

MATEMATIKA IZVAN MATEMATIKE

Igra zvuka i prostora¹

BLAŽENKA SLOVENEC², KATARINA SMERNIĆ³ I NIKOL RADOVIĆ⁴

Ključne riječi: zvuk, ton, koncertni prostor, odjek, amfiteatar u Epidauru, materijali, oblici i konstrukcije koncertnih dvorana

Sažetak: Na nekom koncertu slušatelj uživa u zvuku koji reproduciraju različita glazbala. Kakva mora biti koncertna dvorana da bi oku bila lijepa, a da se zvuk u njoj osjeća ugodno? Postoje mnogi prostori u kojima je zvuku neugodno, u kojima se kristalno čist i jasan ton lomi, reflektira i pretvara u kakofoniju, i tada se zvuk srami što kao nepogoda udara o bubnjić slušatelja koji se mršti i ljuti na zvuk kao da je krivica njegova.

Zadaća je arhitektonske akustike da prostor učini i oku i uhu ugodnim, a to nije ni malo lak zadatak pri kojem se moraju zadovoljiti mnogi jednakovažni uvjeti.

U prostoru ne smije biti vanjske buke, jeke, ne smije nastajati ni rezonancija. Zvuk na svakom mjestu u prostoru mora biti iste glasnoće, a odjek tako malen da ne bi došlo do preklapanja uzastopnih tonova. Osim toga na svojstva zvuka u prostoru utječe vrsta materijala, raspored elemenata interijera i oblik samog prostora/dvorane. Posebno je teško ispuniti uvjet što kraćeg odjeka (early reflections) od cca 80 ms nakon prvobitnog tona, koji između prvog tona i njegovog ekvivalentnog odjeka mora biti što kraći kako bi slušatelj imao osjet blizine zvučnog izvora.

Kako oblik prostora / dvorane utječe na zvuk? Koja je uloga bočnih stijena i stropa? Zašto je zvukova ekipa za tulum drvena, hrapava, vapnenasta? Zašto ga groznica tresse od metala, betona i nepravilnih oblika?

Zašto je zvuk najsretniji u amfiteatru u Epidauru, kad mu se posreći da tamo nastupa?

Na sva ova pitanja i još nešto više, odgovorit će vam zvuk igrom u prostoru.

Ja sam Zvuk. Neki za mene kažu da sam longitudinalni val određene frekvencije koji se širi kroz neko sredstvo, Slika 1. Da bih nastao, neko tijelo mora vibrirati i biti u direktnom kontaktu sa sredstvom kojim se širim ili, ako vam je ljepše, koji me prenosi.

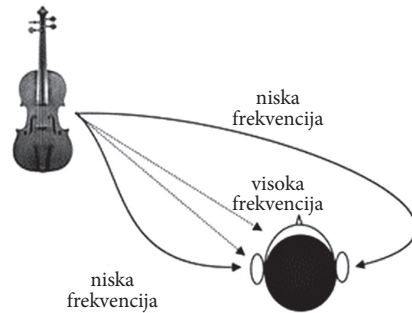
¹Predavanje je održano na 7. kongresu nastavnika matematike RH.

²Blaženka Slovenec, Gimnazija Sisak, Sisak

³Katarina Smernić, učenica 4.r. opće gimnazije Gimnazija Sisak, Sisak

⁴Nikol Radović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Moje širenje, točnije lebdenje na valu (kao Aladin), temelji se na nizu poremećaja odnosno „zguščivanja” i „razrjeđivanja” sredstva koji nastaju uslijed promjene tlaka. Zbog toga ja na tom putu zahtijevam neko sredstvo (voda, zrak, metal). No u vakuumu me nema jer ne postoji sredstvo za moje širenje. Međutim, nije baš sve uvijek idealno u mom lebdenju i širenju. Problemi nastaju u prostorijama u kojima se sam sa sobom sudaram, preklapam i borim, pa na kraju rezultat nije njegovo visočanstvo Zvuk, tj. ja, nego buka, kako fonija i galama. Postoji znanost koja me proučava, liječi i usavršava. To je akustika.



Slika 1.

Akustičnost u prostoru obuhvaća mnoge segmente: izvore i širenje zvuka, te odnos i usklađivanje raznih zvučnih pojava. Moja brzina u zraku je konstantna, približno 340 m/s, a uho čovjeka registrira frekvencije zvuka od 20 Hz do 20 000 Hz, što odgovara valnim dužinama od 17 do 0.017 m, a najosjetljivije je za frekvencije 600 Hz do 6000 Hz. Akustičnost prostorije ovisi o njezinoj veličini, obliku i načinu obrade površina. Dakle, nisu sve prostorije jednako akustične i u njima se ne osjećam uvijek ugodno. Kako bi mi ugodila, arhitektonska akustika ima zadaću da u prostoru stvori uvjete za dobro i ugodno slušanje moje malenkosti, i to tako da:

- u prostoru ne smije biti jeka, vanjske ni unutarnje buke;
- moja glasnoća mora posvuda biti približno jednaka;
- u prostoru ne smiju nastajati neželjene rezonance, a odjek mora biti dovoljno malen da bi se izbjegla preklapanja uzastopnih zvukova.

Pri lebdenju do slušatelja u prostoru / koncertnoj dvorani na mene utječu i materijali, kao i raspored elemenata interijera. Može se reći da ja mogu biti:

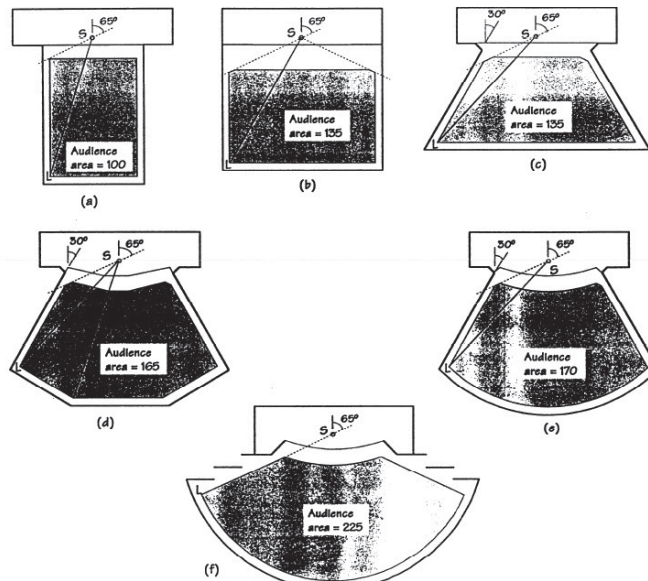
- izravan, tj. širim se pravocrtno od instrumenta / orkestra / vokala do slušatelja;
- odjek – sva odbijanja zvuka;
- jeka (reverberacija).

Provedena istraživanja pokazala su da posebnu ulogu u doživljaju mene imaju rani odjeci (early reflections) koji se pojavljuju otprilike 80 milisekundi nakon prvobitnog zvuka. Zavirimo malo u svijet akustike jezikom znanosti.

Kada je vremenski interval između prvog zvuka i prvog njemu ekvivalentnog odjeka kratak, tada će slušatelj imati dojam blizine izvoru zvuka (izvođaču, instrumentu, itd.). Ova je osobina ključ za visoku kvalitetu akustike jedne dvorane.

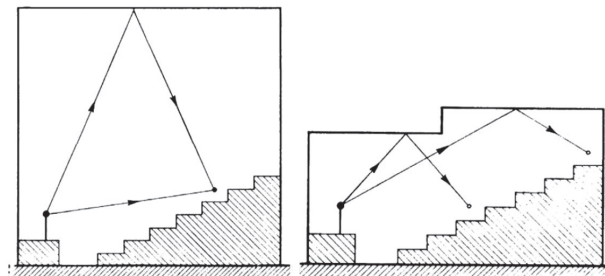
Akustička svojstva prostorije značajno ovise o njenom obliku. Kada govorimo o raspodjeli zvuka u prostoru, bitno je znati da zvuk dolazi do slušatelja što kraćim putem, kao i da se slušatelji nalaze od govornika u kutu od $\pm 45^\circ$ ispred govornika.

Iz akustičkog aspekta vrlo su povoljne prostorije trapezna ili lepezasta oblika jer tada imamo usmjereni kut i kratak razmak između govornika i slušatelja. Tada bočne stijene prostorije postaju dobar reflektor koji ravnomjerno reflektira zvuk po cijelom auditoriju. Dvorane djelomično lepezastog oblika također daju relativno dobre rezultate, dok je najslabija prirodna akustika u objektima eliptičnog i kružnog tlocrta, kao i objekti s konkavnom stražnjom stranom.

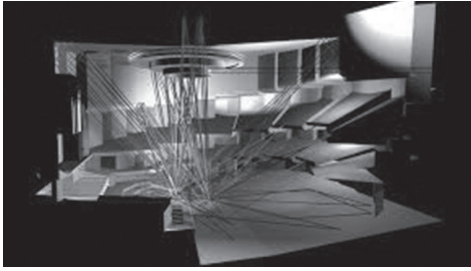


Slika 2. Oblici koncertnih dvorana

Osim oblika koji je ključan za dobru akustiku, posebna se pozornost mora posvetiti oblikovanju dvaju konstruktivnih elemenata: zidu i stropu. Akustični zid je zid posebno obrađenih površina gdje je površina i upotreba materijala takva da se onemogućava stvaranje nepoželjnih efekata jekne pri refleksiji zvuka, a akustični zid odvojen od nosivog, konstruktivnog zida šupljinom koja ima svrhu „upijanja” zvučnih valova. U antičkim grčkim kazalištima akustika je bila poboljšavana ugradnjom keramičkih ćupova, čija je šupljina imala svrhu upijanja zvuka i onemogućavanja jekne.



Slika 3. Visina i oblici stropa dvorane

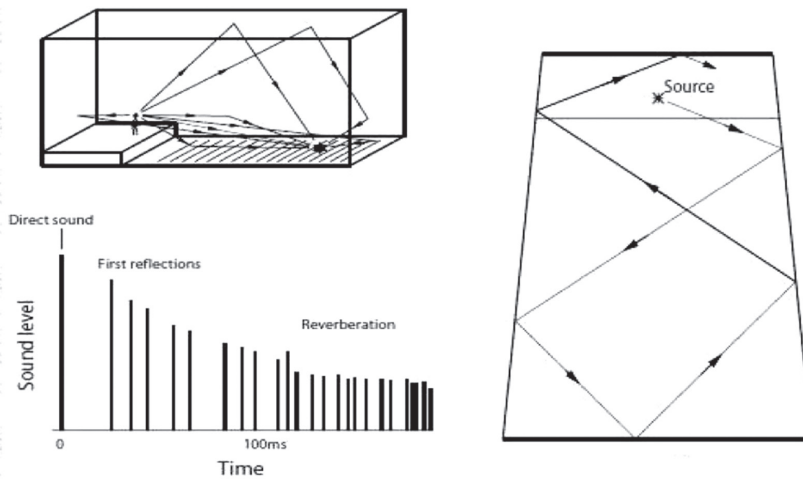


Slika 4. Kompjutorski model koncertne dvorane pokazuje primarnu refleksiju zvuka između izvora na pozornici i slušatelja

Strop je ploha koja značajno pridonosi pojačanju zvuka, ali ako nije ispravno projektiran, dolazi do problema. Akustični stropovi izvode se od materijala koji najčešće imaju karakteristike nepravilne refleksije zvuka, a njihove su površine izlomljene i nepravilno hrapave.

Tipovi koncertnih dvorana

Izrazito je bitno u kakvoj dvorani nastupam jer ja mogu biti šapat s jakošću 10 dB, šum lista od 10 dB, ali kad nastupamo simfonijski orkestar i ja fortissimo, onda letimo na 80 dB. Zamislite da se tada nalazim u kuglastoj dvorani i da se sudaram sa zidovima, sam sa sobom i pojačavam, gubim intonaciju i stvaram kakofoniju. Zbog toga je bitno u kakvoj dvorani nastupam. Osobno najviše volim dvorane u obliku kutije za cipele, manje volim dvorane u obliku vinograda u kojima ponekad zvučim kao da sam dobio prehladu, ali sada prepuštam riječ akustičarima.



Slika 5. Širenje zvuka u prostoru

Koncertne dvorane dijelimo na kutijaste (engl. *shoebox*), velike kutijaste, „vinograd” i hibridne dvorane. Zvuk u svakoj dvorani želi biti jasan, čist i uhu ugodan, a da bi se to ostvarilo, svaki tip dvorane mora ispunjavati određene uvjete od oblika, volumena, akustičnih zidova i stropa do maksimalnog broja slušatelja koji također utječu na kvalitetu zvuka. Pođimo redom:

- **Kutijaste dvorane** su dvorane s gusto zbijenim sjedalima (1650 – 2000 mjesta) u pravokutnom prostoru. Zvuk se širi preko bočnih zidova i na taj se način osigurava snažan odjek, dok je stražnji zid otvoren tako da reflektira dodatne valove natrag prema publici. Ovaj tip dvorane često u dnu ima mali balkon koji daje česte odjeke. Gornje dvije trećine prostora ispunjene su zvukom koji se širi iz svih smjerova i stvara se ugodna reverberacija koja osigurava intiman zvuk, jednake kvalitete u cijelom prostoru. Primjer ovakve dvorane je Velika dvorana u Beču izgrađena 1870. s 1744 mjesta.
- **Velike kutijaste dvorane** od kutijastih se najprije razlikuju po veličini i projektiraju se za više od 2000 mjesta. Kako bi kvaliteta zvuka bila na razini one u kutijastih dvorana, često se primjenjuje nagnuti pod koji daje bolji učinak izravnog zvuka, ali zato smanjuje pozadinsku i stropnu refleksiju, zbog čega se smanjuje snaga zvuka. Reverberaciju umanjuje veći broj balkona, ali na taj se način smanjuje i količina zvuka koja stiže iz gornjeg dijela dvorane do partera i zbog toga ove dvorane imaju lošiju akustiku od manjih, kutijastih. Primjer ovakve dvorane je dvorana Bostonskog simfonijskog orkestra izgrađena 1900. godine, s 2625 mjesta.
- **„Vinograd” dvorane** karakteriziraju sjedeća mjesta grupirana u grozdove koji okružuju podij za orkestar i izvođače, a zidovi oko svakog od blokova imaju ulogu prvih odjeka, iako je on u ovom slučaju duži nego kod kutijastih dvorana. Ovaj koncept najviše kritika trpi zbog nepostojanja pozadinskog odjeka. Instrumenti šalju zvuk radijalno ispred izvođača, pa su stropna od-



Slika 6. Velika dvorana u Beču

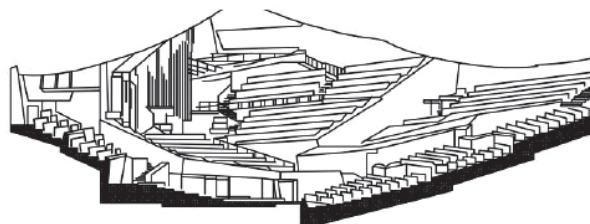


Slika 7. Dvorana Bostonskog simfonijskog orkestra

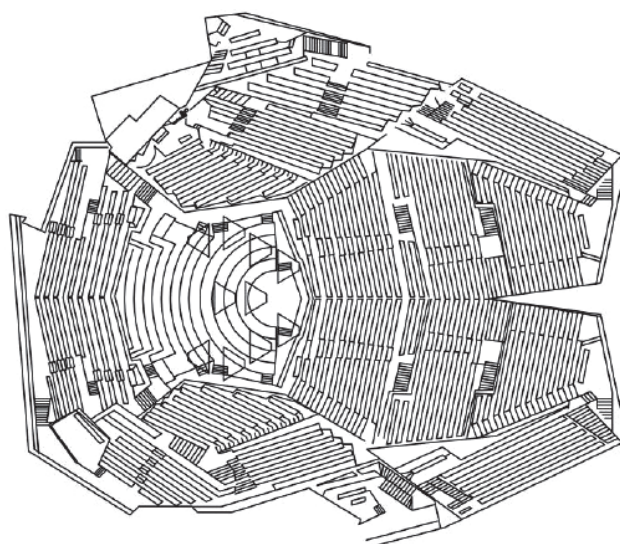


Slika 8. Berlinska filharmonija

bijanja manja, a punoća zvuka i dalje nije kao kod onog u kutijastim dvoranama zbog nepostojanja jake geometrije prostora koja bi rezonirala zvuk i stvarala puniju i oštriju reverberaciju.



SECTION



Slika 9. Tlocrt i nacrt filharmonijske dvorane u Berlinu

- **Hibridne dvorane** su dvorane kod kojih se kombiniraju svi navedeni koncepti, s glavnim kriterijem kako dobiti što bolju kvalitetu zvuka za što veći broj slušatelja.



Slika 10. Boettcher Hall, Denver, 1978, 2634 mjesta

Zvučna izolacija

Da bi mi u dvorani bilo ugodno, mora me se spriječiti da zidove natjeram na vibriranje, da pobjegnem kroz njih ili da možda klisnem preko neke metalne cijevi brzinom 5000 m/s ili da neki drugi zvuk privučen mojom prisutnošću pokuša ući u dvoranu u kojoj nastupam. Pogledajmo što građevinski akustičari tu predlažu.

Potrebno je spriječiti dolazak složenih i neusklađenih zvučnih valova. Za izražavanje zvučne izolacije najčešće se koristi *zvučna izolacijska moć* R_w , koja se izražava u decibelima (dB). Ona pokazuje za koliko dB taj materijal smanjuje razinu buke. Primjerice, jednostruko prozorsko staklo smanjuje razinu buke za 30 dB.

Zvučna izolacijska moć je fizikalna veličina kojom se opisuje građevinska konstrukcija (zid, strop, međukatovi, prozori...) i određuje se u laboratorijskim uvjetima, pri čemu mora vrijediti

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log S/A$$

L_1 – razina zvučnog tlaka u predajnoj prostoriji,

L_2 – razina zvučnog tlaka u prijamnoj prostoriji,

S – površina kroz koju prolazi zvučna energija,

A – ukupna površina.

Ukupna energija koja se u obliku zvučnog tlaka predaje nekom pregradnom elementu jednim se dijelom raspoređuje na odbijenu, apsorbiranu i prenesenu energiju. Ovdje moramo smanjiti prenesenu energiju i „preseliti” je u apsorbiranu.

Kako to učiniti? Jednostavno, umetanjem apsorpcijskih materijala, npr. stiropora, mineralne vune. Na ovaj način jedan se dio zvuka apsorbira. Nadalje, između slojeva pregrada umeću se elastični materijali, stvaraju dvostruke pregrade s pomaknutim stupovima, što ima za posljedicu da će se jedan dio zvuka oslabiti prolaskom kroz zračni džep, a drugi će biti značajno smanjen kada dođe do umetnute izolacije.

Na kraju je potrebno još vidjeti kako se riješiti rezonancije ili je bar umanjiti.

Svaki mehanički sustav ima svoju vlastitu frekvenciju osciliranja. U trenutku kad se vanjska frekvencija (tj. buka) izjednači s vlastitom, dolazi do rezonancije odnosno do povećanja amplitude osciliranja. Ovaj se problem može riješiti na dva načina:

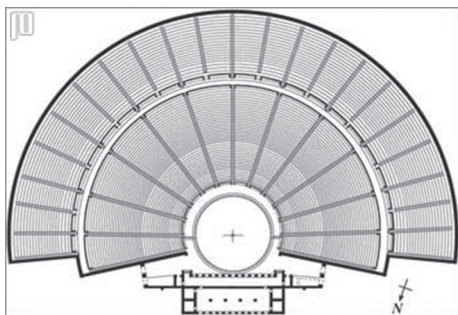
- prigušenjem, tj. korištenjem određenih elastičnih materijala koji smanjuju amplitude odnosno razinu zvuka;
- pomicanjem rezonantne točke; ukoliko poremećaj tlaka (tj. zvučna oscilacija) djeluje dovoljno kratko, tada neće doći do rezonancije.

Nakon razmatranja akustičara i građevinara mogu reći da obožavam nastupati u teatru u Epidauru. To je građevina impresivnih dimenzija. Samo sam ovdje jasan, kristalno čist i jednom riječju – veličanstven.



Slika 11. Teatar u Epidauru

Gledalište (theatron) je široko oko 118 m, dugačko 80 m. Orchestra ima istu dužinu i širinu 20.5 m. Orchestra („plesalište”) je okrugli ili polukružni prostor ispred odnosno ispod scene – često je bio fizički niže sagrađen od scene. Scena (skene) široka je 27 metara. U prednjem dijelu scene nastupali su glumci, a ostatak je bila scenografija te ulazi i izlazi za glumce. Teatar u Epidauru ima 14 000 sjedećih mjesta. Gledalište ili theatron je od kamena vapnenca, a podloga orchestre za chorus bila je od nabijene zemlje, ograđena punim krugom od kamena vapnenca. Krug orchestre je promjera 20.4 m. Na sredini orchestre i danas je vidljiv bijeli kamen – poput postolja. Gledalište je savršeno simetrično i „ugrađeno” u planinu, pri čemu položaj gledališta unutar planine primarno služi kao površina za primanje i refleksiju zvuka, a sekundarno kao faktor fantastične akustike.



Slika 12. Tlocrt Epidaura



Slika 13. Ja lebdim

Sad i sam vidim koliko je komplicirano i teško projektirati, da ne kažem konstruirati koncertnu dvoranu kako bi meni bilo ugodno i da se pojavim u svojoj veličini pred slušateljima. Kad sve ovo znam, još je veće moje divljenje prema graditeljima Epidaura u kojem se osjećam veličanstveno.

Literatura:

1. T. J. Cox, P. D'Antonio. *Engineering art: the science of concert hall acoustics*. Interdisciplinary Science Reviews, Vol. 28, No. 2, 2003., 119 – 129.
2. R. Essert. *Progress in concert hall design – developing an awareness of spatial sound and learning how to control it*. EBU Technical Review, 1997.
3. R. Essert. *Links between concert hall geometry, objective parameters, and sound quality*. Invited paper presented at the joint meeting of the Acoustical Society of America/ DAGA/ Forum Acusticum, Berlin, March 1999. J. Acoust Soc Am. 105(2), 1999., 986.
4. K. B. Ginn. *Architectural Acoustics*, Brüel & Kjær, 1978.
5. M. Long. What is so special about shoebox halls? *Acoustics Today*, 2009., 21 – 25.
6. B. Markham. *Leo Beranek and Concert Hall Acoustics*. *Acoustics Today*, 2014., 48 – 58.
7. J. Pendley. *Visualizing sound: A musical composition of aural architecture*. University of South Florida Scholar Commons, 2009.

Internet adrese:

- https://www.fer.unizg.hr/_download/.../5.predavanje%5B1%5D.pdf (2. 4. 2016)
- <http://atorwithme.blogspot.hr/2011/08/kustika-koncertnih-dvorana> (2. 4. 2016.)
- <http://www.vebidoo.de/berlin+ndebe-nlome> (5. 4. 2016.)
- <http://upoznajmuziku.com/2015/08/20/berlinska-filharmonija> (5. 4. 2016.)
- <http://povijest.net/epidaur> (4. 4. 2016.)
- <http://sites.tufts.edu/wright> (13. 4. 2016.)
- <http://www.pspatialaudio.com/Stereo%20primer.htm> (29. 3. 2016.)
- <http://scholarcommons.usf.edu/etd> (29. 3. 2016.)
- <http://www.artscplx.com/venues/boettcherconcerthall/tabid/72/default.aspx> (13. 4. 2016.)
- <http://www.boston-theater.com/theaters/boston-symphony-hall/holiday-pops.php> (13. 4. 2016.)
- <https://www.vienna-concert.com> (13. 4. 2016.)