

20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF

Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović

Sadržaj — Fizički modeli su važan alat u istraživanju i u akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala. U Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu upotreba fizičkih modela prostorija započela je pre 20 godina, inicirana potrebama rekonstrukcije Narodnog pozorišta u Beogradu. Tokom proteklih godina u radu na akustičkom dizajnu raznih sala uvedene su i neke inovacije u tehnologiji primene modela. Na osnovu takvog iskustva fizički modeli raznih prostorija koriste se i kao sredstvo u nastavi akustike za demonstracije raznih fenomena u zvučnom polju.

Ključne reči — akustika prostorija, fizički model, akustički dizajn prostorija.

I. UVOD

Oцена akustičkog kvaliteta sala za muzička izvođenja zasniva se na veoma složenim subjektivnim kriterijumima koji proizilaze iz domena estetike zvučne slike. Zbog toga je zadatak akustičkog dizajna takvih prostorija najstrožiji zadatak akustičkog dizajna uopšte jer, za razliku od drugih projektantskih poslova, uvek u značajnoj meri uključuje istraživački rad. Iz specifičnih estetskih kriterijuma koje postavljaju slušaoci i muzičari prema onome što čuju u sali proizišli su veoma delikatni i brojni tehnički kriterijumi. Svi su oni bazirani na podacima koji se izračunavaju iz monauralnih i binauralnih impulsnih odziva prostorije. Spisak svih tako definisanih kriterijuma za operne i koncertne sale nije konačan, jer to još uvek predstavlja oblast intenzivnog istraživanja. Neki od njih utvrđeni su samo opisno, i još uvek nemaju odgovarajuće numeričke ekvivalente. Realna optimizacija u zadovoljavanju višedimenzionalnih kriterijuma osnovni je cilj akustičkog dizajna sala za muzička izvođenja.

U akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala danas je na raspolaganju širok izbor alata i postupaka. Tome je doprinelo nekoliko relativno nezavisnih tokova razvoja. Prvo, danas postoji bogata istorija projektovanja: mnoštvo pisanih dokumenata o akustičkim rešenjima koncertnih i operskih sala širom sveta, prikazi rezultata objektivnih merenja u njima, a publikovane su i subjektivne ocene njihovog kvaliteta. Drugo, postoji obimna teorijska literatura o poželjnim fizičkim svojstvima zvučnog polja da bi se postigao odgovarajući estetski kvalitet zvučne slike. I najzad, razvoj tehnologije doneo je široku rasprostranjenost računarskih resursa čija je primena postala standard i u akustičkom dizajnu. Njihova primena je praćena razvojem komercijalnih softverskih paketa za

razne specifične namene, pre svega za simulaciju zvučnog polja i za akustička merenja. Sve to veoma je unapredilo praksu akustičkih konsultanata, pa je ona danas značajno drugačija nego što je bila pre samo deceniju ili nešto više.

Verovatno najinteresantnija prekretnica u oblasti akustičkog dizajna prostorija je pojava softverskih paketa koji služe za simulaciju zvučnog polja. Oni su uglavnom zasnovani na primeni geometrijskog modela (rej-trejsing, teorija likova ili neka njihova kombinacija). Eleganost softverskih alata u primeni, lakoća kojom se postiže bogatstvo varijeteta rezultata koje daju i dopadljivost njihove prezentacije stvorili su pogrešan utisak "nepodnošljive lakoće akustičkog projektovanja". Može se reći da je atraktivnost primene softverskih alata učinila da mnogi steknu utisak o "kraju istorije" razvoja tehnologije akustičkog dizajna [1].

Analiza pomoću fizičkih modela prostorija, napravljenih u nekoj smanjenoj razmeri, među svim danas korišćenim alatima za predikciju zvučnog polja predstavlja jednu od najstarijih metoda korišćenih u istraživanju i projektovanju. Još veoma davno u literaturi su se pojavili podaci o primeni jednostavnih dvodimenzionalnih fizičkih modela (na primer, za analizu neke sale u njenom podužnom preseku). Simulacija prostiranja zvuka u zadatoj geometriji preseka sale vršena je pomoću talasa na vodi ili ultrazvukom. Prvi takav primer zabeležen je u jednom radu Sabina još 1913. godine [2]. Rani pokušaji rada sa trodimenzionalnim fizičkim modelima zasnivali su se na primeni svetlosnih zraka za praćenje sudbine refleksija. U takvim modelima jednostavne analize zvučnog polja mogle su se obavljati običnim posmatranjem, bez pomoći neke sofisticirane merne opreme i analize signala. Može se reći da je taj početni period korišćenja fizičkih modela generalno bio opterećen nedostatkom adekvatne merne opreme. Tek sa razvojem elektronike i elektronskih mernih uređaja fizički modeli dobijaju svoj pravi smisao.

