

Beogradska škola akustičkog dizajna – teorija i praksa projektovanja sala

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić

Apstrakt — Projektovanje sala je zadatak pozicioniran između nauke, inženjerstva, psihološke akustike i umetnosti, pa je kao takav nesumnjivo najsloženija inženjerska tema u akustici. U praksi je to vrlo disperzivan zadatak, jer postoje različite vrste sala sa različitim početnim zahtevima u domenu akustike: u koncertnim salama treba zadovoljiti zahteve estetike zvučne slike, u pozorišnim salama zahtev je dobra razumljivost govora sa bine, u domovima kulture traži se sve to zajedno, samo uz prihvatljive kompromise, u veoma velikim prostorima moraju se redefinisati poznati teorijski modeli, a na sve to postoji uticaj trendova moderne arhitekture koji zahtevaju otklon od klasičnih, proverenih akustičkih rešenja. Zbog toga je svaki od preko 40 projekata raznih sala koje je uradio tim okupljen oko Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu bio drugačiji zadatak. U nekim slučajevima to je zahtevalo istraživanje, nekada izradu pomoćnog mernog hardvera ili softvera, a nekada je to bio teorijski izazov koji je rešavan van školski poznate teorije. Kroz sve to se još provlače i potencijalni nesporazumi i sukobi sa arhitektama, jer su oni odgovorni za konačnu estetiku projektovanog prostora. Decenije projektantske prakse i veliki broj realizovanih sala neminovno su povratno uticali na razvoj teorije i inženjerskih veština u oblast akustičkog dizajna, pa je ta oblast vremenom našla svoje mesto u istraživanjima na doktorskim studijama, ali i u nastavi na osnovnim studijama kroz predmete iz oblasti akustike. U ovom radu su kroz prikaz rešenja u raznim projektovanim salama ilustrovani zanimljivi aspekti i izazovi akustičkog dizajna i rezultati koji su postignuti.

Glavne reči — akustički dizajn, fizički modeli prostorija, koncertna sala, pozorišna sala, ray-tracing, softversko modelovanje sala, sportska hala

I. UVOD

Projektovanje sala je zadatak pozicioniran između nauke o zvučnom polju u prostorijama, inženjerstva, psihološke akustike, arhitekture, građevine i umetnosti, pa je kao takav nesumnjivo najsloženija multidisciplinarna inženjerska tema u akustici. U svojoj suštini projektovanje sala je zadatak baziran na poznatoj teoriji zvučnog polja u zatvorenim prostorima. Međutim, kompleksnost polja u tako specifičnim prostorijama kao što su sale i činjenica da je krajnji ocenjivač čovekovo čulo sluha nametnuli su kompleksne kriterijume koji uvek iznova zahtevaju malo istraživanje, traganje po literaturi, inženjersko snalaženje radi prilagođavanja realnostima, ponekad i neki laboratorijski eksperiment. Ali taj

Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs),

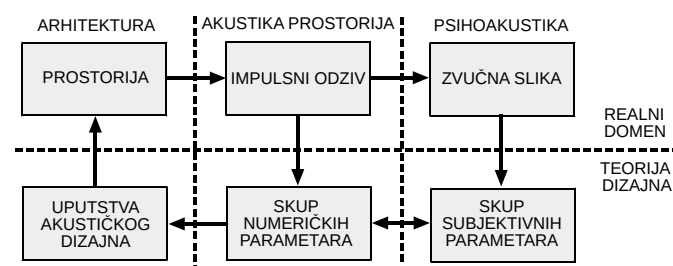
Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, (e-mail: emijic@etf.rs)

zadatak nadasve zahteva elastičnost u razmišljanjima, jer je projektovanje sala zajednički posao akustičkog konsultanta, koji je odgovoran za zvučnu sliku u sali, i arhitekta koji je u toj saradnji odgovoran za estetiku enterijera, a neumitni sagovornici su još i projektanti sistema za ventilaciju i klimatizaciju, projektanti požarne zaštite, scenske rasvete i mehanike, i još mnogi drugi koji u istom prostoru moraju zadovoljiti neke svoje zahteve.

Treba znati da pojam „sala“ nije jedinstven. To mogu biti prostori sa vrlo različitim akustičkim zahtevima. U koncertnim salama treba zadovoljiti najviše zahteve estetike zvučne slike koju dobija slušalac, u pozorišnim salama zahtev je dobra razumljivost govora sa bine i kvalitet zvuka reprodukovano preko sistema za ozvučavanje, u domovima kulture traži se sve to zajedno, ali uz nužne kompromise nametnute sa raznih strana, bioskopske sale moraju biti što više anechočne, a ogromni prostori kao što su sportske hale nameću prilagođavanje poznatih teorijskih modela jer zvučno polje u njima pokazuje specifičnosti koje izlaze iz okvira školske teorije. Zajedničko za sve vrste sala je da rad na njihovom akustičkom dizajnu počinje sa dva osnovna pitanja:

- kako se opisuje zvučna slika koju treba da dobije slušalac,
- kakvim se fizičkim atributima prostora postiže ta slika.

U traganju za pravim odgovorima na ova pitanja u proteklih tridesetak godina pokrenuta su brojna istraživanja, i shodno tome, postoji obimna literatura. Zanimljiv rezime toga je iskazan blok šemom koju je napravio Gade [1], i koja je prikazana na slici 1. Ona objašnjava odnos između realnog sveta, a to su sala kao fizički prostor, zvučno polje u njoj i zvučna slika koju u svojoj svesti dobija slušalac, i preslikavanja svega toga u svet teorije koja sve to tumači i na kojoj se zasniva proces akustičkog dizajna.



Sl. 1. Jedan mogući opis relacije između realnog, fizičkog sveta i stvorenog paralelnog sveta teorije u kojoj se dešava akustički dizajn sala [6].

Kao i u svim drugim prostorijama, odziv sale na zvučnu pobudu opisuje se impulsnim odzivom $h(t)$, monauralnim i binauralnim. Impulsni odziv se može snimiti u postojećim prostorijama, izračunati u fazi projektovanja nekom od metoda simulacije zvučnog polja ili snimiti u napravljenom fizičkom modelu prostorije. Istraživanja u oblasti

psihoakustike definisala su psihološki prostor u kome se prepoznaje skup različitih dimenzija kvaliteta onog što se čuje u sali. One nastaju preslikavanjem određenih fizičkih dimenzija zvučne pobude. Drugim rečima, struktura impulsnog odziva je na neki način korelisana sa dimenzijama zvučne slike u prostoru doživljaja zvuka.

Najsloženiji zadatak u oblasti akustičkog dizajna je projektovanje koncertnih i operskih sala. Cilj koji treba postići u njima je estetika zvučne slike koju dobija slušalac. Jasno je da to nije pojam koji se može egzaktno vrednovati nekim numeričkim parametrima. Kroz intenzivna istraživanja neki estetski pojmovi iz tog domena su vremenom standardizovani [2-8]. Ipak, zahtev da se vrednuje estetika onog što se čuje čini da pristup dizajnu ne može biti isključivo inženjerski. Najbolja ilustracija toga je činjenica da u literaturi postoji izvesna disperzija mišljenja o značaju različitih subjektivnih dimenzija zvučne slike i, shodno tome, o prioritetim fizičkim atributima sale. Da bi se to razumelo, neophodno je proniknuti u neinženjerske posledice fizičkih intervencija u sali.

Neposredna realizacija akustičkog dizajna neke sale svodi se na osmišljavanje njenih fizičkih atributa tako da impulsni odziv dobije strukturu koja daje optimalne vrednosti numeričkih derivata, ali atributa koji su u skladu sa zahtevima estetike. U rešavanju tog zadatka postoji više stepena slobode, jer se slične vrednosti numeričkih parametara mogu dobiti s različitim fizičkim karakteristikama prostora. Promenljive veličine s kojim se barata u dizajnu su dimenzije sale, njen oblik, materijalizacija unutrašnjih površina, veličina auditorijuma, to jest površine pod sedištim (u koncertnim salama i pod orkestrom), reljefnost unutrašnjih površina, itd. Ukratko, postoji dovoljno prostora da se u svakom konkretnom zadatku akustičkog dizajna pokaže invencija i kreativnost.

U ovom radu je prikazan proces razvoja teorije i prakse akustičkog dizajna sala kojim se tokom proteklih tridesetak godina bavila grupa nastavnika, saradnika i studenata okupljenih oko Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. Ishodi tog procesa materijalizovani su kroz projekte preko četrdeset sala raznih veličina i namena. Integralni deo tog procesa bio je istraživački rad koji se odvijao paralelno sa projektovanjem, i čiji su rezultati publikovani u većem broju radova u časopisima i na konferencijama, na predavanjima po pozivu, kroz nekoliko doktora. Najznačajnije reference navedene su na kraju. Istraživanje i projektovanje bili su dve strane istog procesa. Mnoge istraživačke teme su proizašle iz projektantskih nedoumica. Najzad, sva saznanja do kojih se dolazilo u tom kompleksnom procesu preslikavana su u fakultetsku nastavu na svim nivoima studija.

Rad sadrži sažet prikaz tog dugačkog procesa čiji je rezultat danas prepoznat u arhitektonskom svetu kao „Beogradska škola akustičkog dizajna sala“. Ona se formirala kroz saradnju laboratorijskog tima sa brojnim arhitektama i arhitektonskim biroima iz Srbije, Slovenije, Makedonije, Crne gore, Kanade, Rusije. Svako od njih je kroz kreativnu saradnju sa akustičkim timom na neki način doprineo razvoju ideja i metodologije akustičkog dizajna sala, ideja za pokretanje istraživanja. Svi oni su na taj način ugrađeni u beogradsku školu akustičkog dizajna sala kakva je danas.

II. POČECI RADA NA AKUSTIČKOM DIZAJNU SALA U LABORATORIJU ZA AKUSTIKU ETF

Prvi nagoveštaj nastanka beogradske škole akustičkog dizajna sala vezuju se za ime profesora Husnije Kurtovića. On je na Elektrotehničkom fakultetu počeo da radi kao asistent 1951. godine, a već šezdesetih godina počinje povremeno da se bavi akustičkim dizajnom i redizajnom nekih sala po Jugoslaviji. Taj njegov rad ostavio je traga u dva domena. Prvi je domen projektovanja, jer je među onima koji projektuju i grade kuće promovisao do tada uglavnom nepoznatu oblast akustike. Bio je to pionirski period u kome je akustika lagano dobijala svoje mesto u inženjerskom svetu. Drugi domen je bio u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu, jer je na tada postojećim postdiplomskim studijama svoja projektantska iskustva ugradio u nastavu iz oblasti akustike prostorija. Kroz takvu školu je prošla sledeća generacija akustičara.

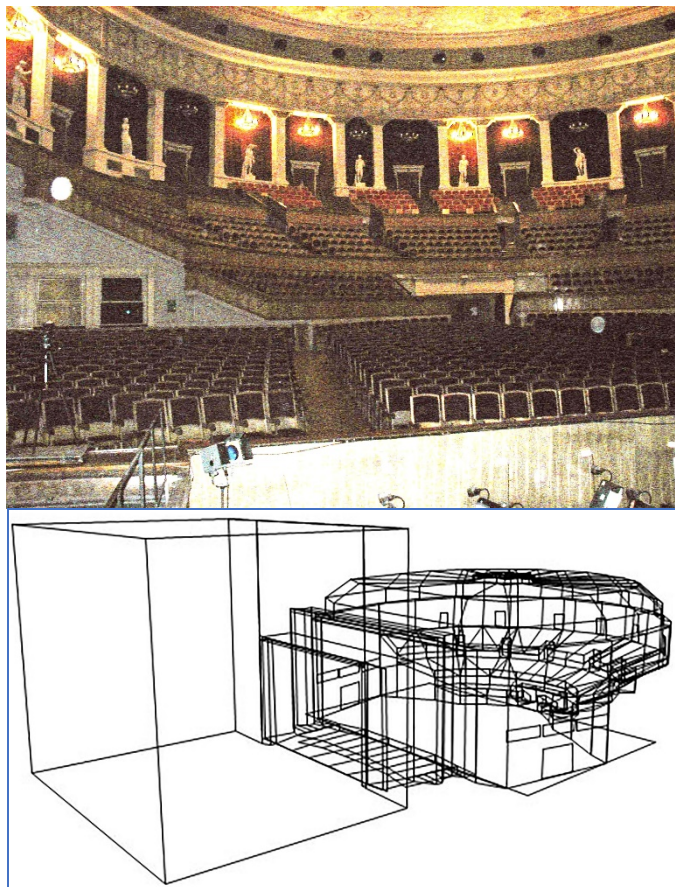
Razvoj tehnologije učinio je da su pred kraj dvadesetog veka računari uneli radikalne promene u oblasti matematičkog modelovanja i merenja zvučnog polja u prostorijama, jer su omogućili uvid u unutrašnju strukturu impulsnog odziva, modelovanog i realnog. Tako su u jednoj relativno staroj nauci kakva je akustika prostorija, ustanovljenoj pre više od jednog veka, gotovo sva relevantna znanja primenjiva u akustičkom dizajnu sala formirana u ne više od tridesetak poslednjih godina. S toga se može reći da je teorija akustike prostorija na kojoj se zasniva akustički dizajn sala relativno mlada oblast akustike.

Sticajem okolnosti, grupa okupljena oko Laboratorije za akustiku ETF aktivno je pratila taj razvoj, pa u izvesnoj meri i dala svoj doprinos. U to vreme su u laboratoriji započela teorijska istraživanja u oblasti numeričkog modelovanja zvučnog polja [9-12] i analize strukture impulsnog odziva u prostorijama [13,14]. Vremenom su pokrenuta šira istraživanja iz oblasti akustike prostorija, a neki od publikovanih radova iz te oblasti navedeni su u literaturi [15-28]. Pokazalo se kasnije da je to, zajedno sa nekim srećnim okolnostima, bio temelj onoga što danas nazivamo beogradska škola akustičkog dizajna sala. Saradnja sa brojnim arhitektonskim biroima i građevinskim kućama omogućila je da grupa stručnjaka u Laboratoriji stekne iskustvo u projektovanju sala izgrađenih u raznim državama, kao i kroz teorijske analize sprovedene za potrebe konkursnih radova arhitektonskih takmičenja. Rad na projektima generisao je nove ideje za istraživanja, pa je istraživački i projektantski rad postao jedinstvena profesionalna preokupacija svih angažovanih u Laboratoriji.

III. POČETAK PRIMENE SOFTVERSKOG MODELOVANJA U PROCESU PROJEKTOVANJA

Jedna od prekretnica u radu Laboratorije bilo je danas pomalo zaboravljeno angažovanje na akustičkom redizajnu sale Novosibirskog državnog akademskog teatra, opere i baleta (NGATOiB) u Rusiji 2002. godine. Rekonstrukcija objekta po tadašnjem projektu nikad nije izvedena, ali je učešće u tome bilo od sudbinskog značaja. U to vreme pojavljuju se na tržištu manje ili više kompleksni softverski alati za modelovanje zvučnog polja u prostorijama, što je nagovestilo bitnu promenu karaktera rada na akustičkom dizajnu. Sagledavajući to, zarada od angažovanja na projektu

sale NGATOiB bila je usmerena na kupovinu softvera ODEON, u tom trenutku, a i kasnije, najboljeg alata za modelovanje zvučnog polja u prostorijama [29]. Od značaja je bilo što je u Laboratoriji već postojalo izvesno iskustvo stečeno u razvoju algoritama za modelovanje zvučnog polja [7-10], kao i u radu sa nekim komercijalnim programima, primarno namenjenim dizajnu sistema za ozvučavanje.



Sl. 2. Izgled sale Novosibirskog državnog akademskog teatra, opere i baleta (NGATOiB) za čiji je redizajn prvi put primenjeno u Laboratoriji numeričko modelovanje zvučnog polja pomoću softvera ODEON (gore); model te sale iz 2002. godine bio je prvi takav poduhvat u Laboratoriji (dole).

Izgled sale NGATOiB u tada zatečenom stanju prikazan je na slici 1. Za rešavanje njenog akustičkog redizajna napravljen je softverski model prikazan na slici 2. Bio je to prvi ikada napravljen model sa takvim sofisticiranim alatom. Pokazalo se da su ta nabavka softvera pre dvadeset godina i kasnije učenje kroz rad s njim ostavili traga u tri domena. Prvo, model sa slike 2 prvi je pokušaj kod nas da se savremenim, sofisticiranim softverskim alatom izračunavaju akustički parametri sale i tako usmerava rad na njenom dizajnu. Drugo, merenja i uporedno modelovanje omogućili su edukaciju i dublje razumevanje onoga što se dešava u prostorijama, s jedne strane, i delikatnosti upotrebe matematičkog modelovanja zvučnog polja kao slike realnog fizičkog sveta sa druge. Treće, raspolaganje sa takvim softverom omogućilo je da se učini značajan pomak u nastavi iz oblasti akustike prostorija. I danas studenti master studija prolaze kroz obuku za rad sa softverom ODEON. On je iskorišćen u istraživanjima za nekoliko doktorskih radova iz oblasti analize zvučnog polja u prostorijama [30,31]. Tada

započet proces bavljenja svim aspektima softverskog modelovanja doveo je nakon dvadesetak godina do sopstvene verzije algoritama za modelovanje zvučnog polja i predikciju signala impulsnog odziva u prostorijama [15,16,17].

IV. UVOĐENJE ANALIZE NA FIZIČKIM MODELIMA U PROCES PROJEKTOVANJA

Primena fizičkih modela za predikciju akustičkog odziva prostorija stara je praksa opisana u literaturi. Međutim, merne procedure u fizičkim modelima vrlo su specifične, sasvim nestandardne i umnogome delikatne, što je uslovljeno smanjenim geometrijskim dimenzijama takvog prostora i adekvatnim transliranjem frekvencijskog opsega naviše. Zauzvrat, merenje u fizičkim modelima prostorija može pružiti informacija o ponašanju zvučnog polja u okolnostima koje poznati matematički modeli „ne vide“. U fizičkom modelu može se detaljnije videti uticaj raznih kompleksnih reljefnih formi, što se u softverskom modelovanju prostora predstavlja samo globalno prilagođavanjem vrednosti koeficijenta raspršavanja površina.

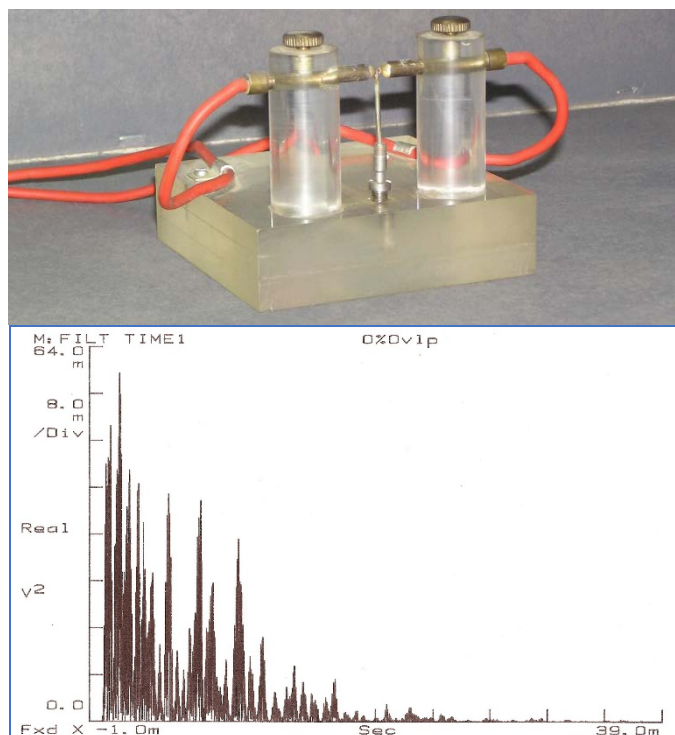
Sticaj nekih okolnosti je učinio da se još davne 1988. godine u Laboratoriji pokrene ideja o primeni fizičkih modela u praksi, jer je tada bila u toku rekonstrukcija sale Narodnog pozorišta u Beogradu. Zahvaljujući pokazanom interesovanju investitora napravljen je u Laboratoriji fizički model te sale u razmeri 1:10 [32,33]. Fotografija modela prikazana je na slici 3. Koliko je poznato, bio je to prvi takav poduhvat u ovom delu Evrope. Nažalost, taj model nije sačuvan jer mu je stalni nedostatak laboratorijskog prostora u jednom trenutku „presudio“. Sačuvani su samo neki njegovi fragmenti, i naravno fotografije.



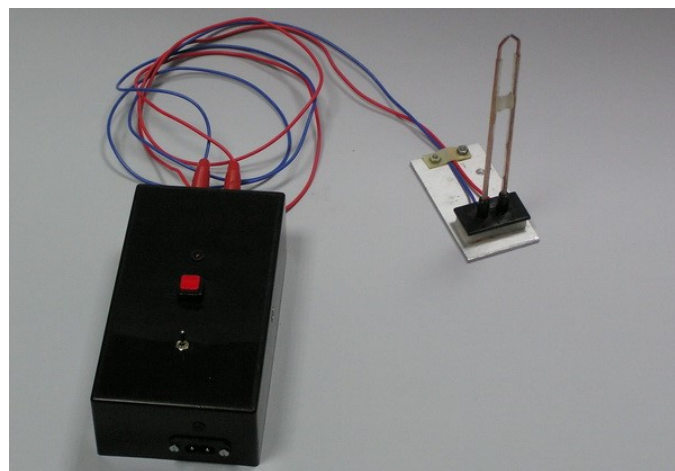
Sl. 3. Fizički model sale Narodnog pozorišta u Beogradu u razmeri 1:10, napravljen u Laboratoriji za akustiku 1988. godine. [6].

Merenje na fizičkim modelima u akustici podrazumeva rad u frekvencijskom opsegu koji je transliran naviše onoliko puta koliko je smanjen model u odnosu na realnost. U Laboratoriji za akustiku korišćeni su isključivo modeli u razmeri 1:10, jer je sa povišenjem frekvencije za deset puta i dalje prihvatljiv uticaj povećane disipacije u vazduhu i ne zahteva se podešavanja atmosfere u modelu. Istovremeno, deset puta više frekvencije su i dalje u opsegu rada standardnih mernih mikrofona i opreme za akviziciju signala. Jedini problem koji se postavlja u praksi je zvučna pobuda koja treba da ima spektralni sadržaj preko 40 kHz (što je u realnosti 4 kHz).

Bilo je potrebno realizovati takav jedan uređaj jer se ne može nabaviti na tržištu.



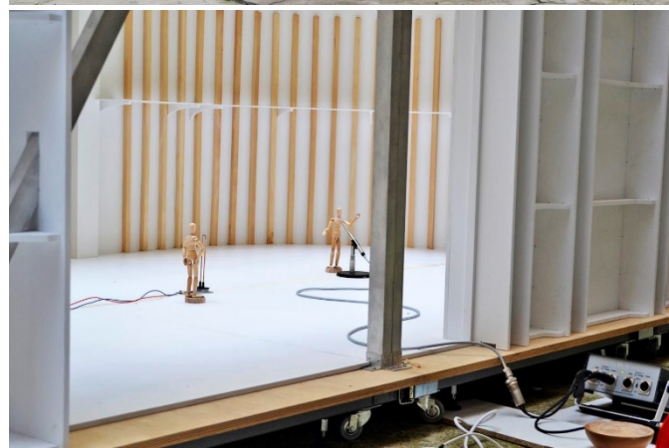
Sl. 4. Prvi varničar u laboratoriji napravljen 1988. godine za merenja u fizičkom modelu sale Narodnog pozorišta (gore), jedan od prvih impulsnih odziva snimljenih u fizičkom modelu sale Narodnog pozorišta (dole).



Sl. 5. Izgled varničara sa pobudnim generatorom napravljen u Laboratoriji koji se i danas koristi za analizu u fizičkim modelima; u kutiji se nalazi generator varnice sa dugmetom za startovanje, a sam varničar je dimenzionisan tako da se varnica javlja približno na visini koja odgovara poziciji usta govornika ili pevača kada stoji, skaliranoj u razmeri 1:10.

Od samog početka rada sa fizičkim modelima pažnja je usmerena ka električnim varničarima kao izvorima impulsne zvučne pobude. Oni po svojim principima imaju potencijal da generišu impuls čiji je spektralni sadržaj dovoljno širok, što se postiže kontrolom energije varnice [35]. Prvi varničar u Laboratoriji napravljen je upravo za ispitivanja na modelu sale Narodnog pozorišta. Njegov izgled je prikazan na slici 4. Uz njega je napravljen i odgovarajući pobudni generator. Na istoj slici je prikazan i jedan impulsni odziv zabeležen u modelu pri pobudi tim varničarom. Prepoznaje se struktura ranih

refleksija u zadatoj konfiguraciji prostora. Ispitivanje u modelu sale Narodnog pozorišta sprovedeno u vreme kada računari nisu bili standardni deo opreme u akustičkim merenjima, pa je registrovanje signala impulsnih odziva rešavano tada dostupnim memorijskim osciloskopom. Kasnije je za potrebe analize na fizičkim modelima sala realizovano nekoliko varničara sa odgovarajućim generatorima koji mogu kontrolisano da generišu varnicu. Jedan od njih, koji je i danas u upotrebi u laboratoriji prikazan je na slici 5 [30].



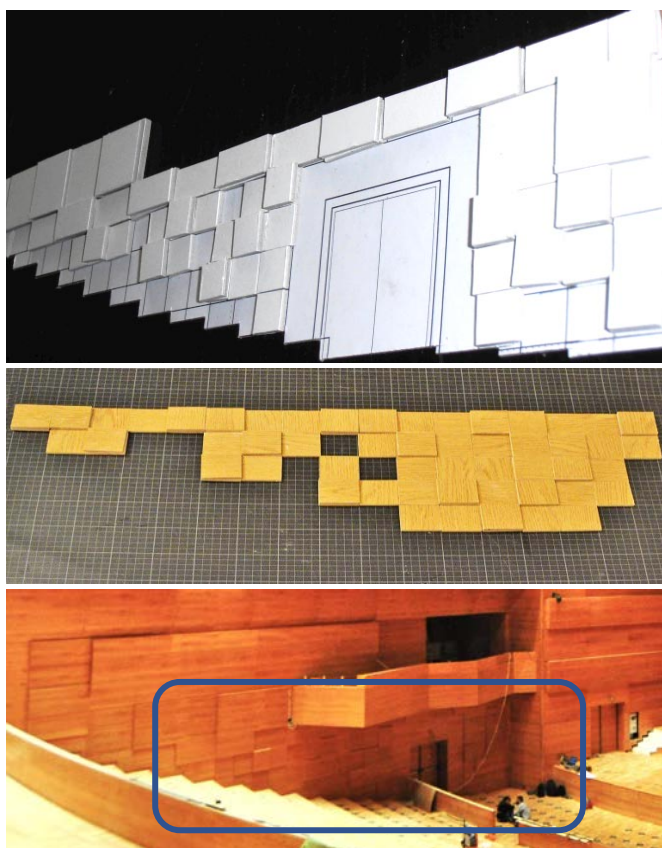
Sl. 6. Spojni izgled fizičkog modela sale Narodnog pozorišta u Subotici, razmera 1:10, (gore) i detalj sa merenja odziva (dole); figure ljudi su stavljene samo radi fotografisanja i nisu deo procedure merenja. [6].

Izrada fizičkog modela kompletne sale u Laboratoriji do sada se dogodila samo još jedanput, za potrebe projektovanja velike pozorišne sale u zgradi Narodnog pozorišta u Subotici. Taj prostor ima specifičan arhitektonski koncept u kome se zahteva beton kao završna obrada svih publici vidljivih zidova u sali. To je isključilo mogućnosti da se u vidljivim zonama primeni bilo kakav apsorpcioni materijal, što znači da se akustički dizajn nije mogao zasnivati na ustaljenim formama materijalizacije enterijera pozorišnih sala. Srećom, proces projektovanja i izgradnje objekta tog pozorišta trajao je dovoljno dugo, a kritičnost usvojenog arhitektonskog koncepta prepoznata je kod svih relevantnih učesnika u tom procesu. Da bi se našla moguća rešenja enterijera bez odstupanja od prvobitnog arhitektonskog koncepta prihvaćena je izrada modela i dobijeno je neophodno vreme za taj proces.

Izgled realizovanog fizičkog modela velike sale Narodnog pozorišta u Subotici prikazan je na slici 6. Sa slike se mogu oceniti njegovi gabariti. Na istoj slici je prikazan detalj sa snimanja impulsnih odziva. Slika pokazuje prizor sa testiranja predloženog reljefa u donjoj zoni zidova. Iako je akcija izrade ovog modela bila vrlo zahtevna, od projektovanja do njegovog transporta i smeštaja, dobitak za akustički dizajn je bio značajan. Kroz analize raznih varijanti intervencija u prostoru došlo se do optimalnog rešenja prihvatljivog za estetski koncept prostora, a bez primene apsorpcionih materijala.

