

# Analiza upotrebljivosti parcijalnih fizičkih modela u akustičkom dizajnu prostorija

Vojkan Janjić

*Sadržaj* — U ovom radu su razmatrane mogućnosti korišćenja parcijalnih fizičkih modela u akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala. Svrha takvih modela je da se na jednostavan i efikasan način ispita veliki broj varijacija u pogledu upotrebljenih materijala i geometrijskih konfiguracija enterijera. Detaljno su opisani postupci merenja u fizičkim modelima i specifičnosti opreme koja se u takvim okolnostima koristi. Predložene su metode za analizu snimljenih odziva koje bi omogućile brzu i jednostavnu kvantifikaciju doprinosa promena u enterijeru prostorija. Predstavljani su i analizirani rezultati akustičkih merenja sprovedenih na primeru jednog parcijalnog fizičkog modela.

*Gljučne reči* — akustički dizajn prostorija, fizički modeli, merenja na modelima.

## I. UVOD

Danas je na raspolaganju širok izbor tehnika za predikciju zvučnog polja u prostorijama. Počev od merenja na fizičkim modelima, preko jednostavnih predikcija na osnovu empirijskih podataka akumuliranih sistematskim merenjima na postojećim objektima, pa do brojnih komercijalnih softverskih paketa, naročito popularnih u eri ekspanzije i sveopšte prisutnosti računarskih tehnologija.

Analiza impulsnog odziva na fizičkim modelima, iako najstarija, još uvek je i najpouzdanija metoda za predikciju zvučnog polja u prostorijama. Sve relevantne akustičke pojave, dešavaju se u umanjenim kopijama realnih prostorija na potpuno isti način kao i u originalima. Uz preciznu izradu modela, sa najsitnijim detaljima unutrašnje geometrije, moguće je ostvariti visok stepen tačnosti u predikciji akustičkih parametara. Problem je što takva pažljiva izrada modela, naročito u slučaju složenih objekata, iziskuje vremenske rokove i finansijska sredstva u obimu koji u projektantskoj praksi često nije dostupan. Zbog toga upotreba fizičkih modela postepeno ustupa mesto jeftinijim, bržim i efikasnijim metodama, zasnovanim na računarskim simulacijama. Međutim, složenost akustičkih fenomena koji se odigravaju na nekim javnim oblicima geometrije prostorija, još uvek je izvan domašaja uprošćenih algoritama softverskih alata, zasnovanih na zakonima geometrijske akustike. To je značajan nedostatak, naročito kada je reč o najvišim

akustičkim zahtevima koji postoje kod projektovanja sala za muzička izvođenja. Iz tog razloga je doprinos fizičkih modela u akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala i danas nezamenljiv.

Prednosti fizičkog modelovanja mogu se iskoristiti izradom samo određenih segmenata iz unutrašnje površine prostorije. Upotreba takvih parcijalnih fizičkih modela ima za cilj sagledavanje doprinosa pojedinih elemenata enterijera sale [1]. Uz ovakav pristup se, uz smanjene investicije, znatno skraćuje i vremenski rok izrade modela.

U ovom radu su prikazani svi relevantni aspekti primene fizičkog modelovanja u akustičkom projektovanju. Detaljno su opisani postupci merenja na modelima i specifičnosti opreme koja se u te svrhe koristi. Predložene su metode za efikasnu analizu akustičkih odziva u cilju procene doprinosa promena u strukturi unutrašnjih površina prostorije. Na kraju rada je dat konkretan primer upotrebe parcijalnih fizičkih modela u akustičkom dizajnu prostorija, sa namerom da se pokaže da iz takvog pristupa mogu da proisteknu određeni korisni zaključci.

## II. PRIMENA FIZIČKOG MODELOVANJA U AKUSTIČKOM DIZAJNU PROSTORIJA

Pod pojmom fizičkog modela prostorije podrazumeva se umanjena kopija prostorije, sa dimenzijama koje su dobijene jednostavnim deljenjem dimenzija originalnog objekta odgovarajućim faktorom skaliranja. Uz pažljivu izradu modela, vodeći računa o svim geometrijskim detaljima, i uz upotrebu odgovarajućih materijala, tehnika fizičkog modelovanja omogućuje izuzetno preciznu ocenu akustičkih parametara. I pored postojanja velikog broja softverskih alata za predikciju zvučnog polja u prostorijama, rezultati dobijeni korišćenjem fizičkih modela još uvek se smatraju pouzdanijim. To naročito važi za prostorije zahtevnog enterijera, sa velikim brojem nepravilnih površina na kojima dolazi do pojave difrakcije i difuzije zvučnih talasa.

Primena fizičkih modela za analizu akustičkog odziva prostorija predstavlja jednu od najstarijih metoda korišćenih u projektantske i istraživačke svrhe. Prvi eksperiment sa fizičkim modelima datira još iz 1912. godine kada je Sabin koristio ultrazvučne talase na dvodomenzionalnom modelu kako bi ispitao uticaj refleksija od plafona [2]. Kao zajednički problem svih ranih akustičkih modela isprečio se nedostatak adekvatne merne opreme, što je analizu akustičkog odziva ograničivalo na informacije koje su prikupljane običnim posmatranjem. Tek sa razvojem električnih mernih uređaja upotreba fizičkih modela dobija svoj pravi smisao.

Vojkan Janjić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-64-6386155; e-mail: vojkan\_janjić@yahoo.com).

Mentor: prof. dr Miodir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: emijic@etf.bg.ac.yu).

Fizički model prostorije predstavlja kopiju realne prostorije, napravljene tako da su joj linearne dimenzije određene deljenjem originalnih dimenzija faktorom skaliranja  $K$ . U praksi se najčešće koriste modeli sa faktorom skaliranja od 10 do 50 (sa razmerama od 1:10 do 1:50). Korišćenjem razmere 1:10 može se ostvariti veoma precizno modelovanje, do najsitnijih detelja u enterijeru, ali, pored visoke cene i dugačkog vremena izrade, za smeštaj i manipulaciju modela takvih gabarita zahtevaju se laboratorije nestandardnih dimenzija, pa su oni rezervisani samo za najprestižnije projekte. Ovi nedostaci se mogu prevazići korišćenjem modela sa faktorom skaliranja 1:20 ili 1:50, ali uz određene gubitke u tačnosti.

Kako bi se obezbedila invarijantnost akustičkih procesa prema skaliranju fizičkih dimenzija modela, neophodno je izvršiti i skaliranje talasne dužine zvuka faktorom  $1/K$  [3]. To praktično znači povećanje frekvencije zvuka  $K$  puta. Na taj način će odnos fizičkih dimenzija prostorije i talasne dužine zvuka ostati konstantan, pa će se pojave difrakcije i difuzije na modelu odigravati na isti na isti način kao i u realnoj prostoriji. Prema tome, neophodno je zadovoljiti sledeću relaciju:

$$\frac{l_o}{\lambda_o} = \frac{l_M}{\lambda_M} = \frac{l_o/K}{\lambda_o/K} \Rightarrow f_M = K \cdot f_o$$

U gornjoj jednakosti indeks  $O$  označava parametre u originalnoj prostoriji, a  $M$  u modelu.

Vreme koje je potrebno zvuku da pređe određenu razdaljinu u modelu smanjeno je  $K$  puta u odnosu na realnu situaciju, pa je za pravilno tumačenje dobijenih rezultata neophodno ekspanovati vremensku osu za faktor skaliranja  $K$ .

Kao posledica transliranja frekvencijske ose, javlja se problem preterane apsorpcije zvuka na visokim frekvencijama. Najveći deo ove apsorpcije potiče od molekulske apsorpcije koja se može eliminisati isušivanjem vazduha (do 2% relativne vlažnosti) ili korišćenjem azota [4].

Prilikom izbora apsorpcionih materijala koji će biti korišćeni u modelu, treba voditi računa o tome da koeficijenti apsorpcije na skaliranim frekvencijama imaju jednake vrednosti kao koeficijenti apsorpcije materijala realne prostorije na nescaliranim frekvencijama:

$$\alpha_M(f_M) = \alpha_M(K \cdot f) = \alpha(f)$$

Gornju jednakost je u praksi moguće zadovoljiti samo na aproksimativnom nivou, pri čemu stepen aproksimacije zavisi od prirode informacija koje se prikupljaju ispitivanjem na modelu. Ukoliko je od interesa samo inicijalni deo impulsnog odziva (prvih 100 – 200 ms), pokazano je da je dovoljno obezbediti samo dva različita tipa površina: dominantno refleksione i dominantno apsorpcione [5]. Reflektujuće površine je moguće reprodukovati korišćenjem čvrstih i glatkih materijala kao što su lakirano drvo, plastika, gips, staklo i slično. Naročitu pažnju je potrebno posvetiti izboru materijala koji će modelovati uticaj sedišta i publike kao važnih apsorpcionih elemenata u realnim situacijama. Fino podešavanje vremena reverberacije se ostvaruje dodavanjem apsorbujućih materijala sekundarnim površinama koje ne generišu prve refleksije.

Prvi računarski modeli za predikciju zvučnog polja u prostorijama pojavili su se krajem šezdesetih godina 20. veka, ali tek tokom devedesetih, sa pojavom algoritama za akustičku analizu koji su davali dovoljno pouzdane rezultate, uz razumnu brzinu izračunavanja, softverski paketi postaju standardni alat akustičkih konsultanata i istraživača. Dve osnovne metode simulacije zvučnog polja – *ray tracing* i metoda likova – zasnivaju se na zakonima geometrijske akustike, ne uzimajući u obzir neke od fenomena koji potiču od talasne prirode zvuka. To za posledicu ima izvesnu limitiranost u pogledu tačnosti predikcije računarskih modela.

Nedostaci sa kojima se suočavaju računarski modeli teško su prihvatljivi kada je reč o najvišim akustičkim zahtevima koji postoje prilikom projektovanja koncertnih i operских sala. Kod fizičkih modela takvi nedostaci ne postoje; pojave difrakcije i difuzne refleksije odigravaju se na umanjenim modelima na isti način kao i u realnim prostorijama. Problemi koji se javljaju kod fizičkog modelovanja su pre svega praktične prirode i tiču se visoke cene i dugog vremenskog roka izrade modela.

U cilju prevazilaženja nedostataka softverskih alata, uz istovremeno eliminisanje problema vremensko – finansijskih ograničenja koja su karakteristična za fizičke modele, može se u postupku projektovanja koristiti hibridni fizičko – softverski način modelovanja. Ovakva tehnika hibridnog projektovanja podrazumeva izradu parcijalnog fizičkog modela koji sadrži samo određene segmente iz unutrašnje strukture prostorije.

Osnovna ideja je da se difuzne refleksije, koje se dešavaju na složenim geometrijskim formama enterijera, sagledaju na parcijalnom fizičkom modelu, a na taj način prikupljeni podaci koriste prilikom softverskog modelovanja. Uz ovakav pristup se profitira, kako na planu brzine i elegantnosti softverskih alata, tako i na planu kvaliteta i pouzdanosti analize u fizičkim modelima, uz smanjene troškove i vreme izrade modela.

### III. POSTUPAK MERENJA U FIZIČKIM MODELIMA

Za merenje impulsnih odziva u fizičkim modelima, neophodni su: omnidirekcionni zvučni izvor koji generiše kratki zvučni impuls u dovoljno širokom frekvencijskom opsegu, omnidirekcionni prijemni mikrofoni, i računar sa A/D konvertorom za čuvanje i analizu podataka.

Naročito je osetljivo pitanje izbora odgovarajućeg zvučnog izvora. Kako se u radu sa fizičkim modelima vrši skaliranje frekvencijske ose faktorom  $K$ , neophodno je obezbediti dovoljno jaku zvučnu pobudu na frekvencijama koje su  $K$  puta veće od realnih. Kao zvučna pobuda, pri akustičkim merenjima u fizičkim modelima, često se koristi kontrolisani električni varničar. Jedna od njegovih prednosti je relativno mala veličina, što je naročito važno kod modela sa velikim faktorom skaliranja. Takođe, električni varničar je omnidirekcionni izvor i može se konstruisati tako da njegov oblik neme nikakvog uticaja na zvučno polje, bez obzira na razmeru modela [6]. Električni varničar generiše dovoljno jaku pobudu pa je moguće ostvariti dovoljno veliki odnos signal/šum i pored toga što konvencionalni visokofrekvencijski mikrofoni imaju veoma malu osetljivost. Međutim, nedostatak jakih zvučnih pobuda je pojava nelinearnih efekata koji

onemogućavaju pouzdana merenja na kratkim rastojanjima od varničara. Isto tako, kao posledica mikro-klimatskih promena u okolini varničara, javljaju se razlike u nivoima pojedinačnih impulsa. Problem je i to što se električni varničar ne proizvodi komercijalno i ne može se kupiti na tržištu.

Kod impulsnih odziva snimljenih na parcijalnim fizičkim modelima, od interesa je samo početni deo odziva, određen rastojanjima koja pređu direktan zvuk i relevantne refleksije koje se dešavaju na modelu. U opštem slučaju, vremensko trajanje dela impulsnog odziva od značaja zavisi od dimenzija modela i razmatranih pozicija izvora i prijemnika.

Kada je reč o analizi impulsnih odziva snimljenih na parcijalnim fizičkim modelima, postoji potreba za grafičkim prikazom koji bi obezbedio jednostavno sagledavanje uticaja pojedinih reljefnih formi enterijera, pri različitim geometrijskim konfiguracijama. Upravo to omogućuju kumulativne funkcije impulsnih odziva koje pokazuju kolika energija je pristigla u prijemnu tačku u određenom vremenskom intervalu. Normalizacijom kumulativnih funkcija na energiju direktnog zvuka, može se posmatrati odnos energija reflektovanih komponenti pristiglih u prijemnu tačku, za različite geometrijske konfiguracije razmatranog segmenta iz unutrašnje strukture prostorije.

#### IV. PRIMER UPOTREBE PARCIJALNIH FIZIČKIH MODELA

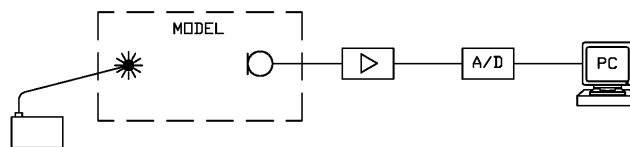
Upotrebljivost parcijalnih fizičkih modela u akustičkom dizajnu prostorija ispitivana je na fizičkom modelu portalnog dela operne sale u Ljubljani. Model je napravljen u razmeri 1:10, za potrebe akustičkog redizajna sale. Sadrži podijum, luk portalnog otvora sa ložama i orkestarsku jamu. Izgled modela prikazan je na slici 1.

Eksperiment je sproveden kako bi se ispitali doprinosi portalnog dela sale u prenosu energije pevačkog glasa prema auditorijumu, pri različitim geometrijskim konfiguracijama loža. Refleksije koje se odigravaju na površinama zidova i plafona luka portalnog otvora imaju izuzetno bitnu ulogu u postizanju balansa između pevača i orkestra. Zbog toga je od velike važnosti utvrditi koja konfiguraciju loža obezbeđuje najveću podršku pevačima.



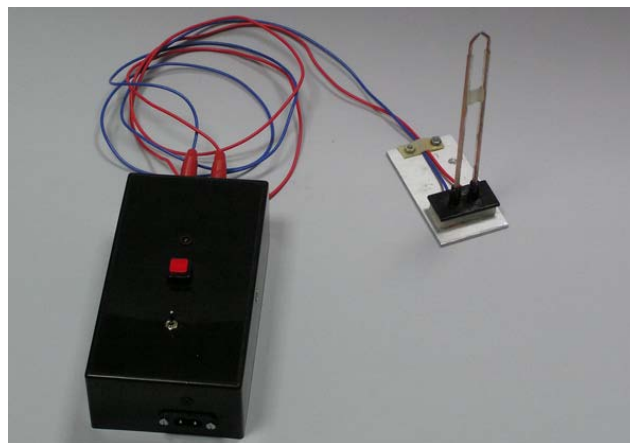
Sl. 1. Fizički model portalnog dela sale opere u Ljubljani sa pozicijama zvučne pobude i prijemnika

Merenja su sprovedena u Laboratoriji za akustiku Elektrotehničkog fakulteta. Pri tome je korišćena namenska oprema, prilagođena merenjima na fizičkim modelima. Šematski prikaz mernog lanca dat je na slici 2.



Sl. 2. Šematski prikaz mernog lanca

Kao zvučna pobuda korišćen je električni varničar, napravljen za potrebe laboratorije. Na slici 2 je prikazana fotografija varničara i njegovog pobudnog generatora. Na prijemnoj strani je korišćen Brüel & Kjør kondenzatorski mikروفon sa kapislom tipa 4136 i predpojačavačem tipa 2619. Mikrofonski pojačavač i napajač je takođe namenski napravljen za potrebe laboratorije. Ulogu A/D konvertora imala je zvučna kartica M-Audio ProFire 610. Snimanje je obavljeno sa frekvencijom odabiranja od 192 kHz, što je nakon konverzije u realni frekvencijski opseg obezbedilo analizu do 9.6 kHz. Na PC računaru, impulsi su snimani pomoću softverskog paketa SoundForge 8.0.



Sl. 3. Varničar i njegov pobudni generator

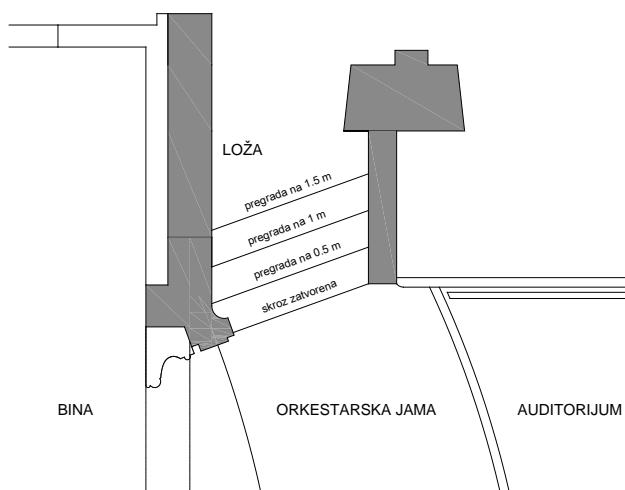
Prilikom snimanja impulsnih odziva, zvučni izvor je bio postavljen u centralnoj osi, 2 m iza ose portalnog otvora, na visini od 1.5 m od bine što odgovara visini glave pevača. Prijemnik je bio postavljen u centralnoj osi, na rastojanju od 3.5 m od orkestarske jame. Pozicije zvučne pobude i prijemnika prikazane su na slici 1.

Impulsi su snimani za pet različitih geometrijskih konfiguracija loža portalnog otvora:

- lože potpuno zatvorene sa svoje prednje strane
- lože zatvorene pregradom na rastojanju od 0.5 m
- lože zatvorene pregradom na rastojanju od 1 m
- lože zatvorene pregradom na rastojanju od 1.5 m
- lože potpuno otvorene

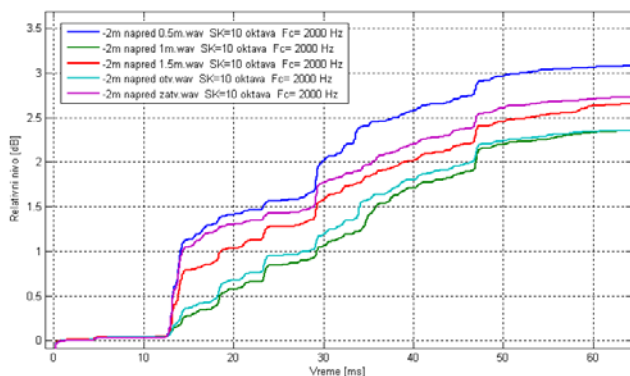
Na slici 4 dat je šematski prikaz razmatranih geometrijskih konfiguracija loža.

Za slučaj ispitivanog modela, imajući u vidu njegove dimenzije i razmatrane pozicije izvora i prijemnika, vremensko trajanje dela impulsnog odziva od značaja reda je 60 ms.



Sl. 4. Geometrijske konfiguracije loža određene pozicijama pregrada u odnosu na otvore loža

Analiza snimljenih odziva izvršena je u MATLAB-u, korišćenjem kumulativnih funkcija. Najpre je obavljeno filtriranje impulsnih odziva oktavnim filtrima sa centralnim frekvencijama od 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz i 4 kHz. Zatim su, za svaku oktavu, određene kumulativne funkcije, normalizovane na energiju direktnog zvuka. Na kraju su vršena poređenja kumulativnih priraraštaja energije, za svaku od pet geometrijskih konfiguracija loža, kako bi se sagledali njihovi doprinosi u energiji koja stiže u prijemnu tačku. Na slici 5 dat je primer kumulativnih funkcija impulsnih odziva snimljenih za svih pet razmatranih konfiguracija loža, u oktavnom opsegu sa centralnom frekvencijom na 2 kHz.

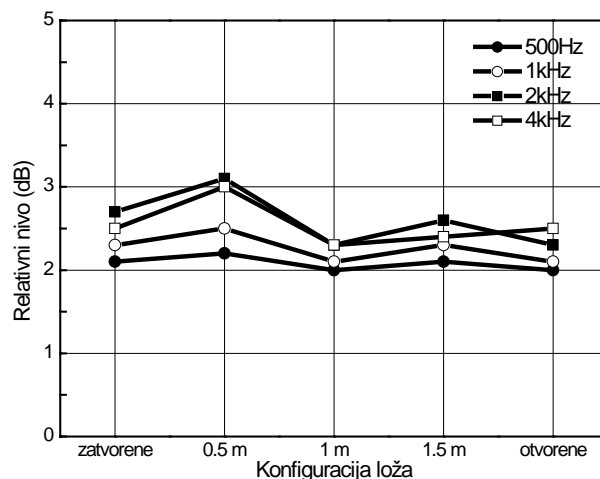


Sl. 5. Kumulativne funkcije impulsnih odziva snimljenih za svih pet konfiguracija loža, u oktavnom opsegu

$$f_c = 2 \text{ kHz}.$$

Rezultati merenja za sve četiri oktave dati su na slici 6. Prikazani su u formi dijagrama, kao relativni nivoi energija reflektovanih komponenti, u funkciji geometrijskih konfiguracija loža.

Na osnovu priloženog grafika može se zaključiti da je najoptimalnija konfiguracija loža sa pregradama na 0.5 m od otvora loža. Energija reflektovanih komponenti tada je najveća. Takođe se primećuje da su dobici u reflektovanoj energiji najveći u oktavnim opsezima na 2 kHz i 4 kHz, upravo tamo gde je pozicioniran pevački formant koji pomaže solistima da se izbore sa snagom orkestra.



Sl. 6. Relativni nivoi energija reflektovanih komponenti u funkciji geometrijskih konfiguracija loža

## V. ZAKLJUČAK

Upotreba parcijalnih fizičkih modela u akustičkom dizajnu prostorija zahteva specifične metode merenja i analize akustičkih odziva. Rezultati istraživanja na parcijalnom fizičkom modelu sale opere u Ljubljani pokazali su da je njihovom primenom moguće izvršiti predikciju akustičkih kvaliteta prostorija na brz i ekonomičan način.

## LITERATURA

- [1] M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, "20 godina tradicije u upotrebi fizičkih modela u akustičkom projektovanju i istraživanju u Laboratoriji za akustiku ETF", TELFOR, 2007.
- [2] J. H. Rindel, "Modeling in auditorium acoustics – from ripple tank and scale models to computer simulations", Forum Acusticum, Seville, 16-20 september 2002, Proceedings, paper KL-04.
- [3] C. D. Mathers, "Acoustic Scaling: a review of progress to date, and of possible future development", BBC Research Department, 1981.
- [4] M. Schroeder, "Springer Handbook of Acoustics", Springer Science+Business Media, LLC New York, Jun 2007.
- [5] H. Kuttruff, "Room Acoustics", fourth edition, Spon Press, 2000.
- [6] C. C. J. M. Hak, K. B. A. Bijsterbosch, "Room Acoustic Scale Model Measurements using a "Spark Train"", NAG/DAGA, Rotterdam, 2009.

## ABSTRACT

This paper deals with the possibilities of using partial scale models for the acoustic design of concert and opera halls. The purpose of such models is to efficiently examine a great number of variations in terms of construction materials and geometrical configurations of the interior surfaces. Detailed description is given of the measuring procedure and the customized equipment necessary to carry out measurements. Solutions are suggested of the acoustic response analysis method that would enable a quick evaluation of the contributions made by interior changes. Results of the acoustic measurements conducted in one of the partial scale models are presented and analyzed.

## ANALYZING THE USABILITY OF PARTIAL SCALE MODELS IN THE ACOUSTIC DESIGN OF ROOMS

Vojkan Janjić