Razvoj računara i pojava komercijalnih softverskih paketa za predikciju zvučnog polja pomoću geometrijskog modela u jednom periodu razvoja akustike prostorija stvorili su privid da je vreme fizičkih modela prošlo. Dve njihove značajne osobine bile su konfrontirane prividnoj jednostavnosti izrade i korišćenja softverskih modela: relativno visoka cena i relativno dugačak vremenski rok potreban za izradu smanjene makete prostorije. Zbog toga se u nekoliko poslednjih decada dvadesetog veka fizičko modelovanje, sa retkim izuzetcima, uglavnom nije pominjalo u literaturi.

Iskustvo na projektovanju pokazalo je da u enterijeru sala mogu postojati značajni uticaji na zvučno polje koji se, zbog raznih teorijskih ograničenja ne mogu prikazati u softverskim modelima zasnovanim na principima geometrijske akustike. To je ozbiljan nedostatak

Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet, Beograd, emijic@etf.bg.ac.yu.

Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dsumarac@etf.bg.ac.yu

softverskih alata u okolnostima kada se postavljaju najviši zahtevi akustičkog dizajna, kao što je to u slučaju koncertnih i operskih sala. To je možda još veći neostatak kada se koriste u istraživačkom radu. Zbog toga je postalo jasno da vreme fizičkih modela u akustici ipak još nije prošlo. Najveći zamah u tom domenu dogodio se uvođenjem računara u merne procedure, što se dogodilo u proteklih dvadesetak godina. Može se reći da je to donelo izvesnu renesansu u primeni fizičkih modela za istraživanja i u dizajnu sala, jer su računari omogućili vrlo detaljnu kvantitativnu analizu impulsnih odziva u okolnostima kada postoje izražene difrakcione pojave na raznim preprekama čije su dimenzije poredljive sa talasnim dužinama. Nasuprot tome, način na koji se iste pojave predstavljaju u softverskim modelima krajnje je aproksimativan. Zbog toga su fizički modeli korišćeni u projektovanju gotovo svih značajnijih sala izgrađenih tokom poslednjih dvadesetak godina.

Taj pomeraj u tehnologiji merenja u fizičkim modelima, ostvaren u novije vreme, učinio je da čitava ta delatnost oko njihove primene postane jedna od najzahtevnijih oblast u akustici prostorija uopšte. Razlog tome treba tražiti u nekoliko ključnih činjenica. Prvo, za merenja u fizičkim modelima prostorija koristi se nestandardna oprema, koja nije predmet serijske proizvodnje i uglavnom se ne može nigde kupiti. Drugo, za merenje u modelima na povišenim frekvencijama u odnosu na realne zahteve se razne delikatne kompenzacija uticaja disipacije u vazduhu i na graničnim površinama. Najzad, za bilo kakav rad sa fizičkim modelima potrebni su napor i vreme da se za svaki konkretan zadatak napravi poseban model.

Kao odgovor na izazov praćenja tokova savremenog razvoja akustike prostorija i istraživačkog učestvovanja u tom procesu, u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu pre tačno dvadeset godina započeli su prvi eksperimenti sa fizičkim modelima sala. U ovom radu su rezimirana dosadašnja iskustva u toj oblasti. Pokazan je razvoj sopstvene namenske opreme, kao i najnovija iskustva u primeni modela za akustički dizajn sala. Na osnovu toga, fizički modeli su vremenom našli svoju primenu i u nastavi akustike.