V. FIZIČKI MODELI DELOVA ENTERIJERA SALE – KONCEPT PARCIJALNIH MODELA

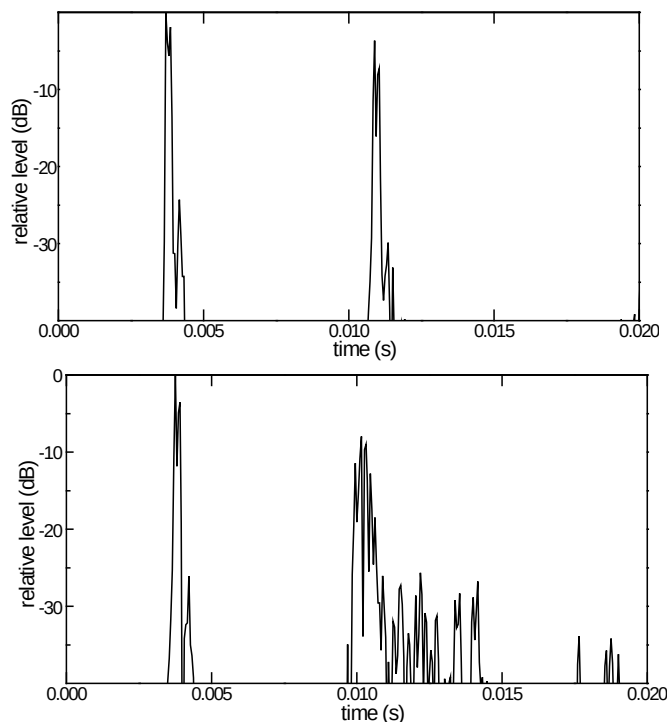
Težnju da se u akustičkom dizajnu sale koristi fizički model za predikciju odziva u Srbiji uvek prate sa dva immanentna problema. Prvi je suviše kratko vreme ostavljeno za realizaciju projekta, u kome je nemoguće napraviti fizički model sale i u njemu obaviti svrsishodne analize. Izrada modela je proces koji zahteva vreme da bi se osmislio, a onda i napravio na adekvatan način. Drugi problem je u nedovoljnim finansijskim sredstvima koja se odvajaju za projektovanje, jer se u projektantsku cenu prihvatljivu za investitore ne uklapa takav trošak. Izrada fizičkog modela sale je skupa i načelno prevazilazi uobičajene cene rada akustičkih konsultanata. Zato po pravilu nema prostora za finansiranje izrade modela koji bi pomogao u akustičkom dizajnu.



Sl. 7. Deo bočnog zida sale Filharmonije u Skoplju koji je u fazi rada na dizajnu ispitivan na parcijalnom fizičkom modelu: prikaz iz arhitektonskog projekta (gore), fizički model predloženog reljefa napravljen u razmeri 1:10 na kome je u laboratoriji izvršena analiza raspršavanja zvuka (u sredini), fotografija dela bočnog zida u sali gde se ispitivani segment nalazi [6]

Nažalost, iz ranije pomenutih razloga realne okolnosti u projektovanju po pravilu ne pružaju mogućnost primene fizičkih modela i pored svih njihovih prednosti. Zbog toga je u Laboratoriji osmišljen originalni pristup koji je označen kao primena „parcijalnih modela“. Pod tim se podrazumeva izrada modela karakterističnih delova površina i analiza procesa refleksije na njima. Izrada takvih modela, značajno manjih od modela čitave sale zahtevaju manje vreme za izradu i, naravno, manja finansijska sredstva. U nekim slučajevima parcijalni model nekih delova površina može se improvizovati priručnim materijalom iz laboratorije. Rezultati analize refleksija na njima može korisno poslužiti za usmeravanje dizajna.

Smisao primene parcijalnog fizičkog modela ilustrovan je na primeru sale Filharmonije u Skoplju. Rad na tom projektu trajao je nekoliko godina, a otvorena je 2017. godine. Za analizu ponašanja predloženog reljefa na zidu sale napravljen je parcijalni model. Zona u kojoj se nalazi reljef i njegov model napravljen u laboratoriji u razmeri 1:10 prikazani su na slici 7. Na slici 8 prikazan je jedan snimljeni impulsni odziv takve površine. Vidljiv je efekat izvesnog raspršavanja zvučne energije koja se javlja pri refleksiji, što je bila pretpostavka pri uvođenju ovog detalja na zid sale.



Sl. 8. Ilustracija primene parcijalnog fizičkog modela na primeru impulsnog odziva snimljenog na modelu sa slike 8: refleksija od ravne tvrde površine bez reljefa (gore) i od površine sa predloženim reljefom (dole); vidi se da reljef doprinosi raspršavanju zvučne energije, što je u ovom slučaju bio cilj dizajna.

Najinteresantniji primer primene parcijalnih modela u projektovanju u istoriji Laboratorije bio je prilikom rada na akustičkom redizajnu istorijske sale opere u Ljubljani 2009. godine. Fotografija te sale prikazana je na slici 9. Kao i mnoge slične sale u regionu, i ona je izgrađena u 19. veku i pod zaštitom je kao kulturno nasleđe. Uprava opere je zahtevala da se prilikom rekonstrukcije i dogradnje zgrade

učini nešto što će popraviti akustičke karakteristike sale na koje su postojale razne primedbe pevača i publike. Bilo kakve izmene u istorijskoj sali koja je pod zaštitom vrlo su ograničene. S druge strane, pouzdanost analize na softverskom modelu je upitna zbog nejasnih principa na kojima bi se zasnivalo numeričko predstavljanje složenih struktura i bogatog reljefa vidljivog na slici i modelovanje njegovog uticaja na zvučno polje.



Sl. 9. Istorijska sala opere u Ljubljani koja je bila predmet akustičkog redizajna 2009-2010. godine u saradnji sa biroom „Arhe“, Ljubljana (fotografija napravljena nakon rekonstrukcije); u procesu projektovanja realizovana su dva parcijalna modela njenih akustički značajnih delova.

U ovakvim specifičnim slučajevima akustičkog dizajna ne postoji neka kapitalna promena koju je moguće uvesti i rešiti stvar. Zanimljivo je da pre angažovanja stručnog tima Laboratorije za akustiku bilo nekoliko akustičkih konsultanata iz Evrope koji su kao jedini način za popravljjanje sale videli kapitalne građevinske izmene. Potrebno je mnoštvo manjih ili malo većih intervencija od kojih neke mogu biti neprimetne publici, a koje kumulativno donose akustički boljitak. U tom smislu je na samom početku rada na projektu fokus usmeren na lože kao prostor za promene, a posebno na proscenijumske lože neposredno oko otvora bine. Tim Laboratorije je preuzeo odgovornost za ishod projekta, a svi predlzi promena su odobreni u nadležnom zavodu za zaštitu kulturnog nasleđa.

Za pouzdanije odlučivanje o promenama napravljena su dva parcijalna modela, takođe u razmeri 1:10. Oni su prikazani na slici 10. Jedan model predstavlja portal sale sa portalnim ložama, a drugi je jedan segment loža sa bočne strane sale. U portalnom delu analiziran je uticaj loža na energiju ranih refleksija koje može da generiše samo taj deo sale. Napravljena je mogućnost promene njihove dubine, čak potpunog zatvaranja. Model segmenta loža iz sale napravljen je tako da im se može menjati dubina i konfiguracija pregrada između njih. Finalne odluke koje su ušle u projekat donete su na osnovu merenja na ovim modelima. Oba modela su sačuvana u Laboratoriji kao dekoracija, sa mogućnošću da se u budućnosti koriste u istraživačke svrhe.

VI. RAZVOJ IDEJE O GEOMETRIJI PROSTORA KAO ALATU AKUSTIČKOG DIZAJNA

Reljefne površine su važan alat za podešavanje strukture impulsnog odziva svake sale, a najveći značaj imaju u

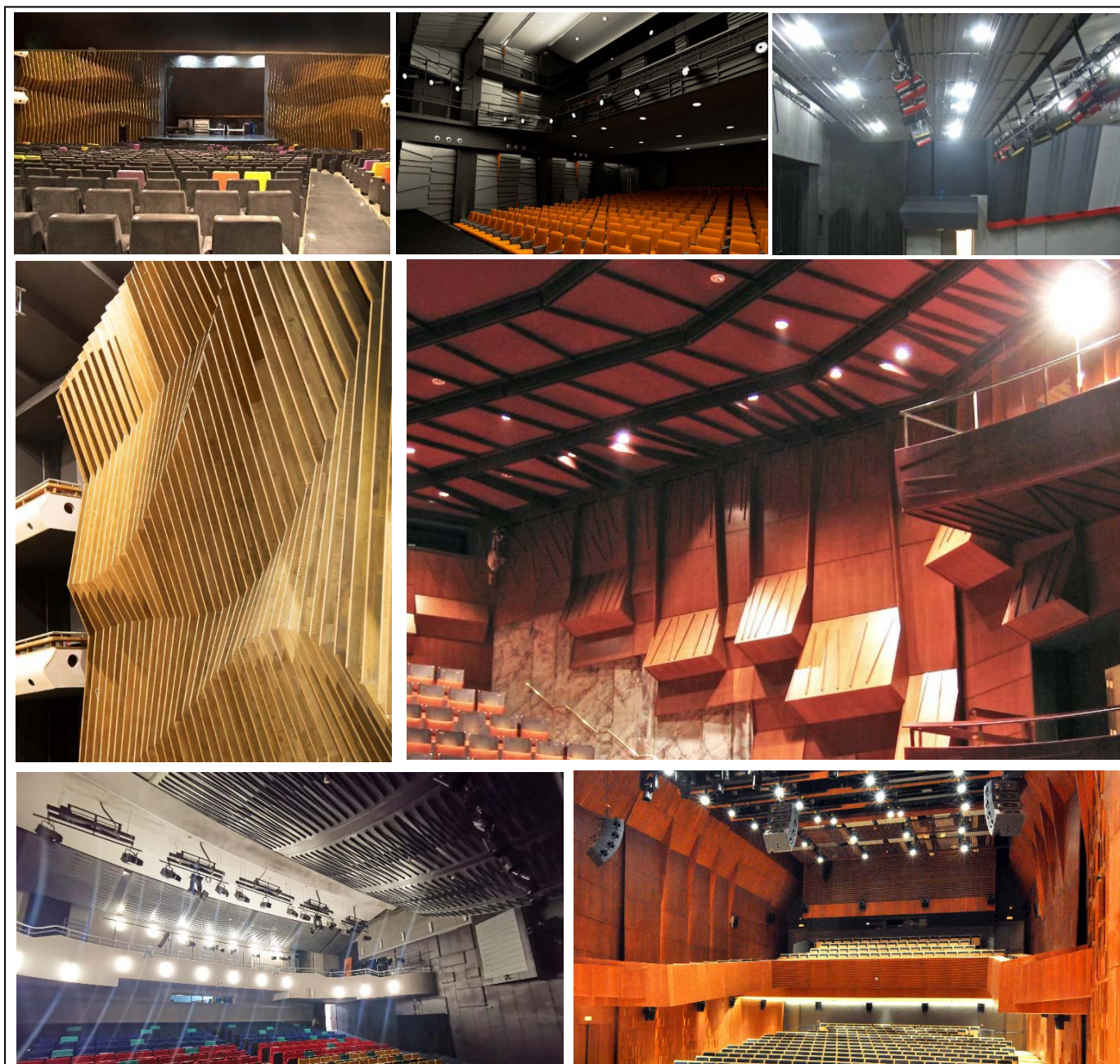
koncertnim i operskim salama. O ulozi reljefnih površina u salama obavljena su brojna istraživanja čiji su rezultati prikazani u literaturi.



Sl. 10. Dva parcijalna modela koji predstavljaju delove istorijske sale opere u Ljubljani napravljena u razmeri 1:10: portal sa ložama (gore), segment loža iz sale (dole); na prosceniju se vidi varničar, a ispred je raster za pozicioniranje mikrofona.

Specifičnost tog zadatka je u činjenici da svaki reljef umetnut u prostor sale postaje deo njene estetike, i slobodno se može reći deo njenog vizuelog identiteta koji primećuju posetioci. Uspešnost ishoda tog segmenta projektovanja u mnogome zavisi od uspešnosti i lakoće komunikacije akustičkog konsultanta sa arhitektom koji je autor estetike objekta u celini, pa i sale. Zbog toga je tema reljefa u do sada realizovanim projektima Laboratorije imala vrlo različite forme razrade. S obzirom da su sa akustičkog aspekta značajne samo geometrijske dimenzije reljefnih elemenata, rezultati projekata na neki način odslikavaju vizuelne preference arhitektonskog tima s kojim je rađeno.

Reljef u salama načelno se može podeliti na krupne forme koje se umeću na pozicijama gde je to moguće i na neki način logično, i na sitnije forme koje se pozicioniraju prema značaju za akustički odziv, ali u prema značaju za ukupnu estetiku sale. Neki karakteristični oblici reljefa iz dosadašnjih



Slika 11 – Neki karakteristični primeri reljefa primenjenih u akustičkom dizajnu Laboratorije: gore levo, sala Doma sindikata u Beogradu, danas MTS dvorana (projektovano 2018-2019); gore u sredini – sala Doma kulture Vuk Karadžić u Beogradu (projektovano 2011, arhitekta Vlada Lalicki, projekat nije izveden); gore desno – sala dečijeg pozorišta u Kragujevcu (projektovano 2008); sredina levo – detalj reljefa u sali Doma sindikata u Beograd; sredina desno – reljef u sali opere u Mariboru (projektovano 2005-2006, arhitekta Janez Lajovic); dole levo - sala pozorišta „Pinokio“, Beograd (projektovana 2007. u saradnji sa birooom CIP, arh. Svetlana Karanović); dole desno - Velika sala Muzičkog centra Crne gore, Podgorica (projektovana 2013. arh. Svetlana Petrović)

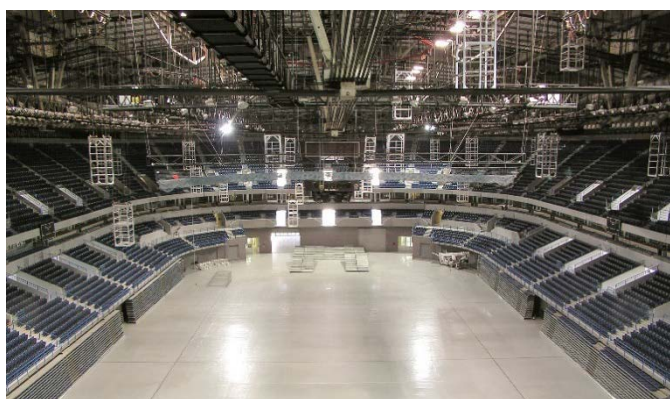
projekata Laboratorije, krupnog i sitnog, prikazani su na slici 11. Ovom prikazu treba dodati i salu opere u Ljubljani sa slike 10. Ona je u tom domenu specifična jer su u njoj ubačeni reljefni elementi posmatrani u dva sloja: kao jasno dizajnirani novi, tehnološki elementi različiti od istorijskog izgleda stare sale, a u drugom sloju su napravljeni metodom mimikrije, to jest kopiranjem postojećih reljefnih elemenata koji su postavljani na mestima gde ih originalno nije bilo.

VII. AKUSTIČKI DIZAJN VEOMA VELIKIH SALA

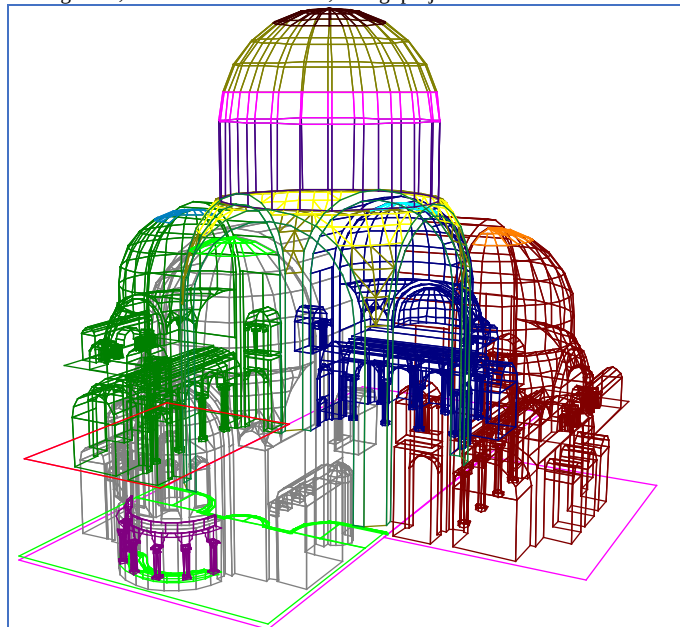
Jedan specifičan slučaj u projektantskoj praksi je akustički dizajn veoma velikih prostora. Pojam "veoma veliki" odnosi se na prostorije čija je veličina reda stotina hiljada kubnih metara unutrašnje zapremine. Specifičnost odziva takvih prostora nastaje delom zbog relativno velikih vremenskih intervala između sukcesivnih refleksija pri prostiranju zvuka, a delom zbog njihovih, po pravilu, specifičnih geometrijskih formi. S obzirom na konstantnost brzine prostiranja zvuka u veoma velikim prostorima prestaje važnost statističke i talasne

teorije. Ostaje prihvatljiva samo geometrijska analiza sa nekim svojim imanentnim ograničenjima kojim treba poznavati i uzeti u obzir prilikom pravljenja modela za proračun, da se ne bi dobijali rezultati različiti od realnosti.

U veoma velikim prostorima po pravilu se ne postavljaju sofisticirani akustički kriterijumi koje njihov odziv treba da zadovolji, kao što je to na primer u koncertnim salama. U praksi se to uglavnom svodi samo na podešavanje vremena reverberacije i eventualno strukture ranih refleksija ako postoji težnja za koncertnim namenama prostora. I sa tako redukovanim zahtevima njihovo projektovanje izlazi iz okvira „pravolinijskih“ inženjerskih rutina. U svakom novom zadatku akustičkog dizajna veoma velikog prostora treba iznova procenjivati subjektivne efekte strukture impulsnog odziva, proveravati ispravnost matematičkih modela, pažljivo tumačiti dobijene rezultate simulacije i, ako objekat postoji, merenja da bi se podesio („trimovao“) model u kome se simulira zvučno polje.



Sl. 12. Unutrašnjost Beogradske arene (danas Stark arena) projektovana 2002-2003. godine, arhitekta Vlada Slavica, Energoprojekt arhitektura

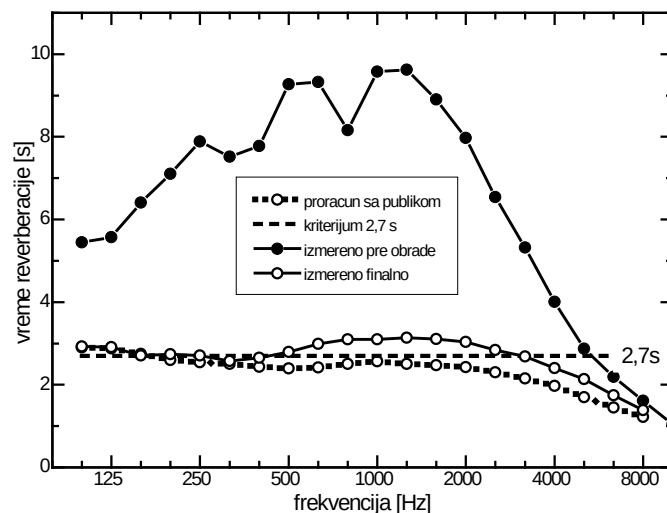


Sl. 13. Model Hrama Svetog Save korišćen u analizama zvučnog polja [33]

Iskustvo akustičkog dizajna veoma velikih prostora u Laboratoriji je do sada sticano na više takvih projekata. Najznačajniji među njima su:

- projekat Beogradske arene (300.000 m^3) rađen u periodu 2002-2003; prikazana na slici 12;
- Hala „Morača“ u Podgorici (oko 100.000 m^3), projekat akustičke sanacije rađen 2004. godine;
- Hala 1 Beogradskog sajma (180.000 m^3), projekat akustičke adaptacije za potrebe održavanja koncerata, urađen u periodu 2006-2007. godine
- dvorana „Boris Trajkovski“ u Skoplju (oko 80.000 m^3), projekat akustičke sanacije urađen tokom 2011. godine;
- Hram Svetog Save u Beogradu (117.000 m^3), u više navrata rađena akustička analiza, merenje i simulacija za različite potrebe; model prikazan na slici 13.

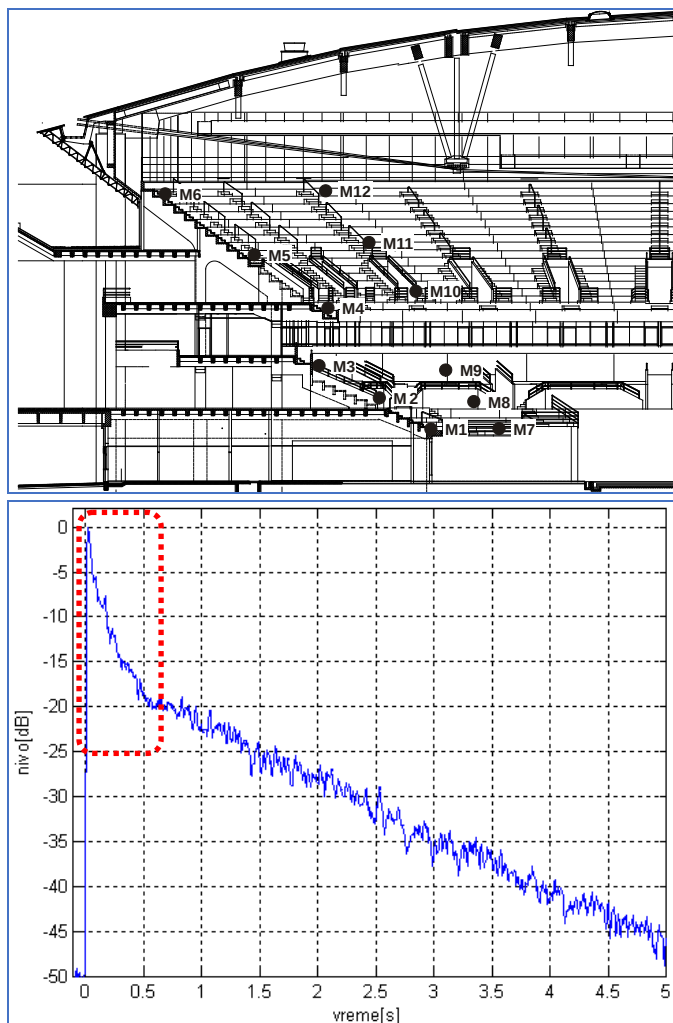
Zbog činjenice da se radi o izuzetno velikim prostorima u njima je uobičajeno vrlo veliko vreme reverberacije, i do 10 s. Prilikom projektovanja njihovog akustičkog dizajna postavlja se zahtev za radikalnim smanjenjem te vrednosti, i to još uz optimizaciju potrošnje materijala, to jest uz optimizaciju investicije. Mogući obim takvih zahteva ilustrovan je na primeru Beogradske arene u kojoj je bilo potrebno da se zadovolji zahtev košarkaške organizacije FIBA. Izmereno vreme reverberacije u prostoru Beogradske arene pre realizacije akustičkog projekta i nakon toga prikazano je na slici 14. Da bi se postigao takav rezultat detaljno su razmatrane sve mogućnosti za postavljanje apsorpcionih materijala i njihov odabir za primenu na pojedinim pozicijama. Vidi se da je u Beogradskoj areni taj zahtev zadovoljen.



Sl. 14. Vreme reverberacije u Beogradskoj areni: izmereno pre bilo kakvih akustičkih intervencija, nakon realizacije projektovanih akustičkih intervencija i računski procena stanja sa publikom; zahtev FIBA za prostore u kojim se igraju međunarodni susreti je $T \leq 2,7 \text{ s}$ sa publikom (označeno horizontalnom linijom)

Rad na projektu Beogradske arene bio je izuzetno značajan sa aspekta daljeg usavršavanja jer je, sticajem okolnosti, Arena kao građevinski objekat tada bila završena i dosta dugo bila na raspolaganju za merenja i istraživanja. Dobijeni su takoreći laboratorijski uslovi za istraživanje odnosa izračunatih i izmerenih vrednosti relevantnih akustičkih parametara u tako velikom prostoru (oko 300.000 m^3). Bio je to radikalan pomak u razumevanju procesa koji se odvijaju u

zvučnom polju i ponašanja apsorpcionih materijala u realnim prostorima. Ispitivani su uticaji detaljnosti u softverskom modelovanju površina, procene vrednosti koeficijenta apsorpcije i koeficijenta raspršavanja u zavisnosti od pozicije u prostoru, itd. U literaturi je pokazano da na tačnost numeričkog modelovanja zvučnog polja u salama utiče ne samo primenjeni algoritam, to jest softver koji je na raspolaganju, već i način kako se priprema model i kako se postupa u simulacijama, a to znači znanje i osposobljenost stručnog tima. Zbog toga je iskustvo sa Beogradskom arenom i sa dužim istraživanjem u njoj bilo dragoceno za postepeno građenje sopstvenog pristupa akustičkom dizajnu [27,28].



Sl. 15. Gore - presek kroz Beogradsku arenu sa označenim mernim mestima koja su korišćena u početnim analizama; pri pobudi u centru dvorane na mernim mestima M6 i M12 registrovan je odziv različit od odziva snimljenog u sredini prostora [34]; dole - kriva opadanja nivoa zvuka snimljena na mernom mest M6 pri pobudi u centru dvorane pre implementacije projektovanih mera akustičke obrade; vidi se da početak odziva u opsegu opadanja 20 dB, u trajanju oko 0,5 s, pokazuje nagib koji odgovara vremenu reverberacije manjem od 2 s.

Zanimljiva tema koja se odnosi na veoma velike prostore, je pojava lokalnih akustičkih efekata u njima. Pod tim se podrazumeva da u veoma velikim prostorijama mogu nastati fenomeni u odzivu koji nisu zajednički za ceo prostor, već samo u pojedinim njegovim delovima. U praksi se pokazalo da delovi

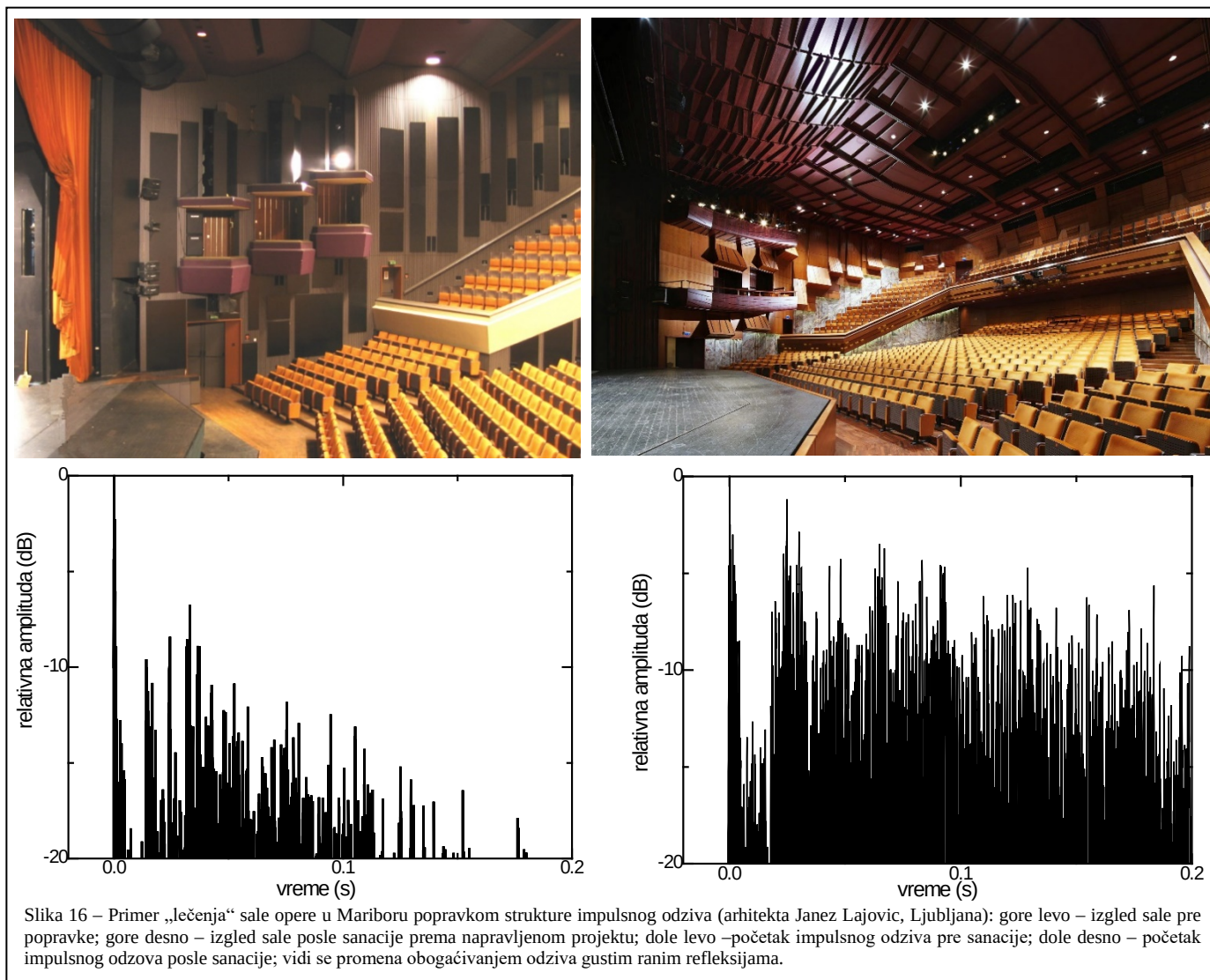
velikih hala mogu pokazivati odlike spregnutih prostora sa celinom prostora. Od načina te sprege zavisi i njihov uticaj na odziv prostora u celini. Jedan takav primer registrovan je u Beogradskoj areni. Na slici 14 prikazan je presek kroz arenu sa označenim mernim mestima.

Na slici 15 prikazana je snimljena kriva opadanja zvuka i mesto gde je zabeležena. Vidi se lokalni efekat manifestovan kraćim početnim vremenom reverberacije u trajanju od čak 0,5 s i u opsegu opadanja od oko 20 dB. Takvo opadanje će u zoni gde se javlja odrediti subjektivni doživljaj drugačiji od ostatka prostora, primeren kraćem vremenu reverberacije, dok će dugačko opadanje biti doživljeno kao nezavisna zvučna pojava.

VIII. RAZVOJ KONCEPTA „LEČENJA“ POSTOJEĆIH KONCERTNIH I OPERSKIH SALA

U praksi akustičkog dizajna Laboratorije za akustiku jedan od zahteva koji se tokom vremena pojavljivao je popravka akustičkih osobina postojećih koncertnih ili operskih sala zbog toga što zvučna slika u njima ne zadovoljava estetske kriterijume za prostor takve namene. Za razliku od projektovanja novih objekata, to su okolnosti u kojima su nepromenljive geometrijske osobine sale: zapremina, oblik, proporcije, površina auditorijuma, itd, a u nekim slučajevima je ograničena i mogućnost promene materijalizacije nekih površina u njoj. Na taj način značajno je ograničen i stepen slobode u procesu projektovanja. Takva tema je pokrenula višegodišnje istraživanje u Laboratoriji, bazirano na rezultatima merenja u više raznih sala, na sistematizaciji podataka o koncertnim i operskim salama koji se mogu naći u literaturi, na raznim analizama softverskom simulacijom zvučnog polja, ali i na merenjima u fizičkim modelima prostorija. Rezultati tih istraživanja publikovani su u više radova od kojih su neki od njih navedeni u literaturi na kraju [35-40]. Tako sticana saznanja primenjena su u izradi projekata akustičkog redizajna više postojećih sala u regionu koje su redizajnirane da bi se popravila zvučna slika pri muzičkim izvođenjima.

Karakterističan fenomen konstatovan u koncertnim i operskim salama u kojim su zahtevane akustičke intervencije jeste da su u zatečenom stanju vrednosti njihovih osnovnih parametara kao što je na primer vreme reverberacije bile manje-više bliske preporučenim vrednostima iz literature. Posmatrajući samo te brojeve ne može se sagledati kakav je u njima problem i šta treba uraditi da se stanje popravi. I nakon realizovane akustičke prepravke vrednost vremena reverberacije nije se bitno promenila, ili vrlo malo, a subjektivni doživljaj zvučne slike, preciznije estetika muzičke slike, značajno se popravio. Istražujući taj fenomen zaključeno je da objašnjenje fenomena leži u unutrašnjoj, finoj strukturi impulsnog odziva koju globalni jednobrojni akustički parametri nisu osetljivi. Zbog toga se rad na akustičkoj popravci sala mora usmeravati na nalaženje intervencija koje mogu da utiču na finu strukturu impulsnog odziva, pre svega u njegovom početnom delu.



Jedan karakterističan primer takvog pristupa akustičkom dizajnu koji ilustruje opisani fenomen je bila akustička prepravka sale opere u Mariboru koju je tim Laboratorije uradio 2006. godine u saradnji sa arhitektom Janezom Lajovicem iz Ljubljane [41, 42, 43]. Na slici 16 prikazane su fotografije sale pre i posle akustičke rekonstrukcije. Na istoj slici prikazane su strukture početnog dela impulsnog odziva snimljenog pre i u rekonstruisanoj sali (odzivi odgovaraju stanju sale na fotografijama iznad). Vreme reverberacije je promenjeno samo za oko 10%, ali su velike promene nastale u strukturi impulsnog odziva, što je vidljivo na slici. Kao rezultat, zvučna slika muzike sa bine radikalno je popravljena i doživljava jačine zvuka je povišen.

IX. BUDUĆNOST AKUSTIČKOG DIZAJNA

Akustički dizajn svih sala je delo koje nastaje kroz saradnju akustičkih konsultanata i arhitekata, posebno kada se radi o koncertnim i operskim salama u kojim se imperativno nameće potreba kreiranja njihovog vizuelnog identiteta. Zbog toga je svaki rad na njihovom dizajnu neminovno pod jakim uticajima trendova u arhitektonskoj estetici, ali i ličnim, autorskim stavovima arhitekta koji žele dati lični pečat. U

akustičkom dizajnu koncertnih i operskih sala gde ne postoje predefinisana ograničenja kao u slučaju sportskih i pozorišnih sala, to unosi privid arhitektonske slobode. Ograničenja nametnuta fizičkim zakonima zvučnog polja u njima nisu šire poznata među arhitektama.

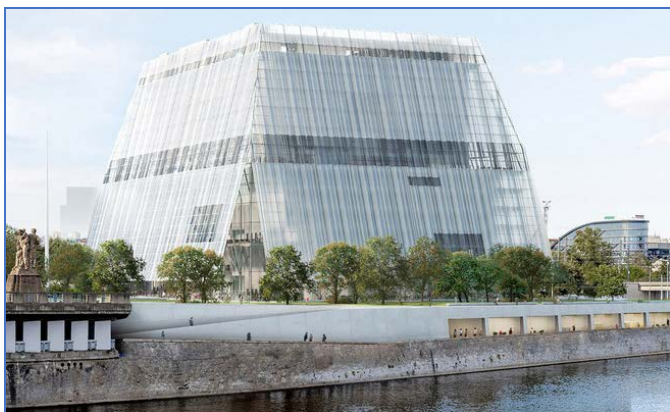
Jedan teoretičar arhitekture pisao je: najbolji oblik za dobru akustiku koncertne sale je paralelopiped, ali ni jedan arhitekta koji drži do sebe ne želi da projektuje paralelopipedne koncertne sale. To je najbolji iskaz koji pokazuje šta može biti budućnost akustičkog dizajna sala. Zahvaljujući razvoju akustičke teorije projektovanje dobre koncertne sale u paralelopipednoj formi postala je skoro inženjerska rutina. Međutim, savremeni arhitektonski trendovi zahtevaju da se napušta ta „zona sigurnosti“ i projektuju sale u oblicima koje arhitektura vidi kao interesantne i poželjne.

Takvi trendovi u arhitekturi neminovno moraju imati odraza na budućnost akustičkog dizajna, a time i na rad tima Laboratorije za akustiku. Zahvaljujući stečenom iskustvu do sada su više puta pravljene iskoraci iz akustičarske „zone sigurnosti“, sve prateći arhitekta u njihovom stvaralaštvu. Ovde su prikazana dva takva primera. Na slici 17 prikazana je koncertna sala Filharmonije u Viljnusu. To je rad nastao za

međunarodni arhitektonski konkurs, a proizašao iz saradnje sa arhitektom Branislavom Redžićem tokom 2019. godine. Ideja arhitekta je bila da se auditorijum u koncertnoj sali postavi poput lamela blende u fotografskom objektivu. Rad je nastao kroz duge diskusije sa arhitektama o takvoj ideji, o njenim nužnim modifikacijama i bitnim elementima za dalju razradu.



Sl. 17. Rad na međunarodnom arhitektonskom konkursu za filharmoniju u Vilniusu u kojoj je primenjena forma po ugledu na blendu fotoaparata (saradnja sa arhitektom Branislavom Redžićem 2019. godine).



Sl. 18. Rad na međunarodnom arhitektonskom konkursu za zgradu „Vltava Philharmonic Hall“ u Pragu (saradnja sa Bevk Perovic Arhitekti. iz Ljubljane, 2022. godine); treća nagrada na konkursu: gore – spoljašnji izgled, dole – sala

Drugi primer iskoraka iz akustičke „zone sigurnosti“ u budućnost koja je došla bio je ponovo jedan konkursni rad napravljen sa arhitektonskim biroom Bevk Perovic Arhitekti d.o.o. i arhitektom Vasom Perovićem iz Ljubljane tokom 2022. godine. Bio je to međunarodni arhitektonski konkurs za zgradu „Vltava Philharmonic Hall“ u Pragu. Osnovne

karakteristike tog konkursnog rada prikazane su na slici 18. Mnoga ograničenja u akustičkom dizajnu sale proizašla su iz zahteva da zgrada filharmonije bude „Landmark“ tog dela Praga i iz arhitektonskog odgovora na taj zahtev. Rad je dobio treću nagradu u velikoj međunarodnoj konkurenciji.

Dalja analiza moguće slike budućnosti akustičkog dizajna sala i uloge tima Laboratorije za akustiku ETF može se završiti jednom zanimljivom ilustracijom relativnosti koja odlikuje tu delatnost. To je misao jednog teoretičara: „Najbolje koncertne sale su one u kojim sviraju najbolji orkestri“.

LITERATURA

- [1] A.C.Gade, "Acoustics in halls for speech and music", poglavlje u knjizi "Springer Handbook of Acoustics", Editor: Thomas Rossing, Springer, 2007.
- [2] Ando, Y. "Concert Hall Acoustics" Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [3] Beranek, L.L., "Concert and opera halls", Acoustical Society of America, 1996.
- [4] Barron, M., "Auditorium Acoustics and Architectural design", E&FN SPON, London, 1993
- [5] M.Mijić, „Akustika u arhitekturi“, Nauka, Beograd, 2000.
- [6] H. Kuttruff, Room Acoustics, Taylor and Francis, New York, 2009.
- [7] Barron, M., "The subjective effects of first reflections in concert halls - The need for lateral reflections", Journal of Sound and Vibration, Vol 15 (4), 1971, 475-494
- [8] M.Mijić, D.Šumarac Pavlović, "Tehnologija akustičkog dizajna prostorija za muzička izvođenja – iskustva Laboratorije za akustiku ETF", I Konferencija za ETRAN, Beograd, 2006, Zbornik radova
- [9] M.Mijić, M.Merkle, "Simulacija zvučnog polja pomoću dvodimenzionalne "Ray-tracing" metode", XI Simpozijum iz informatike JAHORINA '87, saopštenje 295-1
- [10] M.Merkle, "Softver za dvodimenzionalnu "Ray-tracing" analizu", XXXI Jugoslovenska konferencija ETAN-a, Bled 1987, Zbornik radova VI.149-156
- [11] M.Merkle, M.Mijić, "Neke modifikacije osnovnog algoritma za "Sound Ray-Tracing" analizu", XXX Jugoslovenska konferencija ETAN-a, Herceg-novi 1986, Zbornik radova, VI.141-148
- [12] M.Merkle, M.Mijić, "Some ray tracing algorithms and their comparisons", XII ICA, Toronto 1986, Proceedings, Vol II, E12-4
- [13] M.Mijić, "Neki posebni problemi merenja vremena reverberacije uz pomoć računara", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 1983.
- [14] M.Mijić, "Man-computer differences in reverberation time measurement", XI ICA, Paris 1983, Proceedings, Vol 6, 385-388
- [15] Srđan Bojičić, Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "Jedan pristup u računarskom modelovanju akustičkog odziva prostorije metodom rej-trejsing", INFOTEH-JAHORINA, 2010, Zbornik radova, Vol. 9, Ref. E-I-10, p. 459-463
- [16] S.Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, „Formation of Scattering Characteristics for Acoustical Ray Tracing Simulation“, Archives of Acoustics, Vol 43, No 4 (2018), 3-10
- [17] Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Ivana Ristanović, Miomir Mijić, „Analiza raspodele incidentne energije na unutrašnjim površinama prostorija pomoću softverske simulacije“, ETRAN 2017, Zbornik radova, AK2.1.1-5
- [18] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "An insight into the influence of geometrical features of rooms on their acoustic response based on free path length distribution", Acta Acustica, Vol 92, No 6 (decembar 2007) 1012-1026
- [19] Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, „An approach to numerical quantification of room shape and its function in diffuse sound field model“, The Journal of Acoustical Society of America, Vol 120, No 4 (2016), 2766-2768
- [20] Milan Pavlovic, Dragan M. Ristic, Irini Reljin, Miomir Mijić, „Multifractal analysis of visualized room impulse response for detecting early reflections“, The Journal of Acoustical Society of America, Vol 139, No 5 (2016)
- [21] M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, S. Bojičić: "Variation of mean free path length over time and its effect on room impulse response", Acoustics 08, Paris, 2008. Proceedings, 5859-5864
- [22] Dragana Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "Distribution of free path length as an indicator of the room shape and diffusion of reflections", FORUM ACUSTICUM, Budimpešta, 2005. Proceedings

- [23] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "Influence of scattering coefficient of walls and ceiling on auditorium absorption in halls" 3rd Congress of the Alps Adria Acoustic Association, Grac, 2007. Proceedings on CD
- [24] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "Influence of scattering coefficient of walls and ceiling on auditorium absorption in halls", International Symposium on Room Acoustics, Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics, Seville, 2007, Proceedings on CD
- [25] Dragana Šumarac Pavlović, Filip Pantelić, Srdan Bojičić, Miloš Bjelić, „Raspodela uglova incidencije zvučnih talasa u prostorijama različitih proporcija“, ETRAN 2014, Zbornik radova, AK3.4.1-5
- [26] Miomir Mijić, Draško Mašović „Veličina zone direktnog zvuka u realnim prostorijama“, TELFOR 2009, Zbornik radova, 1049-1052
- [27] Ivana Ristanović, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, „Prirastaj energije pri difuznim refleksijama“, ETRAN 2012, Zbornik radova, AK3.4-1-4
- [28] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation — Part I: Measurements," Acta Acustica Vol 91, 740–752 (2005).
- [29] D.Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "Karakteristični oblici statističke raspodele dužina slobodnih putanja", LI Konferencija za ETRAN, Igalo, 2007, Zbornik radova
- [30] D.Šumarac Pavlović, "Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv", doktorska teza, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2007.
- [31] Srdan Bojičić, „Unapređenje metoda za numeričku simulaciju zvučnog polja u prostorijama“, doktorska teza, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2019.
- [32] M.Mijić, H.Kurtović, Z.Perolo, V.Oničin, "Model Evaluation in Belgrade National Theatre Reconstruction", XIII ICA Beograd, 1989, Proceedings, Vol. 2, 335-338
- [33] M.Mijić, H.Kurtović, Z.Perolo, V.Oničin, "Ispitivanje akustičkih osobina adaptirane sale Narodnog pozorišta u Beogradu pomoću fizičkog modela", XXXIII Jugoslovenska konferencija ETRAN-a, Novi sad 1989, Zbornik radova, VI.3-10
- [34] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation — Part II: Calculations," Acta Acustica Vol 91, 753–763 (2005).
- [35] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, "Jednostavan impulsni izvor za merenja u fizičkim modelima", LIII Konferencija za ETRAN, Vrnjačka banja, 2009, Zbornik radova na CD
- [36] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, H.Kurtović, "Akustički dizajn hale Beogradske arene", XLIX Konferencija za ETRAN, Budva, 2005, Zbornik radova
- [37] Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Jelena Erdeljan, Tatjana Miljković, „O ulozi akustičkih rezonatora u prostoru hrama Svetog Save u Beogradu“, LXVI konferencija ETRAN, Novi pazar 2022. Zbornik radova
- [38] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Lokalni efekti u akustičkom odzivu veoma velikog zatvorenog prostora", XLVII Konferencija za ETRAN, Igalo, 2003, Zbornik radova
- [39] D.Šumarac Pavlović, M.Mijić, "Distribution of free path length as an indicator of the room shape and diffusion of reflections", Forum Acusticum, Budimpešta, 2005.
- [40] D.Šumarac Pavlović "Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv", TELFOR, Beograd, 2004.
- [41] Dragana Šumarac Pavlović, Filip Pantelić, Srdan Bojičić, Miloš Bjelić, „Raspodela uglova incidencije zvučnih talasa u prostorijama različitih proporcija“, ETRAN 2014, Zbornik radova, AK3.4.1-5
- [42] D.Šumarac Pavlović, M.Mijić "Uticaj difuznosti sale na efektivni koeficijent apsorpcije auditorijuma", TELFOR07, Beograd 2007, Zbornik radova na CD
- [43] Dragana Šumarac-Pavlović, M.Mijić, "Distribution of free path length as an indicator of the room shape and diffusion of reflections", FORUM ACUSTICUM, Budimpešta, 2005. Proceedings
- [44] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Rekonstrukcija opere u Mariboru – Case study", LI Konferencija za ETRAN, Igalo, 2007, Zbornik radova, ISBN 978-86-80509-62-4
- [45] M.Mijić, D.Šumarac-Pavlović, "Acoustic redesign of the Opera hall in SNG Maribor" 3rd Congress of the Alps Adria Acoustic Association, Grac, 2007. Proceedings on CD
- [46] 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

ABSTRACT

The fundamental dimension of acoustic comfort in residential A hall design is a task set between science, engineering, psychological acoustics and art, and is undoubtedly the most complex engineering topic in acoustics. In practice, it is a very dispersive task, because there are different types of halls with different initial requirements in the field of acoustics. In concert halls, the requirements of the aesthetics of the sound image must be met, in theater halls the requirement is good intelligibility of speech from the stage, in cultural centers halls all of these are sought together, but with necessary compromises, in very large spaces well-known theoretical models must be redefined, and on top of all that there are also trends in modern architecture that seek to deviate from classic, verified acoustic solutions. That is why each of the more than 40 projects of various halls carried out by the team gathered around the Laboratory for Acoustics of the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade was a different task. In some cases, it had required research, sometimes the creation of supplementary measuring hardware or software, and sometimes it was a theoretical challenge that was solved outside of school-known theory. Potential misunderstandings and conflicts with the architects also creep through all of this, because they are responsible for the final aesthetics of the designed space. Decades of design practice and a large number of realized halls inevitably influenced the development of theory and engineering skills in the field of acoustic design, so that halls' acoustic design found its place in research at doctoral studies, but also in teaching at undergraduate studies through curriculums in the field of acoustics. In this paper, interesting aspects and challenges of acoustic design and the results achieved are illustrated through the presentation of results in various designed halls.

Belgrade School of Acoustic Design - theory and practice of hall design

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić