

RASPODELA DUŽINA SLOBODNOG PUTA U PROSTORIJI KAO ALAT U AKUSTIČKOM DIZAJNU

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu.*

Sadržaj – Svakoj geometrijskoj formi prostora svojstvena je određena karakteristična raspodela slobodnih putanja. Geometrijsko modelovanje pomoću rej-trejsing algoritma omogućava izračunavanje raspodele slobodnih putanja. Oblik ove raspodele determinisan je geometrijskim karakteristikama prostora koje na akustički odziv deluju na mikro i makro planu. Na bazi korpusa od preko 50 softverskih modela prostorija izvršene su analize impulsnog odziva i raspodele slobodnih putanja, na osnovu kojih je analizirana korelacija između oblika raspodele i odziva prostorije.

1. UVOD

Akustički odziv u prostoriji uslovljen je dvema geometrijskim karakteristikama: globalnom geometrijskom formom i karakteristikama refleksija na unutrašnjim površinama. One su označene kao uticaj na makro planu (opšta forma) i mikro planu (karakteristika refleksija). Ovi uticaji se mogu kvantifikovati veličinom odstupanja izmerenih vrednosti vremena reverberacije od očekivanih vrednosti dobijenih pomoću neke varijante statističkog matematičkog modela, kao što su Sabinova ili Ajringova formula. Svakoj geometrijskoj formi prostorije svojstvena je neka raspodela slobodnih putanja. U tom smislu, geometrijski oblik krive raspodele može se posmatrati kao jedan specifičan podatak koji na specifičan način opisuje zbivanja u zvučnom polju. Time se raspodela uvodi kao sredstvo za bolju predikciju akustičkog odziva prostorije.

Raspoloživi softverski alati za predikciju zvučnog polja zasnovani na geometrijskom modelu omogućavaju detaljniji uvid u kretanje zvučne energije po prostoru. Kao rezultat praćenja geometrijske sudbine zvučnih zraka koji se kreću po prostoriji može se za svaki konkretan geometrijski oblik prostorije dobiti i njegova raspodela slobodnih putanja. Na taj način, omogućena je analiza i uspostavljanje korelacija između geometrijskih karakteristika prostorije i verovatnoće dužine putanja zvuka u njoj.

Cilj ovog rada je da prikaže geometrijske karakteristike prostorije kao faktor koji utiče na akustički odziv. Prikazane su i neke mogućnosti predikcije tog uticaja na osnovu osobina raspodele slobodnih putanja.

2. REZULTATI PRETHODNIH ISTRAŽIVANJA

U prethodnom radu istih autora postojanje uticaja geometrijske forme prostorije na njen akustički odziv verifikovan je na primeru Srpskih pravoslavnih crkava [1]. Analiza zasnovana na rezultatima merenja u velikom broju crkvenih prostora pokazala je značajnu zavisnost akustičkog odziva od geometrijskog oblika crkve. Rezultati dobijeni ovim istraživanjem ilustrovani su na Slici 1. Za dva geometrijski izrazito različita oblika crkava: crkve sa razuđenom strukturom, dubokim bočnim i oltarskim apsidama i velikom kupolom (tip 1) i jednobrode građevine

kompaktne strukture, u osnovi paralelopipednog oblika (tip 2). Prave linije na slici predstavljaju linearnu aproksimaciju rezultata merenja u dva posmatrana tipa crkava.

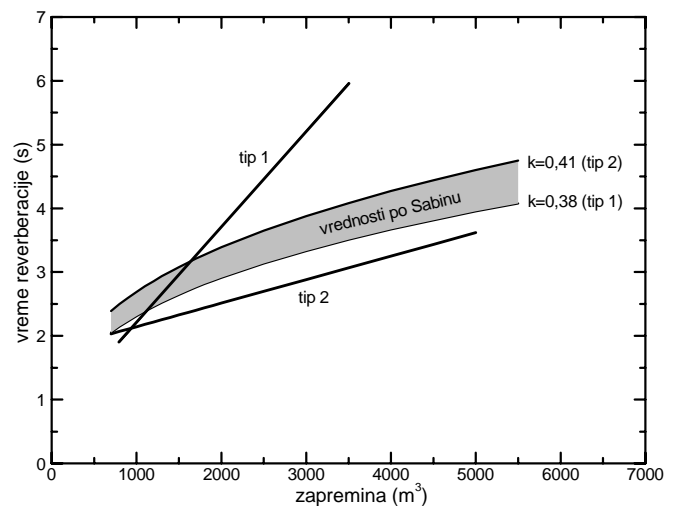
Na dijagramu je takođe senčenjem označena oblast vrednosti očekivanog vremena reverberacije u istim crkvama, koje se dobija na osnovu Sabinovog obrazca. Naime, svaki oblik prostorije može se okarakterisati jednim parametrom koji se naziva "faktor oblika", i definisan je sa:

$$k = \frac{\sqrt[3]{V}}{\sqrt{S}}$$

Faktor oblika je bezdimenzionalan, i ima konstantnu vrednost za određeni oblik, jer ne menja svoju vrednost sa promenom zapremine, odnosno njenim skaliranjem. Transformisana Sabinova formula, izražena pomoću ovog parametra, ima oblik:

$$T = \frac{0.16}{\alpha} k^2 \sqrt[3]{V}$$

Na osnovu izračunatih vrednosti faktora oblika za oba karakteristična tipa crkava izračunata je oblast očekivanih vrednosti vremena reverberacije, i te vrednosti su na Slici 1 označene sivom zonom.



Slika 1. Poređenje izmerenih vrednosti vremena reverberacije u dva geometrijska tipa crkava (linearna aproksimacija izmerenih vrednosti) i rezultati dobijeni Sabinovom formulom (osenčena površina) [1]

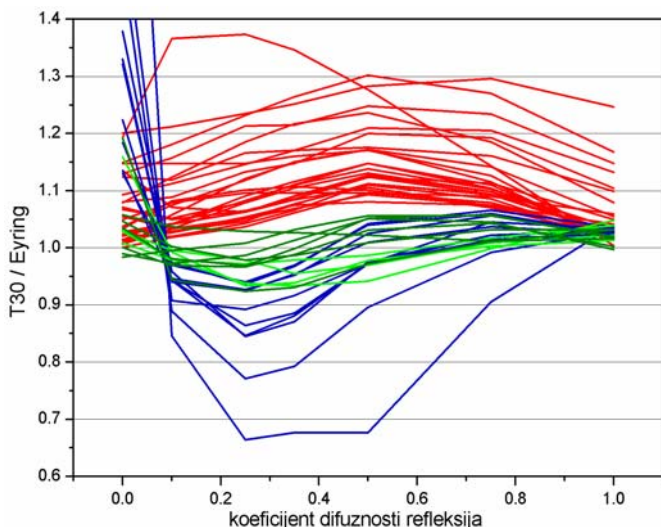
Potpuno isti uticaj geometrijskog oblika primećen je kako u rezultatima merenja u realnim crkvama, tako i u rezultatima simulacije primenom geometrijskog modela [1]. S obzirom da se i geometrijskom teorijom, odnosno rej-trejsing procedurama, vidi fenomen uticaja oblika prostora na akustički odziv, dalja istraživanja fokusirana su na analizu pomoću softverskih modela prostorija.

3. AKUSTIČKI ODZIV U RAZLIČITIM GEOMETRIJSKIM OBLICIMA PROSTORIJA

Da bi se sagledao uticaj geometrijskog oblika na akustički odziv, pomoću softverskog paketa ODEON realizovao je više od 50 modela različitih prostorija. Sve oni se mogu podeliti u četiri grupe prostorija. Prvu grupu čine prostorije koje imaju elementarne geometrijske forme: paralelepiped, kocka, prizma, elipsoid, sfera, kao i njihove različite modifikacije i kombinacije. Drugu grupu čine paralelepipedne prostorije kojima je na razne načine narušavana geometrijska proporcionalnost ili simetrija. Treću grupu čine složene forme nastale kao kombinacija sfernih i ravnih površina. I na kraju, realizovan je određeni broj modela postojećih pozorišnih, koncertnih, sportskih i verskih objekata.

U svim posmatranim modelima promena geometrije na mikro planu simulirana je različitim vrednostima koeficijenta difuznosti refleksija (*scattering* koeficijent - SC). Ovaj koeficijent menjan je uniformno u sedam koraka, u opsegu od 0 do 1 (0, 0.1, 0.25, 0.35, 0.5, 0.75, 1). Svim površinama dodeljen je koeficijent apsorpcije 0.1 da bi se minimizirao uticaj apsorpcije na akustički odziv. Tako je omogućeno da se dominantno posmatra uticaj geometrijskih karakteristika na mikro i makro planu.

U modelima je izvršena simulacija i izračunavanje impulsnog odziva. Na osnovu izračunatih krivih opadanja određene su vrednosti vremena reverberacije (T30). Da bi se omogućilo međusobno poređenje rezultata, sve izračunate vrednosti normalizovane su na vrednost koja se za polazne podatke o zapremini i ukupnoj apsorpciji očekuju po Ayringovom obrascu.

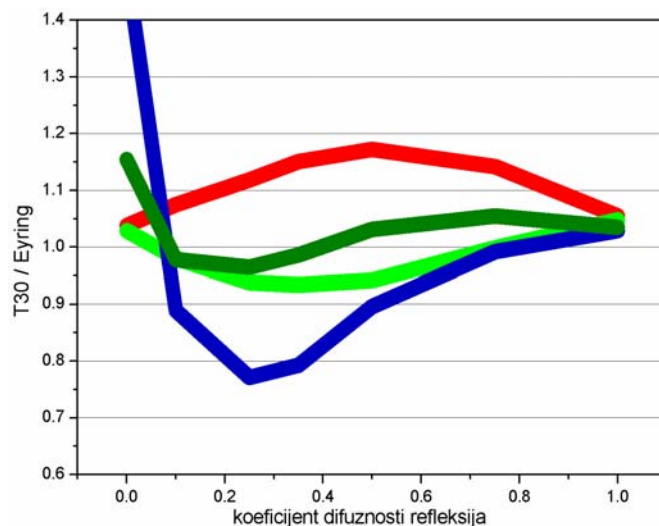


Slika 2. *Relativne vrednosti vremena reverberacije u funkciji promene koeficijenta difuznosti za sve posmatrane modele prostorija*

Odstupanje vrednosti vremena reverberacije izračunatih u modelima pomoću rej-trejsing analize od statističkih vrednosti prikazano je na Slici 2. Odstupanja su nacrtana u funkciji SC čija je vrednost menjana na svim unutrašnjim površinama. Sa dijagrama se vidi da postoje oblici prostorija kod kojih je to odstupanje pozitivno ($T_{30} > \text{statističke vrednosti po Ayringu}$) i kod kojih je ono negativno. Svi prikazani dijagrami dobijeni su za $\alpha = 0.1$ i za oktavni opseg od 500 Hz, gde se može smatrati da je disipacija u vazduhu zanemarljiva. Provere su pokazale da na višim frekvencijama

razlike u odnosu na statističku teoriju postaju nešto drugačije, Zbog disipacije u vazduhu u najvišim oktavama uticaj geometrijskog oblika na odziv postaje manje značajan.

Slika 2 pokazuje da odziv prostorije zavisi od njenog geometrijskog oblika i koeficijenta difuznosti refleksija. Među svim dobijenim rezultatima mogu se prepoznati četiri moguće klase oblika prostorija, razvrstane po obliku krive njihovog odstupanja sa Slike 2. One su prikazane na Slici 3. Svaka klasa simbolično je predstavljena jednom krivom u boji.

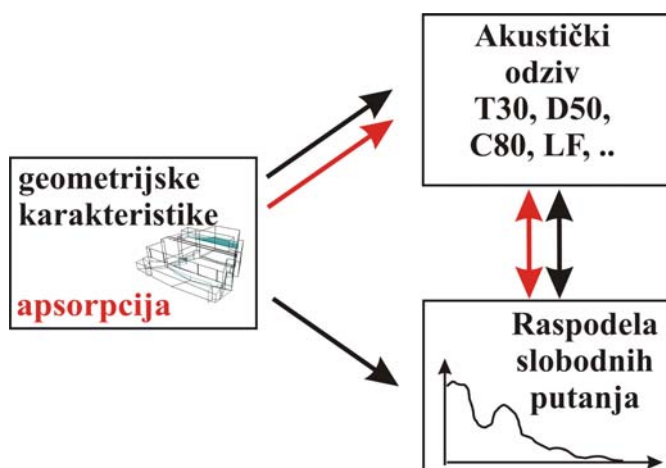


Slika 3. *Četiri grupe različitih odstupanja vremena reverberacije od statističkih vrednosti u različitim geometrijskim oblicima prostorija.*

Prvu prepoznatu grupu čine prostorije u kojima je odstupanje od statističkih vrednosti pozitivno za sve vrednosti SC (crvena linija na Slici 3). Za neke vrednosti SC ova odstupanja mogu biti preko 20%. U drugu grupu spadaju oblici kod kojih se za vrednosti SC od 0.2 do 0.4 javljaju negativna odstupanja, čak do 30% u odnosu na statističke vrednosti (plava linija na Slici 3). U treću grupu spadaju oblici kod kojih se odstupanja kreću od negativnih ka pozitivnim sa povećanjem SC, i to oko maksimalnih vrednosti od 5% (tamno zelena na Slici 3). Poslednja prepoznata grupa prostorija po svom odzivu predstavlja suprotnost prvog grupi, odnosno kod njih se javlja negativno premašenje statističkih vrednosti, sa najvećom devijacijom za vrednosti SC oko 0.5 (svetlo zelena na Slici 3).

4. RASPODELA SLOBODNIH PUTANJA U ANALIZI AKUSTIČKOG ODZIVA

Akustički odziv u prostoriji određen je karakteristikama u dva domena. To su geometrijske karakteristike, predstavljene oblikom, veličinom i difuznošću, i količina apsorpcije. Sve razlike u akustičkom odzivu koje se javljaju u prostorijama posledice su kako razlika u pomenuta dva domena, tako i njihovog međusobnog uticaja. Posebno su značajne međusobne relacije faktora iz ova dva domena, tako da će promena apsorpcije u prostoriji imati različit uticaj kod prostorija različitog oblika. Ove relacije između akustičkog odziva i karakteristika prostora šematski su prikazane na Slici 4.



Slika 4. Šematski prikaz mogućeg mesta raspodele slobodnih putanja u analizi akustičkog odziva prostorije.

Akustički odziv prostorije uobičajeno se opisuje grupom jednobrojnih parametara koji se dobijaju izračunavanjem iz impulsnog odziva. Prema tome, kroz njihove vrednosti se odslikava uticaj faktora iz oba domena, kao i njihove međuzavisnosti. Da bi se analizirao nezavistan uticaj geometrijskih faktora na odziv, u ovoj analizi je posmatrana raspodela slobodnih putanja, koja isključivo zavisi od geometrijskih faktora, a ne i od apsorpcije. Ova veza je na Slici 4 označena crnom strelicom. Osnovna ideja posmatranja različitih modela prostorija je da se izvrši kvantitativna i kvalitativna analiza raspodele slobodnih putanja u njima, i da se, ako je to moguće, uspostave relacije sa akustičkim parametrima koji se dobijaju iz impulsnog odziva, što je takođe označeno strelicom na Slici 4. Kvantifikatori raspodele slobodnih putanja treba da posluže i u boljoj predikciji uticaja promene apsorpcije na konačan odziv.

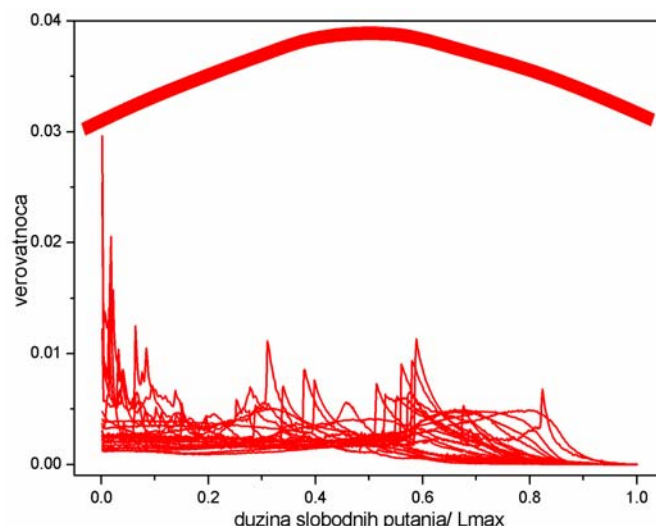
5. OSNOVNE KARAKTERISTIKE RASPODELA SLOBODNIH PUTANJA

Raspodela slobodnih putanja u različitim geometrijskim formama prostora može imati veoma kompleksne oblike. Pri tome se u svim prostorijama raspodele uglavnom sastoje od nekih elementarnih formi, kao i njihovih varijacija. Osnovna forma koja se javlja u raspodelama je jedan ili više lokalnih maksimuma. Oni, sami za sebe, mogu imati različite oblike: asimetričnu formu sa eksponencijalnim opadanjem na desno, simetrične ili kvazisimetrične forme sa eksponencijalnim opadanjem, i formu gausovog tipa. Takvi maksimumi mogu biti oštri i jako naglašeni ili zaobljeni. Razlike u formi tih lokalnih ekstremuma ukazuju na razlike u kretanju energije po prostoriji. Pored pojave maksimuma, u nekim prostorima raspodela može imati srazmerno veliku verovatnoću pojave kratkih putanja. U slučaju složenih geometrijskih formi raspodela se može posmatrati kao superpozicija osnovnih formi.

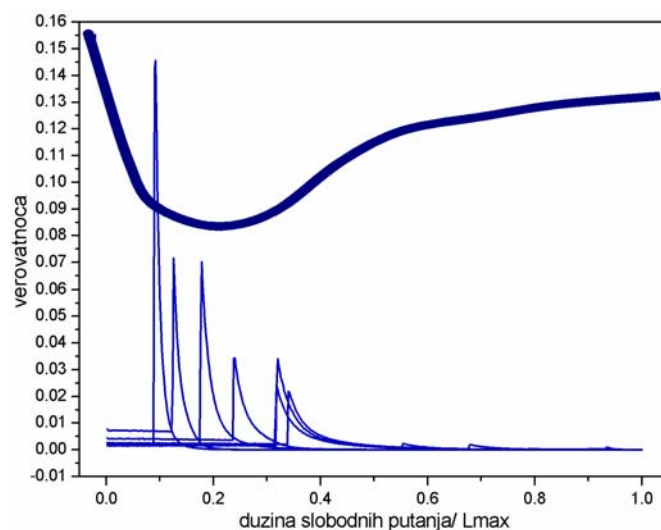
Za sve analizirane modele prostorija izračunate su raspodele slobodnih putanja pri različitim vrednostima koeficijenta difuznosti. Svaka raspodela je normalizovana na maksimalnu dužinu putanje koja se javlja u prostoriji (L_{max}), što čini da je ona uvek definisana u intervalu (0,1). Sve raspodele su takođe i diskretizovane u 500 ekvidistantnih tačaka. Takvim transformacijama omogućeno je međusobno poređenje raspodela izračunatih u različitim okolnostima.

Poredeći odzive prikazane na Slici 2 i oblike raspodela u svim analiziranim oblicima, mogu se uspostaviti određene korelacije.

