

# Analiza uticaja difuznih površina u prostoriji bazirana na softverskom modelovanju

Šumarac Pavlović D., Mladić S., Mijić M.,

**Sadržaj** — U akustičkom projektovanju upotreba posebno dizajniranih difuznih površina ima značajnu ulogu u kontroli impulsnog odziva. Predikcija uticaja projektovanih difuznih elemenata na parametre impulsnog odziva je složen problem koji se rešava primenom nekog od raspoloživih modela za analizu zvučnog polja. U ovom radu uticaj difuznih elemenata analiziran je na bazi softverskog modelovanja i predstavlja nastavak prethodnog istraživanja baziranog na fizičkim modelima.

**Ključne reči** — Difuzni elementi, impulsni odziv, softversko modelovanje zvučnog polja.

## I. UVOD

DIFUZNI elementi aplicirani na unutrašnjim površinama prostorije u mnogim okolnostima jedino su raspoloživo sredstvo za kontrolu akustičkih karakteristika prostora u kome se postavljaju visoki zahtevi u pogledu akustičkog kvaliteta. Najbolji primer za to su koncertne dvorane. U njima je primena apsorpcionih materijala nepoželjna, pa se akustičke intervencije svode na apliciranje različitih manje ili više složenih geometrijskih formi. One se, po pravilu, moraju svojom formom prilagođavati zahtevima estetike enterijera sale, pa njihove difuzne karakteristike nisu unapred poznate niti se mogu naći u literaturi.

Prisustvo difuznih formi na zidovima prostorije ima uticaja na dva aspekta kvaliteta impulsnog odziva. Prvo, one mogu uticati na povećanje energije koja stiže u početnom delu impulsnog odziva (interval prvih refleksija). Time one doprinose poboljšanju subjektivnog dozivljaja, pre svega glasnosti i reverberantnosti prostora. Drugo, reljefne forme preusmeravanjem kretanja energije po prostoriji mogu uticati na opšti tok opadanja energije u njoj [1]. Takav njihov uticaj ostvaruje se na dva načina. S jedne strane, to se postiže preusmeravanjem energije koja bi bila apsorbirana u zoni auditorijuma ka drugim površinama, a s druge strane reljefne strukture neminovno

povećavaju ukupnu unutrašnju površinu u prostoriji čime se povećava i ukupna apsorpcija. Merenja na fizičkim modelima u kojima su na razne načine aplicirani reljefni elementi pokazala su da se uticaj difuznih elemenata na energetske tokove ne može kvantifikovati samo povećanom apsorpcijom, već da su mehanizmi njihovog uticaja složeniji [2].

U ovom radu analizirane su mogućnosti predikcije uticaja difuznih elemenata na impulsni odziv i globalne parametre zvučnog polja u prostoriji. Predikcija je zasnovana na softverskom modelovanju zvučnog polja. U softverskom modelovanju mogu se koristiti dva načina za opisivanje refleksionih karakteristika unutrašnjih površina u prostoriji. Jedan podrazumeva dodeljivanje odgovarajućih koeficijenata difuznosti svim površinama na kojima je apliciran reljef, a drugi način je precizno geometrijsko modelovanje reljafa. Za analizu čiji su rezultati prikazani u ovom radu napravljen je softverski model paralelopipedne prostorije identičan fizičkom modelu na kojem su ranije izvršena merenja i prikazani rezultati [2]. Na taj način su stvoreni uslovi za direktno poređenje rezultata softverskog modelovanja sa rezultatima merenja u fizičkom modelu.

