&client=firefox-a
7. www.google.com (pomoć u pretraživanju slika i grafika)

Kratka biografija



Zoran Aleksić, rođen 6.4.1955. godine u Pančevu, Republika Srbija. U Novom Beogradu završio Osnovnu školu "Ivan Gundulić", u Beogradu Srednju elektro-tehničku školu "Nikola Tesla" i Višu pedagošku školu, gde je diplomirao 1977. godine na smeru nastavnik fizike-hemije.

Već 27 godina radi kao nastavnik fizike u nekoliko beogradskih škola. Sada radi u O.Š. "Branko Radičević" u Novom Beogradu.

Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu upisao je Oktobra 2005. godine, smer profesor fizike.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

18.05.2007

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Dr Božidar Vujičić, redovni profesor PMF-a

član:

Dr Nataša Todorović, docent PMF-a

član:

Dr Radomir Kobilarov, redovni profesor PMF-a

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Note:

N

Abstract:

AB

Accepted by the Scientific Board: **18.05.2007**

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President: Dr Božidar Vujičić, full professor

Member: Dr Nataša Todorović, assistant professor

Member: Dr Radomir Kobilarov, full professor