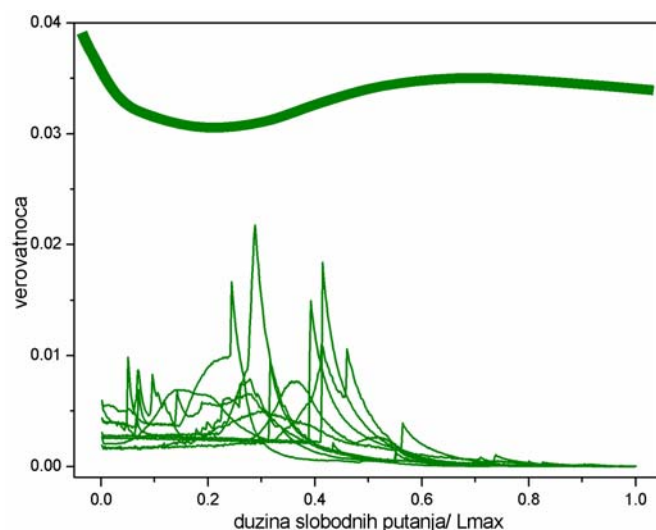
Na slikama 5, 6, 7 i 8 prikazane su raspodele u skladu sa prethodno uvedenom kategorizacijom geometrijskih formi.



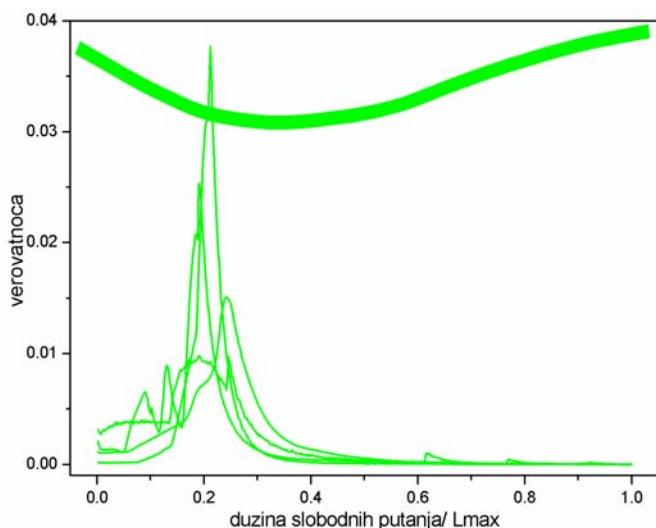
Slika 5. Raspodele slobodnih putanja za prvu kategoriju.



Slika 6. Raspodele slobodnih putanja za drugu kategoriju.



Slika 7. Raspodele slobodnih putanja za treću kategoriju



Slika 8. Raspodele slobodnih putanja za četvrtu kategoriju

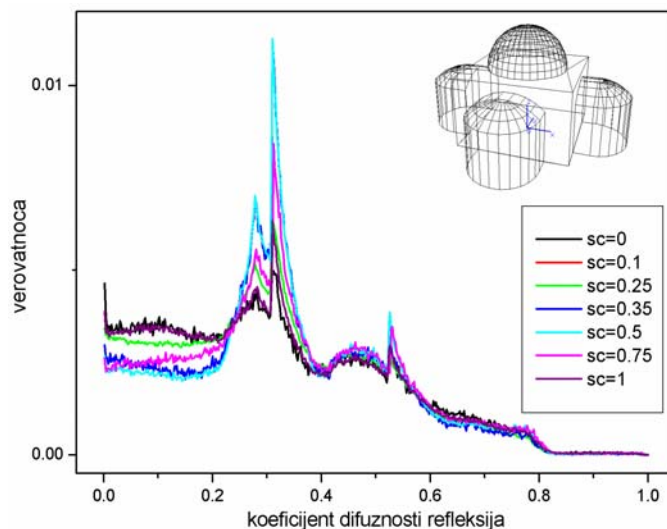
Generalna karakteristika raspodele za prvu kategoriju objekata (Slika 5) je povećana verovatnoća pojave kratkih putanja i relativno uniformna verovatnoća u širokom opsegu normalizovanih vrednosti dužina putanja, sve to 0.9. U nekim oblicima prostorija iz ove kategorije javljaju se nagomilavanje putanja i na relativno velikim vrednostima, reda 0.8. U raspodelama se pojavljuju lokalni maksimumi, ali maksimalne vrednosti verovatnoće retko prelaze 0.05. Dominantna karakteristika raspodela slobodnih putanja u drugoj kategoriji prostorija (Slika 6) je pojava veoma izraženih lokalnih nesimetričnih maksimuma. Ovakvi maksimumi se javljaju između parova naspramnih stranica i pa se može reći da se kretanje zvučne energije dominantno odvija između njih. Raspodela u trećoj kategoriji prostorija, u kojima odziv pokazuje najmanje odstupa od statističkih vrednosti, može se okarakterisati koncentracijom dužina na vrednostima manjim od 0.5 i sa verovatnoćama koje ne prelaze 0.02. Na kraju, četvrtu klasu prostorija karakterišu raspodele sa izraženim simetričnim maksimumima, čija verovatnoća u najvećem broju slučajevima ne prelaze vrednost 0.02.

Određen broj eksperimenata je izvršen da bi pokazao uticaj promene koeficijenta difuznosti refleksija na raspodelu slobodnih putanja. Vrednost SC je menjana u nekoliko koraka u rasponu od 0 do 1. Na Slici 9 prikazane su raspodele slobodnih putanja izračunate u modelu jedne crkve sa velikom kupolom i dubokim bočnim apsidama, pri različitim vrednostima uniformno zadatog koeficijenta difuznosti refleksija. Sa ove slike se vidi da promene u vrednosti SC ne menjaju generalni oblik raspodele, već samo menjaju relativne odnose verovatnoća pojave određenih dužina putanja.

6. ZAKLJUČAK

Raspodela slobodnih putanja u prostoriji može se u svakodnevnoj praksi koristiti kao dodatni izvor informacija za razumevanje i kontrolu akustičkog odziva. Moguća primena analize raspodele i poznavanja korelacija sa akustičkim odzivom može se koristiti u više pravaca: u akustičkom dizajnu, u interpretiranju rezultata merenja i za kalibraciju softverskih modela kada se koriste za predikciju zvučnog polja.

Poznavanje osnovnih osobina raspodele slobodnih putanja i njene korelacije sa akustičkom odzivom može se u akustičkom dizajnu koristiti na više načina. Moguća primena je u prostorijama gde klasične akustičke intervencije nisu dozvoljene. Takav primer su crkve, u kojima se klasična akustička obrada u vidu apsorpcionih materijala ne primenjuje. Analizom raspodele slobodnih putanja može se utvrditi koje geometrijske promene treba načiniti da bi se odziv pomerio u željenom pravcu. Analiza raspodele takođe može da odgovori na pitanje u kojoj meri će promena geometrije na mikro nivou uticati na promenu odziva pri zadatoj geometrijskoj formi prostorije. Najzad, podaci koji se dobijaju iz raspodela mogu pomoći u efikasnijoj upotrebi apsorpcionih materijala.



Slika 9. Ilustracija uticaja promene koeficijenta difuznosti refleksija na promenu raspodele slobodnih putanja na primeri jednog oblika prostorije.

7. LITERATURA

- [1] D. Sumarac Pavlović, M. Mijić, "An insight into the influence of geometrical features of rooms on their acoustic response based on results of measurements in Serbian orthodox worship", poslato za publikovanje
- [2] D. Sumarac Pavlović, M. Mijić, "An insight into the influence of geometrical features of rooms on their acoustic response based on free path length distribution", poslato za publikovanje

Abstract - Each room geometrical form has its characteristic free path distribution. Sound field modeling by ray-tracing enable the calculation of such distribution in particular rooms. Shape of the distribution, determined by room geometrical characteristics, influence its acoustic response at macro (shape) and micro (scattering) level. Analyses of acoustic response and free path distribution have been done using over 50 room software models, and correlation between distribution shape and room response is presented in this paper.

MEAN FREE PATH DISTRIBUTION AS A TOOL IN ACOUSTIC DESIGN

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić