

# Analiza raspodele incidentne energije na unutrašnjim površinama prostorija pomoću softverske simulacije

Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Ivana Ristanović, Miomir Mijić

**Apstrakt**—Zvučno polje u prostorijama određeno je apsorpcionim, refleksionim i difuznim karakteristikama unutrašnjih površina. Efikasnost materijala koji se u akustičkom dizajnu prostorija apliciraju na pojedinim površinama zavisi od načina na koji ih pogađa zvučna energija. Komercijalni softveri za simulaciju zvučnog polja omogućavaju uvid u globalne karakteristike zvučnog polja na osnovu simuliranog monouralnog i binauralnog impulsnog odziva, ali ne i doprinos svake pojedinačne površine. Da bi se analizirao njihov doprinos ukupnom energetskom bilansu zvučnog polja razvijen je softver na bazi rej-trejsing simulacije koji omogućava analizu za svaku pojedinačnu unutrašnju površinu. Taj doprinos se može kvantifikovati površinskom gustinom incidentne energije koja pogađa površinu, što određuje njenu efektivnu apsorpcionu moć. Na primeru različitih modela analizirano je moguće odstupanje raspodele površinske gustine energije koja pogađa površine u prostorijama različitih makro i mikro geometrijskih karakteristika. Poznavanje tih raspodela omogućava pravilniji raspored raspoloživog apsorpcionog materijala, ali takođe i analizu izolacione efikasnosti pregrada u zadatim uslovima.

**Gljučne reči**—simulacija zvučnog polja, rej-trejsing, apsorpcija.

## I. UVOD

Predikcija akustičkog odziva nekog prostora u njegovom akustičkom dizajnu uobičajeno se vrši softverskom simulacijom zvučnog polja. Simulacijom se generiše impulsni odziv (monauralni ili binauralni) i na osnovu toga se izračunavaju svi relevantni objektivni pokazatelji stanja u zvučnom polju. Osnova za svaku takvu simulaciju je geometrijski model prostorije u kome se definiše materijalizacija unutrašnjih površina pomoću parametara koji opisuju apsorpcione i difuzne karakteristike za svaku pojedinačnu površinu. Na tržištu postoji više različitih komercijalnih softvera za simulaciju zvučnog polja. Svi oni se baziraju na rej-trejsing algoritmu i metodi likova koji se pri radu mogu kombinovati na željeni način.

Srđan Bojičić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: srdjan.bojicic@gmail.com).

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

Ivana Ristanović – Visoka škola tehničkih strukovnih studija u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: ivana.ristanovic@vstss.com)

Miomir Mijić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

Ulazni parametar za svaku takvu softversku simulaciju je frekvencijska zavisnost apsorpcije površina izražena vrednostima koeficijenta apsorpcije. Ova karakteristika se zadaje na osnovu izmerenih vrednosti koeficijenta apsorpcije koju materijali ispoljavaju u difuznom polju reverberacionih prostorija gde se vrši laboratorijsko testiranje. U takvim uslovima poznata je ugaona raspodela incidentne energije i njena veza sa prosečnim nivoom zvuka u prostoriji, jer zvučno polje u reverberacionim prostorijama u dovoljnoj meri zadovoljava uslove difuznog polja.

Koeficijent apsorpcije materijala po svojoj prirodi je ugaono zavisna veličina i njegova jednobrojna vrednost zavisi od dve veličine: od ugaone raspodele incidentne energije i od površinske gustine energije koja pogađa površinu. Od toga kolika je stvarna gustina energije koja neku površinu pogađa u datim okolnostima i kakva je njena ugaona raspodela zavisice ukupna apsorpcija te površine u prostoriji. Navedene karakteristike opisuju ne samo efektivnu apsorpcionu moć neke površine, već predstavljaju važan ulazni podatak za proračun izolacionih svojstava pregrada koje razdvajaju prostorije.

Komercijalni softveri za modelovanje zvučnog polja u prostorijama ne pružaju detaljan uvid u dešavanja na svim pojedinačnim površinama, već se o posledicama različitih raspodela gustina energije po površinama saznaje posredno analizom globalnih objektivnih parametara [1].