## II. OPIS EKSPERIMENTA

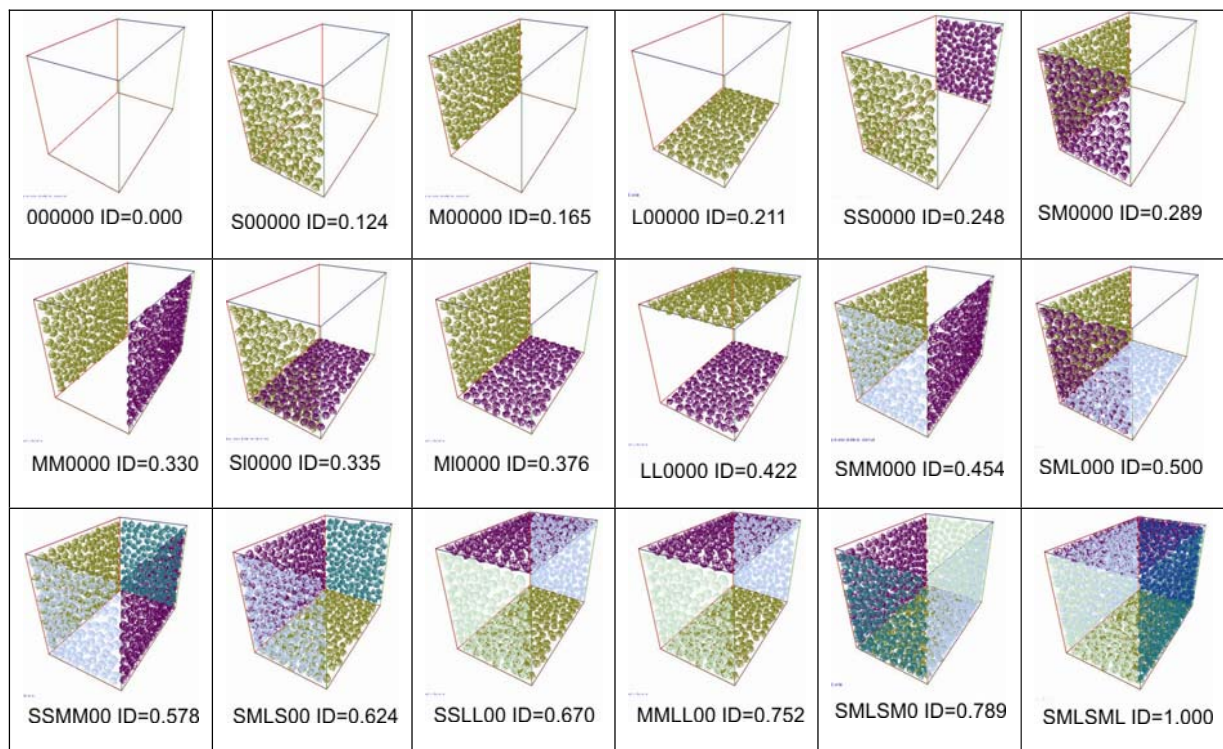
Za analizu koja je prikazana u ovom radu pripremljeno je 18 softverskih modela iste paralelopipedne prostorije. To je prostorija za koju je ranije napravljen i fizički model i u kome je vršeno merenje opisanu u prethodnom radu [2]. Ovi softverski modeli su se međusobno razlikovali samo po reljefnosti unutrašnjih površina. Na šest stranica paralelopipedne prostorije u različitim kombinacijama je aplicirana ista reljefna forma. Ona je formirana s masivnim poluloptastim aplikacijama koje su stohastički raspoređene po površini stranice. Na svakoj stranici na kojoj je primenjen ovakav reljef polulopte prekrivaju oko 50% njene površine. U 18 napravljenih modela primenjene su razne moguće kombinacije difuznosti: od modela sa potpuno ravnim stranicama do onoga u kome je svih šest stranica pokriveno reljefom. Na slici 1 prikazani su izgledi svih 18 modela. Kao mera difuznosti u ovakvim modelima korišćen je indeks difuznosti (ID), ranije definisan u literaturi. Indeks difuznosti se izračunava tako što se površina svake stranice množi faktorom 1 ili 0, u zavisnosti od toga da li je prekrivena difuznim elementima ili ne, saberu se sve tako ponderisane površine i podele sa ukupnom unutrašnjom površinom prostorije. Na taj način indeks difuznosti u analiziranim modelima prikazuje deo ukupne površine koji je pokriven difuznim elementima i predstavlja srednju meru difuznosti izračunatu za celu

<sup>1</sup>Istraživanja na osnovu kojih je napisan ovaj rad sprovedena su u okviru aktivnosti na projektu 23046 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

D. Šumarac Pavlović., Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-3218361, e-mail: [dsumarac@etf.rs](mailto:dsumarac@etf.rs))