II. PRINCIPI FIZIČKOG MODELOVANJA PROSTORIJA

Primena fizičkih modela za analizu dinamičkih sistema nije ekskluzivna pojava u akustici. Mnogo pre toga fizički modeli korišćeni su u mehanici, brodogradnji, aerodinamici i sličnim oblastima. Postoje zapisi da je još Leonardo da Vinči koristio jednostavne fizičke modele za proveru mehaničkih sistema koje je konstruisao, a braća Rajt su svoje avione isprobavali na smanjenim fizičkim modelima u improvizovanom aerodinamičkom tunelu [3]. U svim okolnostima primene fizički modeli služe kao alatka istraživača, ali i projekatnata. U akustici ta veza istraživanja i inženjerske prakse je veoma jaka i svako projektovanje uz upotrebu fizičkih modela nužno podrazumeva i izvestan istraživački rad [4].

Koncept fizičkih modela zasniva se na principima dinamički sličnih sistema. Taj princip znači da se dva sistema mogu konstruisati da budu različiti u svojoj veličini, ali da budu slični u svakom drugom pogledu, što znači da se dinamički procesi u njima odvijaju na jednak način. U akustici pojam dinamički sličnih sistema znači da postoji jednakost u procesima koji se odvijaju u zvučnom polju u nekoj realnoj prostoriji, koja se označava kao original, i zvučnog polja u posebno napravljenoj prostoriji

istog oblika, ali srazmerno smanjenih dimenzija, koja se označava kao fizički model.

Uslovi za zadovoljenje dinamičke sličnosti dva različita akustička sistema, kao što je to u slučaju zvučnog polja u dve prostorije, zasnivaju se na postizanju jednakosti osnovnih fizičkih zakonitosti, poput na primer Njutnovog drugog zakona kretanja [5]. Iz toga se izvodi da je za dinamičku sličnost originala i modela kao dva sistema potrebno da veličina svih fizičkih dimenzije i talasne dužine u originalu i u modelu zadovoljavaju uslov:

$$\frac{l_O}{l_M} = \frac{\lambda_O}{\lambda_M} = n \quad (1)$$

Ovde indeks O označava parametre u originalu, a M u fizičkom modelu. Parametar n je faktor skaliranja modela u odnosu na original (zbog toga se ovakvi modeli na engleskom nazivaju *scaled models*). Ako je gornja relacija zadovoljena, odnos talasne dužine zvuka i prepreka sa kojima zvučni talasi stupaju u interakciju u originalu i u modelu su isti, bez obzira na vrednost n . To dalje znači da se svi procesi na graničnim površinama u ta dva procesa, kao što su refleksija i difrakcija, odvijaju na jednak način.

Brzina prostiranja zvuka je konstanta i u opštem slučaju ista je u originalu i u modelu. Talasna dužina određena je relacijom:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Zamenom izraza (2) u (1) dobija se uslov dinamičke sličnosti u domenu frekvencija:

$$\frac{f_M}{f_O} = n \quad (3)$$

Zbog ovog uslova pri povećanju frekvencije u modelu n puta vremenska osa se komprimuje sa istim faktorom n . Ova činjenica se mora uzimati u obzir pri tumačenju sličnosti sistema.

Prema tome, pod pojmom fizičkog modela neke prostorije u akustici se podrazumeva maketa njene unutrašnjosti, napravljena tako da su joj sve dimenzije određene deljenjem originalnih dimenzija sa n , to jest u razmeri 1: n (fizički modeli prostorija su iz razumljivih razloga uvek manji od originala). Uslov sličnosti zvučnog polja u modelu i originalu zadovoljen je kada se model pobuđuje frekvencijama koje su n puta više od frekvencija u originalu. U impulsnom odzivu koji se dobija u takvom modelu vremenska osa je komprimovana n puta. Da bi se na relevantan način tumačio akustički odziv snimljen u fizičkom modelu neophodno je sa istim faktorom ekspanovati vremensku osu., a isprekidanom linijom pomerena standardna kriva.

U analizi na fizičkim modelima prostorija koriste se faktori skaliranja od 10 do 50 (to jest u razmeri 1:10 do 1:50). Samo u retkim slučajevima moguće je primeniti faktor manji od 10. Naime, za izbor vrednosti razmere u smanjenju modela postoje krajnje praktični razlozi koji proizilaze iz konačne veličine modela koga treba napraviti, zatim negde smestiti i sa njim manipulirati. Samo u slučaju sala manjih dimenzija moguće je planirati izradu modela razmere 1:10. U analizi većih sala nužna je sitnija razmera da bi se napravio model prihvatljivih spoljašnjih gabarita.