U literaturi je pokazano da globalni geometrijski oblik prostorije kao i mikro geometrija (reljef) na unutrašnjim površinama utiču na način na koji se zvučna enerija kreće po prostoriji, a time i na njen globalni akustički odziv [2]. Kao pokazatelj stanja može se analizirati raspodela slobodnih putanja i odstupanje srednje dužine slobodnih putanja od statistički očekivanih vrednosti za zadate geometrijske karakteristike. To su sve informacije koje se mogu dobiti pomoću komercijalnih softvera.

Međutim, raspodela slobodnih putanja ne može da pruži odgovor na pitanje koja površina, i sa kolikim udelom utiče na odstupanja različitih parametara od statistički očekivanih vrednosti, već samo može da ukaže na tendenciju odstupanja od istih. Zbog toga je u laboratoriji za akustiku ETF razvijen softverski paket baziran na rej trejsing simulaciji. Osnovna ideja pri realizaciji ovog softvera bila je da se unaprede algoritmi za modelovanje difuznih refleksija koji bi, pre svega, dali precizniji uvid u procese koji se odvijaju na pojedinačnim graničnim površinama u prostoriji. Realizovani

softver, osim standardnih globalnih pokazatelja zvučnog polja, daje precizan pregled niza karakteristika koje mogu biti od velikog značaja pri akustičkom dizajnu i optimalnoj primeni materijala. Detaljan prikaz algoritma koji je ugrađen u modelovanje difuznih refleksija prikazan je ranije u literaturi. Njegova pouzdanost je verifikovana poređenjem rezultata dobijenih u istim fizičkim konfiguracijama pomoću takve simulacije i merenjima na fizičkom modelu [3].

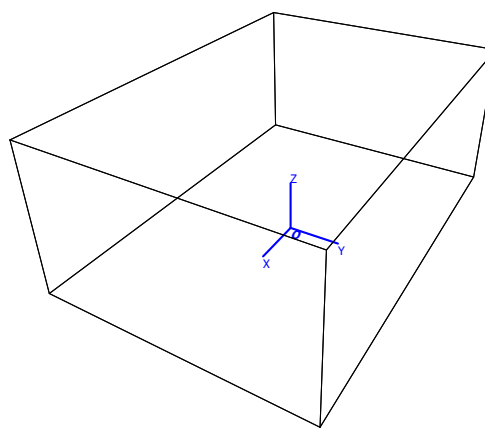
U ovom radu akcenat je stavljen na utvrđivanje doprinosa koje pojedinačne površine imaju na ukupan energetski bilans u prostoriji, a to zavisi od energije koja ih pogađa. Analizom su obuhvaćena tri modela prostorije različitih globalnih geometrijskih karakteristika. Mikrogeometrijske karakteristike varirane su kroz različite difuzne karakteristike koje se dodeljuju površinama. Izabrani modeli nemaju značajno različite raspodele slobodnih putanja, ali i pored toga imaju međusobno velike varijacije u raspodeli površinske gustine energije na unutrašnjim površinama.

## II. ANALIZA RASPODELE POVRŠINSKE GUSTINE ENERGIJE

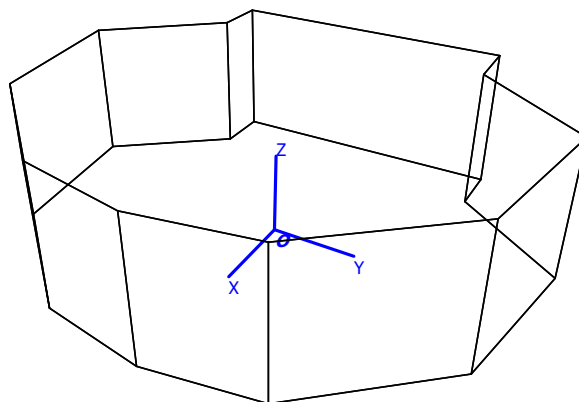
U difuznom polju postoji jasna veza između srednjeg intenziteta (nivoa) zvuka u prostoriji i incidentne energije koja pogađa svaku unutrašnju površinu. Pretpostavljajući jednaku verovatnoću svih uglova incidencije i jednaku energiju koja napada površinu iz svih uglova, što je svostveno za homogeno i difuzno polje, može se izvesti veza između srednjeg intenziteta zvuka  $J$  u prostoriji i normalnog intenziteta koji pogađa granične površine. Prema statističkom modelu zvučnog polja u prostorijama taj intenzitet na površinama je  $J/4$  [4].

U realnim prostorijama ne postoji difuzno polje, što znači da postoje manja ili veća odstupanja raspodele uglova incidencije od onog koji se pretpostavlja u difuznom polju. Posledica toga je da energija koja dolazi do površina iz raznih pravaca, to jest površinska gustina energije, nije jednaka na svim delovima unutrašnjosti prostorije. Da bi se prikazala moguća odstupanja površinske gustine energije od teorijske vrednosti za difuzno polje analizirana su tri modela prostorija prikazana na slikama 1 2 i 3. Prva prostorija je jednostavnog paralelopipednog oblika i prikazana je na slici 1. Druga prostorija je kompleksnijeg oblika. To je scenski prostor u kome su pod i plafon ravni i paralelni, a oblik u osnovi je mnogougao. Njen model je prikazan na slici 2. Najzad, treća prostorija je geometrijski najkompleksnija. To je hala „Morača“ u Podgorici koja ima vrlo kompleksan oblik sa mnogo pojedinačnih unutrašnjih površina. Njen model je prikazan na slici 3.

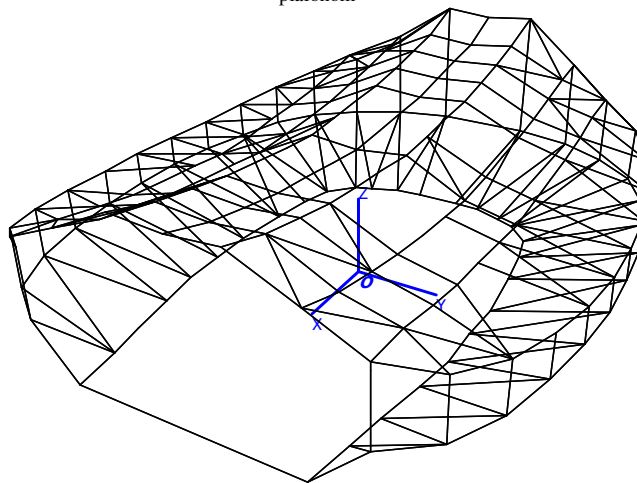
Svi prikazani modeli realizovani su tako da imaju uniformu raspodelu koeficijenta apsorpcije na površinama, i usvojeno je da to bude vrednost 0,1. Cilj toga je da se umanjuje efekat apsorpcije i tako učini prepoznatljivim uticaj geometrijskih karakteristika na tokove saobraćaja zvučne energije po prostoriji i po pojedinim površinama. Zvučno polje u modelima je simulirano sa slučaj uniformne raspodele koeficijenta difuznosti površina i njegova vrednost je varirana u sledećim koracima: 0.1, 0.3, 0.5 0.7 i 0.9.



Slika 1. Model paralelopipedne prostorije



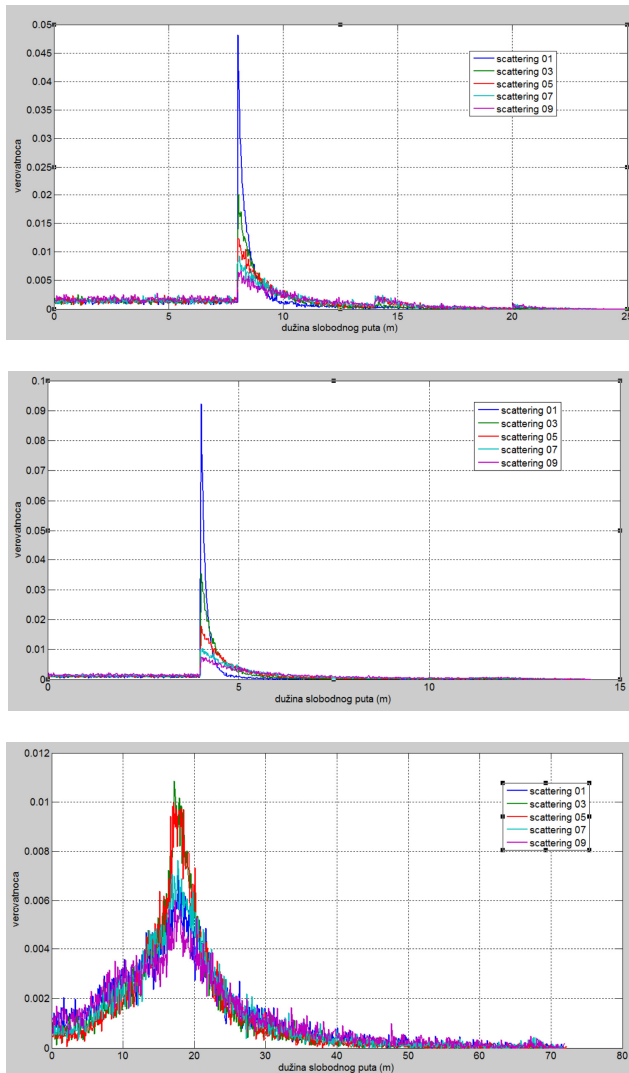
Slika 2. Model prostorije sa mnogouglaom osnovom i ravnim podom i plafonom



Slika 3. Model sportske dvorane "Morača" u Podgorici

Izračunate raspodele slobodnih putanja u posmatranim modelima prikazane su na slici 4. Sa ovih dijagrama se vidi da se u svim modelima u raspodeli slobodnih putanja javlja jedan izraziti maksimum. Kod modela 1 i 2 taj maksimum je nesimetričan, što je posledica postojanja velikih paralelnih površina. Nasuprot tome, u modelu 3 maksimum raspodele je

simetričan u odnosu na maksimalnu vrednost. To je posledica složenog oblika prostorije i složenosti slobodnih putanja u njoj. Promena vrednosti koeficijenta difuznosti površina utiče na oblik maksimuma u raspodeli, ali se pri tome ne menja njen oblik.



Slika 4. Raspodele slobodnih putanja u modelima: gore – model 1, u sredini – model 2, dole – model 3.

Iz oblika raspodela sa slike 4 ne može se naslutiti uloga pojedinih površina u ukupnom energetskom bilansu u zvučnom polju unutar prostorija. Zbog toga je pomoću realizovanog softvera izračunata energija koja pogađa svaku pojedinačnu površinu. Ona je izražena relativno u odnosu na ukupnu energiju koja saobraća u prostoriji i u odnosu na udeo svake pojedinačne površine u ukupnoj unutrašnjoj površini prostorije. Na osnovu toga je za svaku površinu izračunata površinska gustina energije na njoj normalizovana na srednju površinsku gustinu incidentne energije za čitavu prostoriju dobijenu statističkim modelom zvučnog polja u prostoriji.

Na slikama 5, 6 i 7 prikazana su rezultati takvih proračuna.

Prikazana su procentualna premašenja srednje površinske gustine energije po pojedinim površinama ili grupama površina za tri analizirana modela prostorija. Na slikama je srednja vrednost intenziteta zvuka prema statističkom modelu označena crvenom horizontalnom linijom (100%), pa se sve ostale vrednosti mogu porediti sa njom

### III. DISKUSIJA

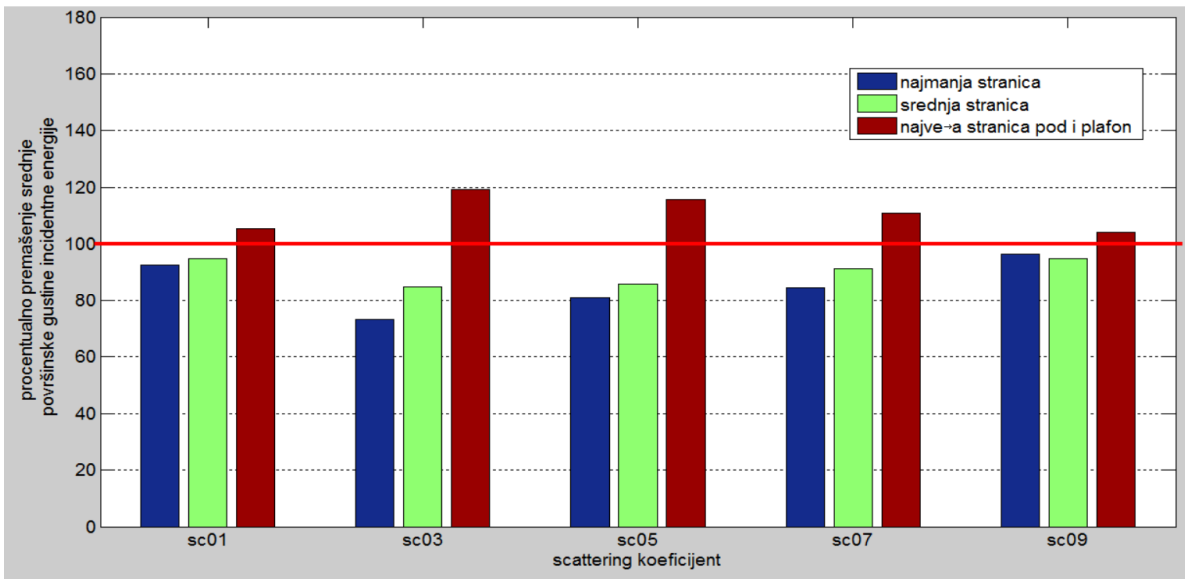
Količina energije koja pogađa svaku površinu u prostoriji određena je strukturom saobraćaja zvučne energije po prostoru, a to znači geometrijom prostorije i difuznim karakteristikama svih unutrašnjih površina. To znači da se sa varijacijama difuznosti površina menja i količina energije koja pogađa pojedine površine.

Analiza odziva u prostoriji paralelopipednog oblika pokazala je da je najveća površina u njoj (pod, plafon) pogođena najvećom površinskom gustinom zvučne energije. Za vrednosti koeficijenta difuznosti od 0.3 gustina energije koja pogađa najveću površinu u prostoriji premašuje statistički očekivanu vrednost za oko 20%. Ove dve velike površine pogađa veća gustina zvučne energije u svim analiziranim stanjima difuznosti. Istovremeno, najmanja površina u istoj prostoriji pri istoj vrednosti koeficijenta difuznosti 0.3 pogođena je površinskom gustinom energije koja je za 25% manja od srednje vrednosti.

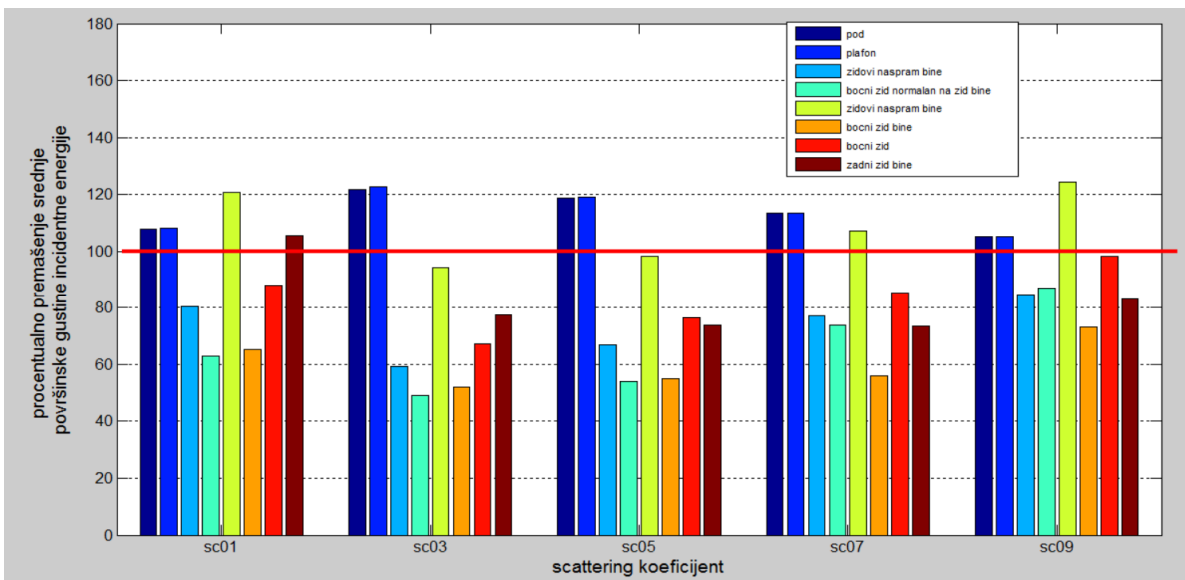
Sve ove činjenice posredno govore o efektivnoj apsorpciji koju će neki materijal ispoljiti kada se nađe na određenoj poziciji u prostoriji. Primenjeno na praktične okolnosti akustičkog dizajna jedne takve prostorije to znači da će isti apsorpcioni materijal biti efikasniji na njenom plafonu, nego na najmanjem zidu. Pri tome se njegoja efikasnost meri uticajem na reverberacioni proces i dobijenu vrednost vremena reverberacije. Drugim rečima, sa istom površinom apsorpcionog materijala više će se smanjiti vreme reverberacije ako se on postavi na plafon, nego na dva najmanja zida.

Drugi model prostorije prikazan na slici 2 ima sličnu raspodelu slobodnih putanja, što se vidi na slici 4. Analiza kretanja zvučne nergije po ovoj prostoriji pokazuje da su najveće površine u njoj, međusobno paralelni pod i plafon, takođe pogođene sa procentualno većom gustinom energije nego ostale površine. Prema tome, to je ista osobina kao u paralelopipednoj prostoriji. Na slici 6 prikazana su procentualna premašenja površinske gustine energije na svim pojedinačnim unutrašnjim površinama. Najefikasnije korišćenje apsorpcionog materijala u ovakvim prostorijama je na njenim najvećim paralelnim površinama. S obzirom na prethodni rezultat dobijen u paralelopipednoj prostoriji može se zaključiti kao univerzalno pravilo da najveće paralelne površine dobijaju na sebi i najveću gustinu zvučne energije.

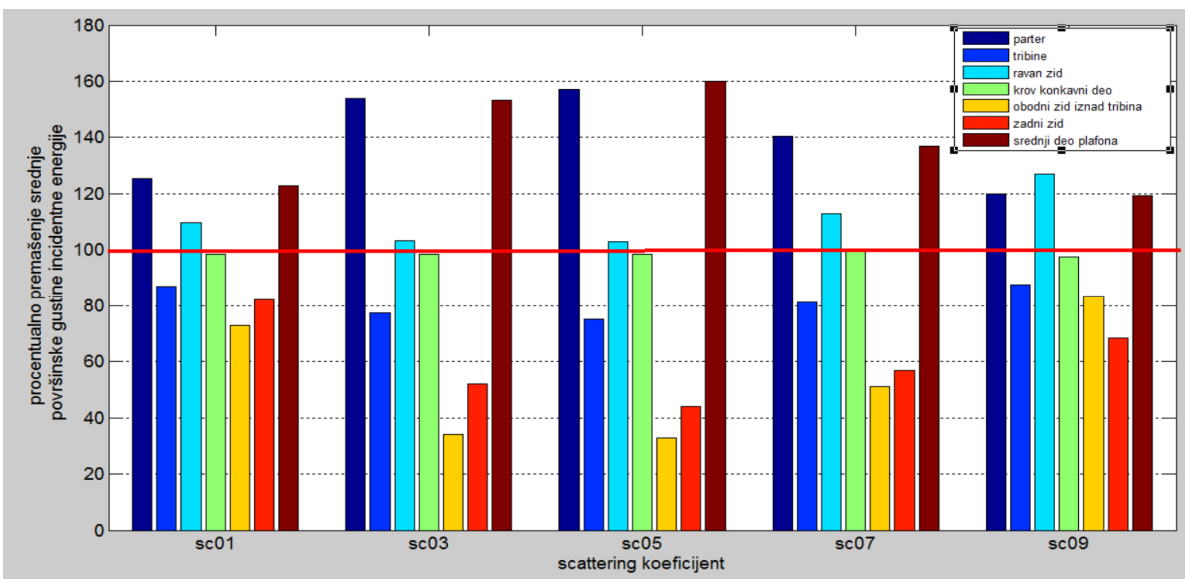
Model prikazan na slici 3 predstavlja primer jedne sportske hale složenog oblika, sa konkavnim krovom i sa tribinama karakterističnim za geometriju sportskih hala. Ova prostorija ima veliki broj površina, pa bi prikazivanje gistine energije za sve njih bilo teško čitljivo sa dijagrama zadatih dimenzija. Zbog toga je u prezentaciji veliki broj površina koje čine ovaj model grupisano po nekim kategorijama kako bi se pojednostavilo tumačenje rezultata.



Slika 5. Procenatno premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 1 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.



Slika 6. Procenatno premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 2 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.



Slika 7. Procenatno premašenja izračunate vrednosti srednje površinske gustine energije u modelu 3 u odnosu na statistički očekivanu vrednost.

Na slici 9 prikazana su procentualna premašenja površinskih gustina energije usrednjena po svim površinama iz neke definisane skupine površina. Izdvojene su površine koje čine parter, kompletne tribine (koje su svrstane u jednu kategoriju iako svi delovi tribina nemaju identičnu ulogu u formiranju zvučnog polja), konkavni delovi krova, centralni deo krovne površine, veliki ravni čeon i zid iznad tribina.

Sa dijagrama se vidi da tribine predstavljaju površine koje sa manjim udelom učestvuju u apsorpciji zvučne energije jer je gustina energije na njima najmanja. Ovo je opšta karakteristika u prostorijama ovakvog ili sličnog oblika karakterističnog za sportske hale. U posmatranoj prostoriji površina partera i površina srednjeg dela krova predstavljaju zone koje su pogođene procentualno najvećom površinskom gustinom energije. Sa dijagrama se takođe vidi da konkavni delovi krova imaju površinsku gustinu energije koja odgovara onoj koja se očekuje u difuznom polju, bez obzira na varijaciju vrednosti koeficijenta difuznosti na površinama u prostoriji. Prema rezultatima prikazane analize najefikasnija upotreba apsorpcionog materijala u prostoriji sa slike 3 je u centralnoj zoni krova.

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza raspodele gustine incidentne zvučne energije po unutrašnjim površinama u tri odabrana modela prostorija. Analiza zvučnog polja je sprovedena rej trejsing algoritmom pomoću specijalizovanog softvera za modelovanje zvučnog polja u prostorijama. Njegova namena su sofisticirani oblici analize koje nije moguće sprovesti komercijalnim softverima.

Analiza zvučnog polja u tri odabrane prostorije različitih oblika pokazala je da postoje razlike u gustini zvučne energije koja pogađa različite delove unutrašnjih površina. Time se može objasniti različita efikasnost istih aporpcionih materijala postavljenih na različitim delovima prostorije.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je napravljen kao deo istraživanja u okviru projekta broj TR36026 koga finansira Ministarstvo prosvete,

nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] D.Šumarac Pavlović, „Uticaj geometrijskih karakteristika prostorije na njen akustički odziv“, Doktorska disertacija, Beograd, 2007.
- [2] 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 (2007) 1012-1026
- [3] 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, 459-463
- [4] H.Kurtović, „Osnovi tehničke kaustike“, Tehnička knjiga, Beograd, 1978.

#### ABSTRACT

The sound field in room is determined by the absorptive, reflective and diffuse characteristics of interior surfaces. Acoustic efficiency of materials applied at different surfaces in room acoustic design depends on the way they are hitting by sound energy. Commercial software for simulation provide insight into the global characteristics of the sound field in room on the basis of the calculated monaural and binaural impulse response, but not the contribution of each individual surface. In order to analyze their contribution to the sound field total energy a ray-tracing-based software for simulation is developed that provides such analysis for each inner surface. Their contribution can be quantified by surface density of incident energy that hits the surface, which determines its effective absorption capacity in the room. Possible deviations in the surface energy density distribution that hits the surface was analysed for different macro and micro geometrical characteristics of room. Knowledge about these distributions allows more efficient distribution of available absorption materials, but also allows an analysis of the efficiency of sound insulation between rooms.

#### **Analysis of incident energy distribution at room's interior surfaces by software simulation**

Srđan Bojičić, Dragana Šumarac Pavlović, Ivana Ristanović, Miomir Mijić