S. Mladić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-32183610, e-mail: [sonja\\_mladic@yahoo.com](mailto:sonja_mladic@yahoo.com))

M. Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-3218361, e-mail: [emijic@etf.rs](mailto:emijic@etf.rs))



Slika 1. Simboličke oznake i izgledi svih 18 realizovanih softverskih modela prostorijsa sa izračunatim vrednostima indeksa difuznosti.

prostoriju. Model sa svim ravnim površinama ima indeks difuznosti 0, a model u kome su sve površine difuzne ima indeks 1. Za svaki od modela izračunate su vrednosti indeksa difuznosti i one su prikazane na slici 1. Pošto je broj raspoređenih polusfernih elemenata na svakoj stranici takav da pokriva 50% njene površine, ukupna površina svake stranice pod reljefom povećava se za 50%. Za simulaciju je korišćen softverski paket ODEON 10 [3].

### III. BAŽDARENJE SOFTVERSKIH MODELA

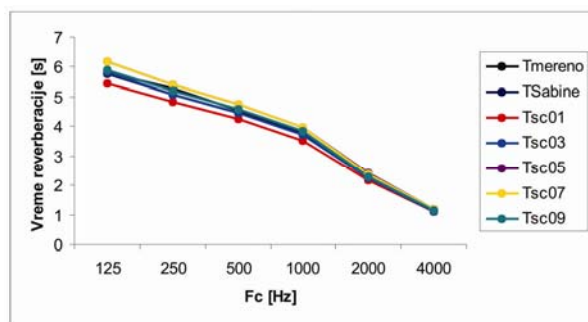
Izbor apsorpcionih i difuznih karakteristika unutrašnjih površina u modelu vršen je na osnovu rezultata merenja u fizičkom modelu iste prostorije. Kao referentni model uzeta je varijanta s potpuno glatkim zidovima (označena kao model 000000). Ovaj model je izabran jer to odgovara realnom postupku baždarenja modela u kome načešće postoji prostorija bez ikakvih intervencija u entrijeru i na osnovu merenja u njoj baždare se modeli i testiraju efekti predviđenih korekcija i intervencija na unutrašnjim površinama. Na osnovu izmerenih vrednosti koeficijentata apsorpcije u takvom fizičkom modelu određene su apsorpcione karakteristike unutrašnjih površina i one su prikazane u Tabeli 1.

TABELA 1. USVOJENE APSORPCIONE KARAKTERISTIKE POVRŠINA U MODELIMA

frekv. [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
koef. aps. $\alpha$	0.027	0.030	0.033	0.038	0.06	0.110

U procesu baždarenja modela vrednost koeficijenta difuznosti unutrašnjih površina (*scattering coefficient*) menjana je u rasponu od 0.1 do 0.9 i izračunavano je vreme reverberacije. Rezultati su prikazani na slici 2. Za

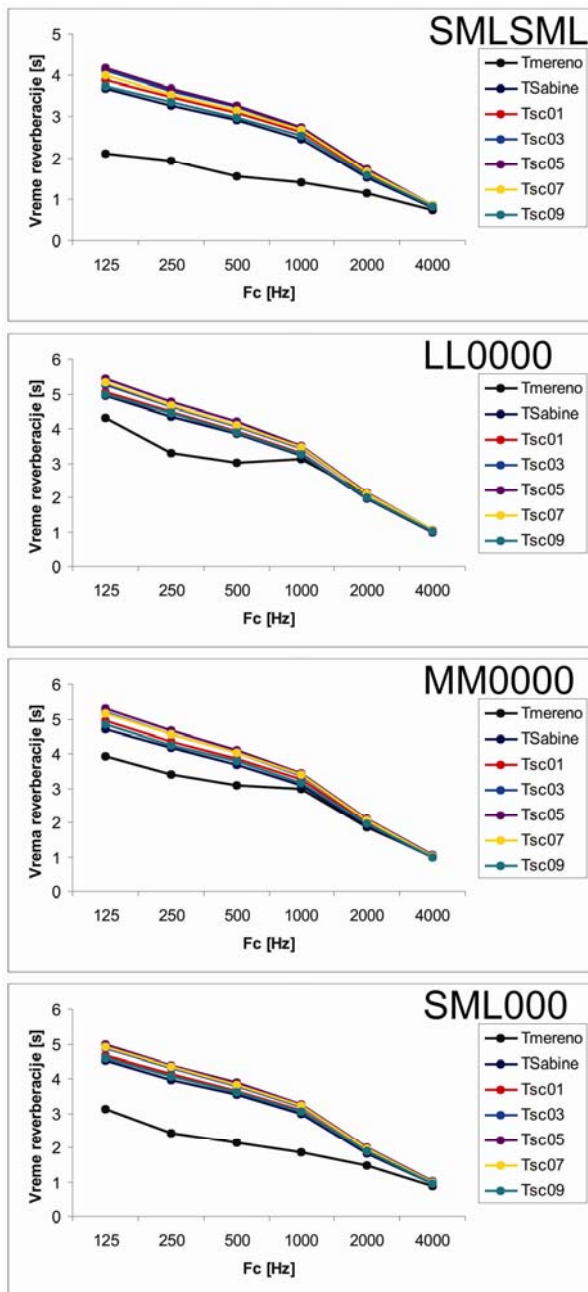
utvrđene vrednosti koeficijenta apsorpcije u slučaju modela 000000 izračunato je vreme reverberacije po Sabinovom obrascu i dobijeni rezultat je takođe prikazan na slici 2. Vidi se da su varijacije vremena reverberacije sa promenom koeficijenta difuznosti u modelu potpuno ravnih površina jako male. Prema tome, promenom koeficijenta difuznosti ne može se modelovati postojanje reljefnih elemenata na površinama.



Slika2. Proračun vremena reverberacije za početni model 000000 za usvojene vrednosti koeficijenta apsorpcije i različite vrednosti koef. difuznosti

Za usvojene vrednosti koeficijenta apsorpcije, koje su određene na osnovu usaglašavanja vremena reverberacije izmerenog u fizičkom modelu 000000 i u njemu odgovarajućem softverskom modelu, izvršena je simulacija u svih 17 preostalih modela. Simulacija je vršena rej-trejsing metodom. Na slici 3 prikazane su vrednosti vremena reverberacije koje su dobijene merenjem u fizičkom modelu, proračunom prema statističkom modelu (Sabinov obrazac) i simulacijom u

softverskim modelima SMLSML, LL0000, MM0000 i SML000. Simulacija je vršena za više vrednosti koeficijenta difuznosti površina. Očekivane Sabinove vrednosti vremena reverberacije računane su na osnovu povećanja ukupne unutrašnje površine u prisustvu reljefnih elemenata. Praktično u svim modelima simulacijom se dobijaju nešto više vrednosti vremena reverberacije od onih koje su dobijene merenjima, a varijacije zavise od konfiguracije reljefnih stranica u modelu.

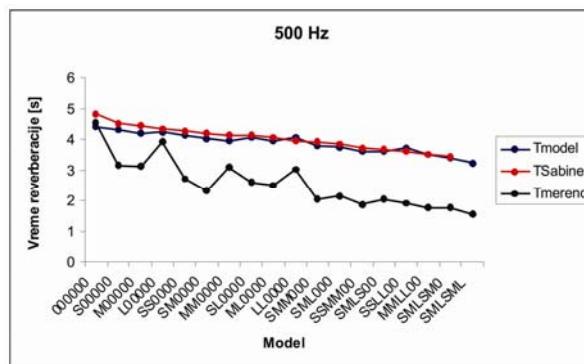


Slika3. Proračun vremena reverberacije za modele SMLSML, LL0000, MM0000, SML000 za usvojene vrednosti koeficijenta apsorpcije (baždarenje u odnosu na model 00000) i različite vrednosti koef. difuznosti

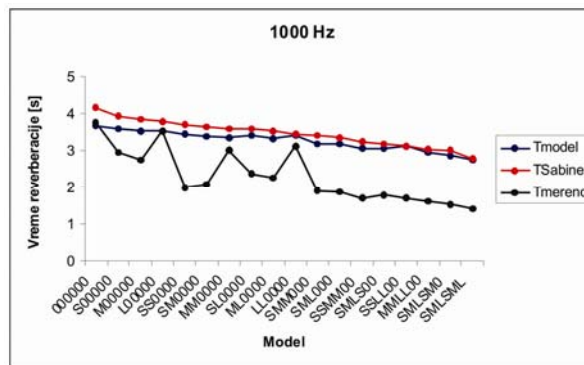
Na slikama 4 i 5 prikazane su vrednosti vremena reverberacije (500 Hz i 1000 Hz) koje su izmerene u

fizičkim modelima, izračunate na osnovu Sabinovog obrasca i dobijene simulacijom u odgovarajućim modelima prostorija.

Zbog velikih odstupanja vremena reverberacije koja su dobijena simulacijom u odnosu na izmerene vrednosti u fizičkom modelu kada je baždarenje simulacionih modela izvršeno na osnovu početnog 000000 modela, izvršena je korekcija apsorpcionih koeficijenta tako da su rezultati merenja i simulacije usaglašeni na modelu SML000 kod koga se pretpostavlja da su bolje ispunjeni uslovi za postizanje veće opšte difuznosti u zvučnom polju. U tabeli 2 prikazane su korigovane vrednosti koeficijenta apsorpcije nakon tog drugog baždarenja, kao i % korekcije apsorpcionih koeficijenata.



Slika 4 . Vreme reverberacije na 500 Hz izmereno u fizičkom modelu, izračunato Sabinovim obrascem i dobijeno simulacijom u svim posmatranim modelima za koef. apsorpcije dobijene prema modelu 000000



Slika 5 . Vreme reverberacije na 1000 Hz izmereno u fizičkom modelu, izračunato Sabinovim obrascem i dobijeno simulacijom u svim posmatranim modelima za koef. apsorpcije dobijene prema modelu 000000

TABELA 2. USVOJENE APSORPCIONE KARAKTERISTIKE POVRŠINA U MODELIMA NA OSNOVU BAŽDARENJA PREMA MODELU SML000

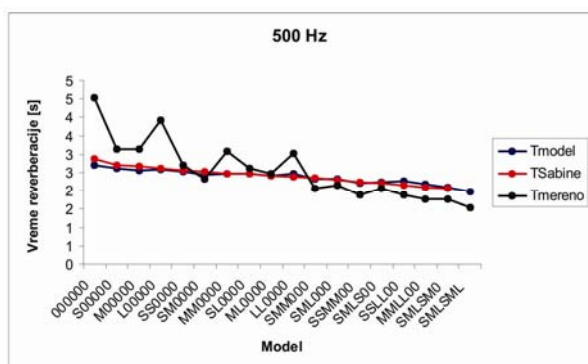
frekv. [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
$\alpha$ (000000)	0.039	0.053	0.055	0.060	0.080	0.120
$\alpha$ (SML000)	0.027	0.030	0.033	0.038	0.06	0.110
% promena $\alpha$	30	43	40	36	25	8

Na slikama 6 i 7 prikazane su izmerene, proračunate i simulirane vrednosti vremena reverberacije u svim posmatranim modelima kada je izvršena promena koeficijenta apsorpcije prema fizičkom modelu SML000.

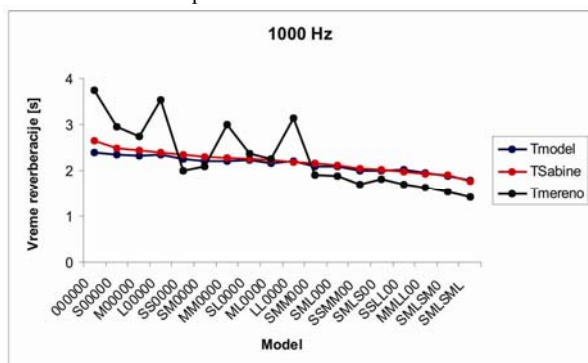


#### IV. DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

Analiza doprinosa difuznih elemenata u nekom prostoru koja se vrši softverskom simulacijom podrazumeva adekvatan izbor apsorpcionih i difuznih karakteristika unutrašnjih površina. Analiza koja je prikazana u prethodnom poglavlju pokazala je da u uslovima kada je srednji koeficijent apsorpcije u prostoru mali ( $\alpha < 0.2$ ) dodavanje difuznih elemenata nekim površinama ne može modelovati samo promenom koeficijenta difuznosti refleksija. Izmerene vrednosti vremena reverberacije u odgovarajućim fizičkim modelima, koje su značajno manje od simuliranih ukazuju da prisustvo difuznih elemenata unosi dodatna slabljenja i da je potrebna izvesna korekcija apsorpcionih karakteristika.



Slika 6. Vreme reverberacije na 500 Hz izmereno u fizičkom modelu, izračunato Sabinovim obrascem i dobijeno simulacijom u svim posmatranim modelima za koef. apsorpcije dobijene prema modelu SML000



Slika 7. Vreme reverberacije na 1000 Hz izmereno u fizičkom modelu, izračunato Sabinovim obrascem i dobijeno simulacijom u svim posmatranim modelima za koef. apsorpcije dobijene prema modelu SML000

Korekcija apsorpcionih karakteristika difuznih površina može se vršiti na osnovu procenjenog povećanja ukupne unutrašnje površine. Proračunom statistički očekivanih vrednosti po Sabinovom obrascu ni u tom slučaju se ne dobijaju zadovoljavajuća slaganje sa izmerenim vrednostima.

Baždarenje simulacionih modela prirodno se vrši na bazi modela u kome u kome nema apliciranih difuznih površina. Međutim u takvim situacijama, pogotovo kada u je u prostoriji mali srednji koeficijent apsorpcije, zbog prisustva paralelnih površina javlja se nedovoljna difuznost u polju i izmerene vrednosti vremena

reverberacije (u odnosu na koje se vrše baždarenja) odstupaju od statistički očekivanih vrednosti. Zbog povećanog zadržavanja energije koja saobraća između paralelnih površina proces opadanja je duži od onoga koji se očekuje na bazi statističke teorije, pa je i izmereno vreme reverberacije duže. Koeficijenti apsorpcije su u tom slučaju manji od stvarnih tako da simulacioni modeli daju mnogo veće vreme reverberacije. Za posmatrani model razlike se kreću i do 40 %.

Ako se baždarenje modela izvrši u odnosu na neku drugu situaciju kada su u prostoru ostvareni bolji uslovi difuznosti, razlike između izmerenih i simuliranih vrednosti značajno se smanjuju.

Analiza koja je prikazana u ovom radu pokazuje da simulacioni modeli ne mogu da isprate pojave koje se dešavaju na graničnim površinama u prisustvu difuznih elemenata, kada ovi elementi doprinose ili narušavaju opštu difuznost u prostoru. Razlike u statistički očekivanim vrednostima vremena reverberacije i vrednostima koje se dobijaju simulacijom se kreću za posmatrani model u okvirima jedva primetnih razlika (JND) za različite vrednosti koeficijenta difuznosti.

U uslovima kada su ostvareni bolji opšti uslovi difuznosti razlike između rezultata simulacije i merenja na fizičkim modelima se kreću u rasponu  $\pm 15\%$ . U situacijama kada postoji neko veće odstupanje u difuznim karakteristikama parova naspramnih stranica (u posmatranom paralelopipednom modelu) odstupanja izmerenih vrednosti vremena reverberacije u fizičkim modelima u odnosu na opšti trend mogu ići i preko 40%. Takve pojave simulacioni modeli ne prepoznaju ni kada su difuzni elementi precizno geometrijski definisani.

#### LITERATURA

- [1] D.Šumarac Pavlovic, 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 (2007) pp. 1012-1026
- [2] D.Šumarac Pavlovic, M. Petrović, "Uticaj opšte difuznosti na odziv u prostoriji", *TELFOR 2009, Zbornik radova*, 2009, pp. 1025-1028
- [3] 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
- [4] ISO 3382: "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters"

#### ABSTRACT

The acoustic design based on the specially designed diffuse surface has a significant role in controlling the impulse response. Predicting the impact of projected diffuse elements on the parameters of the impulse response is a complex problem that could be solved by one of the available models for the analysis of the sound field. In this paper, the influence of diffusion of elements was analyzed based on software modeling and presents a continuation of previous research based on physical models.

#### ANALYSIS OF THE IMPACT OF DIFFUSE SURFACES IN THE ROOM BASED ON A SOFTWARE MODELING

Šumarac Pavlović D., Mladić S., Mijić M.