III. PRVA ISKUSTVA – NARODNO POZORIŠTE U BEOGRADU

Tokom rekonstrukcije zgrade Narodnog pozorišta u Beogradu prvi put je kod nas za potrebe akustičkog

projektovanja neke sale korišćen njen fizički model. Da bi se omogućila analiza doprinosa složenih geometrijskih formi i proverila neka predložena varijantna rešenja, stručni tim Laboratorije za akustiku tada je napravio fizički model velike sale ovog pozorišta u razmeri 1:10. Tokom rada na projektu rekonstrukcije sale u njemu su sprovedene razne analize uticaja pojedinih elemenata enterijera na zvučno polje kada se sala pobuđuje sa bine. Taj poduhvat je izveden u periodu 1987-88 godine, što je pre tačno dvadeset godina, a pozorište je konačno otvoreno 1989. godine.



Slika 1 – Fizički model sale Narodnog pozorišta u Beogradu napravljen u razmeri 1:10 (Laboratorija za akustiku ETF, 1989.).



Slika 2 – Dve faze izrade modela sale sa slike 1.

Spoljašnji gabarit tog fizičkog modela sale bio je 190x200x175 cm, a formiran je iz dva dela, sa presečnom ravni po podužnoj osi sale. Konfiguracija sale Narodnog pozorišta ima vrlo složenu formu, sa raznovrsnim denivelacijama poda, lučnim ogradama galerija, svodovima na plafonu, itd. Zbog toga je sama izrada tog fizičkog modela bila svojevrsan poduhvat za sebe [6]. Nažalost, taj prvi fizički model od koga je sve počelo nije sačuvan do danas.

Na slici 1 prikazan je deo unutrašnjosti tada napravljenog fizičkog modela sale Narodnog pozorišta u Beogradu. Na slici se može videti složena struktura galerija, sa detaljima njihovih nosećih elemenata, stubovima i profilisanim lučnim ogradama. Delovi od kojih je model sklopljen bili su napravljeni od drveta i raznih vrsta drvenih prerađevina. Kao ilustracija, na slici 2 prikazane su dve fotografije napravljene u fazi izrade ovog modela. Nakon sklapanja sve površine u modelu

premazane su lakom da bi se minimizirala apsorpcija, što je trebalo da bude ekvivalent apsorpciji tvrdih građevinskih materijala u realnosti.

Jedan od razloga složenosti akustičkih ispitivanja na fizičkim modelima sala je problem adekvatne zvučne pobude. U okolnostima kada su geometrijske dimenzije smanjene sa nekim faktorom n , frekventijska osa se mora množiti tim istim faktorom, shodno uslovu definisanom izrazom (3). S obzirom na razmere koje se koriste pri skaliranju modela, neophodno je da zvučni izvor koji će biti korišćen generiše dovoljno jaku pobudu na n puta višim frekvencijama od realnosti. Jedan od uobičajenih načina zvučne pobude, koji se koristi u takvim okolnostima, je kontrolisani električni varničar. On stvara impulsnu pobudu, tačnije pucanj, i kao takav prikladan je za snimanje impulsnih odziva u fizičkim modelima.



Slika 3 – Varničar (gore) i njegov generator impulsa (dole)

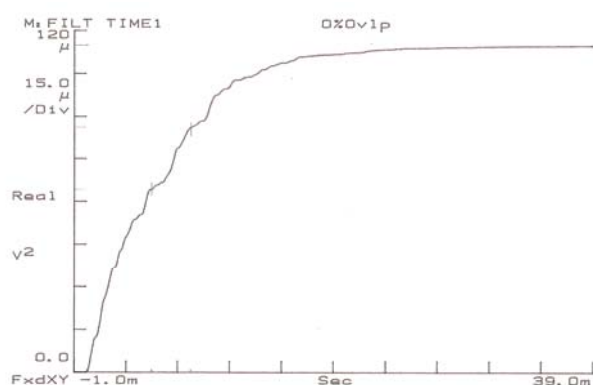
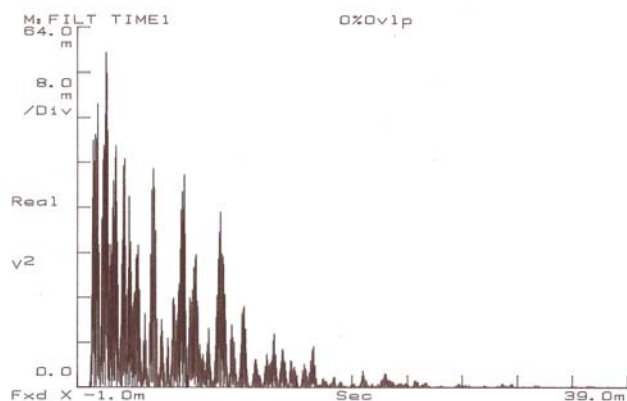
Međutim, to je uređaj koji se ne proizvodi komercijalno i ne može se nabaviti na tržištu. Zbog toga je paralelno sa izradom modela u laboratoriji napravljen, po prvi put, dovoljno efikasan impulsni generator za pobudu varničara. Takođe je napravljen i sam varničar u dimenzijama koje su prikladne za primenu u fizičkom modelu napravljenom u razmeri 1:10. Na slici 3 prikazane su fotografije tada napravljenog varničara i njegovog pobudnog generatora.

U to vreme, krajem osamdesetih godina, analiza impulsnih odziva vršena je priručnom laboratorijskom opremom. Za posmatranje i elementarnu analizu impulsnih odziva korišćen je programabilni digitalni osciloskop. Dva primera rezultata iz tog vremena prikazani su na slici 4. Na osnovu takvih analiza i dobijenih rezultata proverene su predlagane promene u nekim geometrijskim detaljima sale i definisan konačan projekat rekonstrukcije [6]. Tako je taj pionirski akustički poduhvat uspešno završen i ostao ugrađen u "život" poznate beogradske sale [7,8,9].

IV. PARCIJALNI FIZIČKI MODELI – KORAK DALJE U TEHNOLOGIJI DIZAJNA

Korišćenje fizičkih modela prostorija nesporno je značajno u predikciji zvučnog polja i praktično nezamenjivo u mnogim okolnostima istraživačkog rada iz domena akustike prostorija. Međutim, danas postoji

ozbiljno pitanje modusa njihovog korišćenja u realnom procesu projektovanja jedne sale. Problem koji se pri tome objektivno javlja proizilazi iz nemogućnosti njihovog uklapanja u realne vremenske rokove i raspoložive finansijske okvire, uobičajene kod nas kada se radi o projektovanju građevinskih objekata, pa i sala bez obzira na njihov značaj. Može se reći da uobičajeni pristup izradi fizičkog modela neke projektovane sale i ispitivanja u njemu danas značajno izlazi iz tih okvira, bilo da za to nema dovoljno vremena ili novca.



Slika 4 – Jedan impulsni odziv snimljen 1988 u godine modelu sale Narodnog pozorišta i izračunata kriva porasta nivoa zvuka)

U traganju za rešenjima tog problema, u projektantskoj praksi Laboratorije za akustiku učinjen je pokušaj da se nekako iskoriste kvalitete koje donosi analiza u fizičkom modelu, a da se ipak čitava akcija modelovanja i analize prilagodi realnosti današnjih vremenskih i finansijskih uslova. Iz toga je proizišla ideja da se ispitivanje na fizičkim modelima koristi kao dopunska metoda softverskom modelovanju, a ne za predikciju odziva sale u celini, kao što je to uobičajeno.

Osnova te ideje je da se kao predmet ispitivanja uzimaju samo pojedini detalji enterijera i delovi unutrašnjih površina. Takav pristup može se označiti kao analiza na parcijalnim fizičkim modelima sale. Njihovo korišćenje prvenstveno ima za cilj da se preciznije sagleda priroda difuznih refleksija koje se javljaju na složenim geometrijskim formama enterijera sale. Naime, to uvek predstavlja otvoreno pitanje kada se unose polazni podaci u softverski model neke prostorije, jer teorija ne daje jasne i jednoznačne stavove o tome kako numerički prikazati složene difrakcione pojave na reljefnim površinama u algoritmima za geometrijsku predikciju zvučnog polja. Zadatak koji se postavlja u analizi parcijalnih modela je u stvari prikupljanje ulaznih podataka za kvalitetnije

softversko modelovanje, pa sve to zajedno predstavlja jedan hibridni, fizičko-softverski alat za projektovanje sala. Samo po sebi je jasno da je u takvom pristupu vreme potrebno za pripremu parcijalnih modela značajno kraće od vremena koje je potrebno za izradu odgovarajućeg modela čitave sale. Naravno, i investicija u izradu parcijalnih modela značajno je manja.

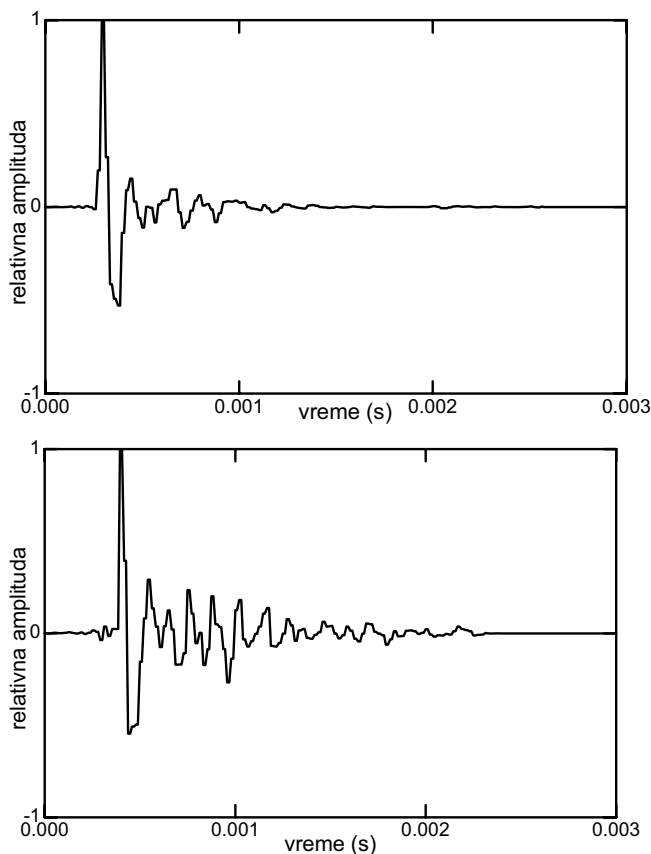
Primer jednog parcijalnog fizičkog modela korišćenog u projektantske svrhe prikazan je na slici 5. To je reljefni detalj plafona i zida dizajniran za salu opere u Mariboru [10,11, 12]. Na slici je prikazana fotografija izvedene sale sa označenim jednim detaljem koji je analiziran, kao i fizički model označenog dela napravljen u razmeri 1:10. U procesu dizajna ove sale struktura na plafonu zamišljena je kao enterijerski element koji treba da ima različito ponašanje u dva ortogonalna pravca nailaska zvučne energije. Za glas pevača koji dolazi sa bine prva refleksija od plafona trebala je da sadrži doziranu difuznu komponentu, a za energiju koja do plafona dospeva kao refleksija od bočnog zida bilo je potrebno napraviti izraženiju difuznu komponentu. Da bi se tokom razrade projekta enterijera optimizirao ovakav pretpostavljeni efekat, neka varijantna rešenja zamišljene reljefne forme testirana su na njihovim parcijalnim fizičkim modelima napravljenim u razmeri 1:10.



Slika 5 – Izgled jedne projektovane sale (opera u Mariboru) sa označenim reljefnim detaljem iz zone spoja zida i plafona (gore) i parcijalni fizički model istog detalja u razmeri 1:10 (dole).

Kao ilustracija onoga što ispitivanje na parcijalnim fizičkim modelima može da pokaže, na slici 6 prikazan je efekat difuznosti jedne od varijanti reljefne strukture sa slike 5. Ispitivanje prirode refleksija vršeno je poređenjem za slučaj potpuno ravnih površina plafona i zida, i sa projektovanim reljefnim formama. Na gornjem dijagramu slike 6 pokazan je snimljen samo direktan zvuk, to jest izgled pobudnog impulsa generisanog varničarem, a na donjem dijagramu prikazan je isti impuls registrovan nakon refleksije od modela površine sa ispitivanom reljefnom formom. Pri tumačenju odziva treba uzeti u obzir da je na prikazanim dijagramima vremenska osa ostala kakva je u smanjenom modelu, a u realnosti bi osa bila razvučena sa faktorom 10.

Sa slike 6 se vidi da je testirana difuzna forma u odzivu površine prouzrokovala razvlačenje reflektovane energije u vremenu. Takva pojava je manifestacija povećavanja ukupnog udela difuzne refleksije od analizirane reljefne površine. U prikazanom primeru projektantska razrada detalja difuzora podrazumevala je variranje njegove forme da bi se dobilo neko procenjeno potrebno razvlačenje impulsa u vremenu. U konkretnom slučaju sale opere u Mariboru ispitivanje na parcijalnim modelima omogućilo je proučavanje i optimizaciju efekta reljefnih formi na plafonu i zidovima u ostvarivanju njihove zamišljene funkcije. Izrada tih modela, što znači testiranje svih analiziranih varijanti, bilo je relativno brzo i efikasno, čime je opravdan koncept parcijalnih fizičkih modela kao pristup u akustičkom dizajnu.



Slika 6 – Rezultat analize doprinosa difuzora na parcijalnom fizičkom modelu: gore - direktan impuls iz varničara, dole – isti impuls reflektovan od modela površine sa difuzorom (oba impulsa su normalizovani; vremenska osa je ostala u razmeri 1:10)

V. FIZIČKI MODELI PROSTORIJA U NASTAVI AKUSTIKE

Usavršavanje laboratorijske opreme i postupaka merenja u fizičkim modelima i akumulirana praktična iskustva stečena u njihovoj primeni na raznim projektima stvorili su uslove da se ova sofisticirana tehnika primeni i u nastavi akustike na Elektrotehničkom fakultetu i u istraživanjima u okviru magistrarskih i doktorskih radova. U tom cilju u laboratoriji je napravljeno nekoliko fizičkih modela karakterističnih prostorija. Pomoću njih su organizovane pokazne vežbe raznih akustičkih fenomena koje čine deo kursa akustike. Modeli su napravljeni od stakla i imaju odgovarajuća pokretna postolja, čime je omogućeno njihovo postavljanje na različitim mestima u laboratoriji, u skladu sa organizacijom studentskih radnih

mesta.

Osnovni fizički model korišćen u nastavi akustike je paralelopipedna prostorija u razmeri 1:10, prikazana na slici 7. Model je napravljen od debelog stakla (10 mm) da bi se u njemu minimizirala osnovna apsorpcija. On je našao svoju primenu za demonstraciju uticaja sopstvenih rezonanci na akustički odziv prostorije. Za to se u model postavlja pokretni mikrofoni koji se može kretati po jednoj od osa prostorije. Beleženjem nivoa registrovanog signala na karakterističnim rezonantnim frekvencijama demonstrira se postojanje stojećih talasa. U njemu se takođe na jednostavan način studentima demonstrira osnovna procedura merenja vremena reverberacije. Prednost pokazivanja na modelu u odnosu na realne prostorije je u tome što se sve eventualne promene u mernoj postavci izvode na jednostavan i brz način.



Slika 7 – Model paralelopipedne prostorije u razmeri 1:10 koji se koristi u nastavi za demonstriranje sopstvenih rezonanci prostorije



Slika 8 – Model reverberacione komore u razmeri 1:10 za merenja koeficijenta apsorpcije materijala koji se koriste za izradu modela

Drugi fizički model koji je našao svoju primenu i u istraživanjima i u nastavi je reverberaciona komora napravljena u razmeri 1:10 (kopirana je standardna reverberaciona prostorija koja se nalazi u Institutu za ispitivanje materijala u Beogradu) [13]. I ovaj model je izrađen od debelog stakla. Model reverberacione komore je prvobitno napravljen kao deo laboratorijskog alata za izradu fizičkih modela. U njemu su vršena merenja koeficijenta apsorpcije raznih materijala koji su odabirani

za primenu u izradi raznih fizičkih modela. Zbog njegove prirode, ovaj model je takođe našao primenu u demonstraciji studentima, pre svega postupka merenja vremena reverberacije.

Najzad, zbog pojednostavlivanja organizacije laboratorijskih vežbi napravljen je fizički model anehoične prostorije koja postoji u Laboratoriji za akustiku. Njena osnovna konstrukcija napravljena je od drveta, a unutrašnja apsorpciona obrada izvedena je s klinastim formama napravljenih od Azmafona. U okviru kursa akustike u modelu anehoične prostorije demonstrira se efekat usmerenosti zvučnog izvora i efekat česljastog (komb) filtra koji nastaje prisustvom neke refleksione ravni.



Slika 9 – Model anehoične prostorije u razmeri 1:10 koji se koristi za demonstracije nekih fenomena u slobodnom prostoru

VI. ZAKLJUČAK

Upotreba fizičkih modela za analizu i predikciju zvučnog polja predstavlja sofisticiranu istraživačku tehnologiju koja je našla primenu i u akustičkom dizajnu prostorija, pre svega koncertnih i operskih sala. Rad sa fizičkim modelima u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu započeo je pre dvadeset godina za potrebe rekonstrukcije sale Narodnog pozorišta. Od tada do danas ova tehnika modelovanja postala je standardna u laboratorijskoj praksi, pa je našla svoje mesto i u nastavi akustike. Izvestan doprinos razvoju ove opšte metode napravljen je uvođenjem takozvanih parcijalnih fizičkih modela. Merenje na njima definisano je kao dopuna postupcima softverskog modelovanja, čime

je u praksu akustičkog dizajna sala uveden hibridni pristup koji kombinuje dobre osobine fizičkih modela i softverske simulacije.

LITERATURA

- [1] M.Mijić, D.Šumarac Pavlović, "Tehnologija akustičkog dizajna prostorija za muzička izvođenja – iskustva Laboratorije za akustiku ETF", L Konferencija za ETRAN, Beograd, 2006, Zbornik radova
- [2] J.H..Rindel, "Modeling in auditorium acoustics – from ripple tank and scale models to computer simulations", Forum Acusticum, Seville 2002, Proceedings CD-ROM, paper KL-04
- [3] L.Beraneck, "Acoustical modeling as a tool in problem solving", JAES, Vol. 17, No 2 (1969) 151-155
- [4] A.Burd, "Acoustic modeling – design tool or research project?", poglavlje u knjizi "Auditorium acoustics", editor R.Mackenzie, Applied Science Publishers (1975)
- [5] F.Fahy, "Foundations of engineering acoustics", Academic press, London, 2001.
- [6] H.Kurtović, M.Mijić, V.Oničin, Z.Perolo "Izveštaj o analizi prostorne akustike sale Narodnog pozorišta u Beogradu uz pomoć fizičkog modela", Laboratorija za akustiku ETF, Beograd, 1988.
- [7] M.Mijić, H.Kurtović, Z.Perolo, V.Oničin, "Model Evaluation in Belgrade National Theatre Reconstruction", XIII ICA Beograd, 1989, Proceedings, Vol. 2, 335-338
- [8] M.Mijić, H.Kurtović, Z.Perolo, V.Oničin, "Ispitivanje osobina adaptirane sale Narodnog pozorišta u Beogradu pomoću fizičkog modela", XXXIII Jugoslovenska konferencija ETAN-a, Novi sad 1989, Zbornik radova, VI.3-10
- [9] M.Mijić, H.Kurtović, Z.Perolo, "Preliminarna merenja u sali Narodnog pozorišta u Beogradu", XXIV Jugoslovenska konferencija ETAN-a, Zagreb 1990, Zbornik radova, V-VI, 9-16
- [10] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Reconstruction of the opera hall in Maribor – case study", International Symposium on Room Acoustics, Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics, Seville, 2007, Proceedings on CD
- [11] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Acoustic redesign of the Opera hall in SNG Maribor" 3rd Congres of the Alps Adria Acoustic Association, Grac, 2007. Proceedings on CD
- [12] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Rekonstrukcija opere u Mariboru – Case study", LI Konferencija za ETRAN, Igalo, 2007, Zbornik radova na CD
- [13] M.Mijić, Z.Perolo, "Design of reverberation chamber scaled model", 14th ICA, Beijing, China, 3-10 septembar 1992, Proceedings, F5-9

ABSTRACT

Scaled models are important tool in research and in acoustic design of the concert and opera halls. In the Acoustics Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering work with scaled models have started 20 years ago, initiated by reconstruction of the National theatre in Belgrade. During these years some innovations in technology of the model use was also involved. Due to such experience, some of the scaled models have found their place in various demonstrations as the tool for course of acoustics.

20 YEARS OF TRADITION IN SCALED MODEL TESTING IN ACOUSTICS LABORATORY, ETF
Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović