

O ulozi akustičkih rezonatora u prostoru hrama Svetog Save u Beogradu

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Jelena Erdeljan, Tatjana Miljković

Apstrakt— Akustički rezonatori su naprave od davnina korišćene u crkvama sa idejom da se pomoću njih na neki način kontroliše zvučni odziv prostora. Projekat hrama Svetog Save u Beogradu svojevremeno je predvideo ugradnju 476 posebno dizajniranih rezonatora da bi se umanjila očekivana reverberacija u njegovoj velikoj zapremini od 117.000 m³. Tokom izrade mozaika kojim je oslikan hram tako veliki broj rezonatorskih otvora relativno velikog prečnika otežavao je montažu kamenih elemenata mozaika. Zbog toga se nametnulo pitanje njihove nužnosti i svrsishodnosti u hramu i pokrenuto je istraživanje realne efikasnosti ugrađenih rezonatora i rizika koje nosi njihovo eventualno zatvaranje. Tadašnja analiza je malo proširena i ukupni rezultati do kojih se došlo prikazani su u ovom radu.

Ključne reči — akustički odziv; akustički rezonatori; crkve, Hram Svetog Save.

I. UVOD

Nesumnjivo najznačajniji sakralni objekat u Srbiji je hram Svetog Save. Izgrađen je na vrhu Vračarskog brda u Beogradu, pa zahvaljujući svom položaju, ali i fizičkoj monumentalnosti, dominira Beogradom i vidljiv je s velikog dela teritorije grada. Navodi se da je Hram po zapremini glavnog molitvenog prostora najveća aktivna pravoslavna crkva na svetu [1]. Njegova zapremina, preciznije unutrašnji vazdušni prostor, zauzima oko 117.000 m³.

Aktivnosti na izgradnji hrama započete su još 1895. godine kada je u Beogradu osnovano „Društvo za podizanje hrama Svetog Save na Vračaru“. Društvo je 1905. godine raspisalo arhitektonski konkurs za idejno rešenje hrama. Zanimljivo je da su svi prispeli radovi, a prispelo ih je samo 5, odbačeni kao nedovoljno dobri. Nakon I svetskog rata Društvo je obnovilo rad i 1926. godine raspisan je novi konkurs. Kao najuspešniji proglašen je rad arhitekta Bogdana Nestorovića, pa je Društvo 1930. godine poverio izradu projekta arhitektama Nestoroviću i Aleksandru Deroku. Izgradnja hrama je konačno započela 15. septembra 1935. godine.

Od početka građevinskih radova do nemačke okupacije 1941. godine izgrađeni su temelji hrama i podignuti zidovi visine od 7 do 11 m. Stariji beograđani pamte takvo njegovo stanje sa poluizgrađenim zidovima od opeke. S Drugim svetskim ratom „Društvo za izgradnju hrama“ je prestalo da postoji.

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

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

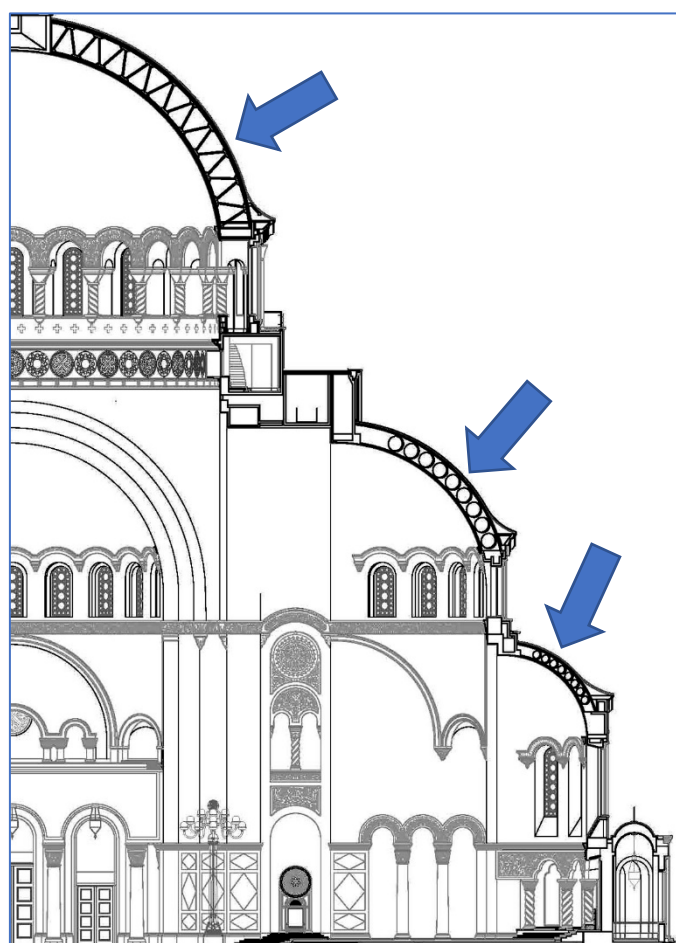
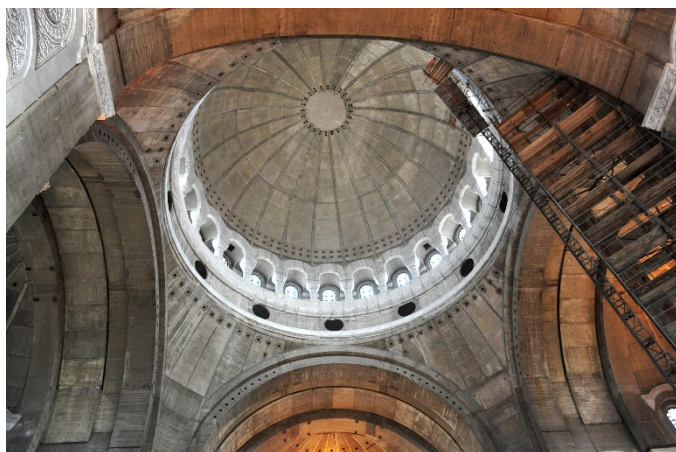
Nastavak gradnje hrama započeo je 1984. godine, a za novog arhitektu hrama imenovan je arhitekta Branko Pešić. Gradnja objekta je u građevinskom smislu završena 2004. godine. Međutim, radovi na unutrašnjem uređenju i dekoraciji dovršeni su značajno kasnije, da bi se otvaranje hrama ozvaničilo tek nedavno, krajem 2021. godine nakon završetka oslikavanja mozaikom i finalizacije većine prostora u hramu (iako se u njemu još uvek odvijaju građevinski i instalaterski radovi).

Svakako je zanimljivo da su u projektovanju hrama tokom osamdesetih godina dvadesetog veka projektanti razmatrali i akustičke aspekte. Kao akustički konsultant angažovan je Stevan Milosavljević. Tokom rada na projektu doneta je odluka da se kontrola akustičkog odziva prostora hrama realizuje pomoću akustičkih rezonatora, svakako imajući u vidu brojne informacije o njihovom postojanju u srednjovekovnim crkvenim prostorima. Neki od radova koji obrađuju tu temu pobrojani su u spisku literature na kraju ovog rada [2-9]. Činjenica je da radovi o rezonatorima u crkvama koji se mogu naći u raznorodnoj literaturi većim delom nisu inženjerski, preciznije akustičarski. Postoje brojni radovi koji su rezultat analiza koje su sprovodili arheolozi, istoričari umetnosti, arhitekta i drugi autori iz oblasti tangentnih sa akustikom.

Ideja o rezonatorima kao sredstvu za kontrolu akustičkog odziva u hramu inicirala je u vreme projektovanja opsežnu studiju o kojoj je pisao D.Kalić [10]. Dimenzije rezonatora prikazane u njegovom radu određene su na osnovu prethodno usvojene odluke o potrebnim rezonantnim frekvencijama u zadatom prostoru. Rezonatori imaju formu betonskih kocki sa okruglim otvorom na prednjoj strani. Primenjena su dva tipa rezonatora, manji i veći. Veći rezonatori imaju dužinu stranice 1,1 m i proračunom utvrđenu rezonantnu frekvenciju 125 Hz, a manji su sa stranicom 55 cm i proračunom utvrđenom rezonantnom frekvencijom 250 Hz. U hramu je projektom predviđeno ukupno 476 takvih rezonatora. Njihove pozicije su vidljive na fotografiji prikazanoj na slici 1. Rezonatori su postavljani u površine gornje zone hrama, u kupoli i svim bočnim svodovima, očigledno prema realnim mogućnostima ugradnje takvih relativno velikih kutija u građevinske strukture. Naime, na tim delovima građevinske konstrukcije hrama postoji dvostruka betonska ljuska. To je omogućilo da prisustvo nezavisnih celina kakve su kutije rezonatora ne ugrožavaju statiku objekta. Bliski poled na dva rezonatora u ugrađenom stanju prikazan je na slici 2.

Jelena Erdeljan – Filozofski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Čika Ljubina 18-20, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: @).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).



Sl.1. Gore - izgled unutrašnjosti hrama pre postavljanja mozaika sa vidljivom otvorima rezonatora oko kupole (fotografija je napravljena 2010. godine, to jest pre postavljanja mozaika); dole – označene pozicije dvostrukih betonskih struktura kupole i svodova vidljive u preseku u koje su ugrađeni rezonatori.

Oslikavanje hrama, a posebno odluka da se za to koristi mozaik kao tehnika, otvorilo je neke praktične probleme koji očigledno nisu uzeti u obzir pri projektovanju takve akustičke obrade prostora. Problemi su posledica činjenice da na unutrašnjim površinama hrama prostoje brojni, relativno veliki otvori rezonatora. Oni su potencijalno remetili strukturu slika, ali i komplikovali montažu teških obloga sa pripremljenim kamenim elementima mozaika. Zbog toga je pokrenuto pitanje provere svrshodnosti i realnih dometa rezonatora u kontroli

veoma duge reverberacije prostora hrama i procene akustičkog rizika koji nastaje ako se rezonatori eliminišu prekrivanjem njihovih otvora.



Sl.2. Bliski pogled na dva rezonatora u kupoli - levo je manji, a desno veći rezonator.

Da bi se razrešile nedoumice oko uticaja rezonatora i montaže mozaika inicirano je posebno istraživanje. Njegov cilj je bio da pomogne u donošenju strateških odluka u konačnom dovršavanju hrama. Istraživanje je obavljeno tokom 2010. godine, a u njemu su učestvovali članovi stručnog tima Laboratorije za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu. U analizama su korišćeni rezultati merenja akustičkog odziva hramu u zatečenom stanju i u njegovom numeričkom modelu pomoću rej-trejsing simulacije. Za sagledavanje novih aspekata analiziranog problema utrađene su u novije vreme neke dodatne analize. Rezultati su prikazani u ovom radu.

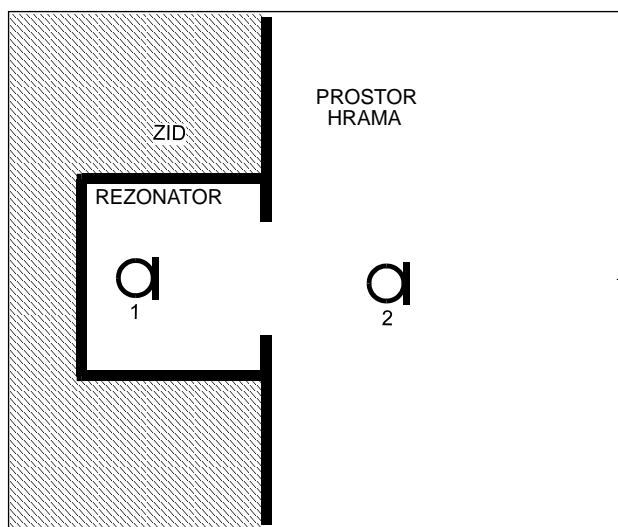
II. KARAKTERISTIKE UGRAĐENIH REZONATORA

Prvi korak u istraživanju na temu mogućeg doprinosa ugrađenih rezonatora na akustički odziv hrama uključilo je proveru njihovih realno postignutih rezonantnih frekvencija. Podaci o tome prikazani u projektu dobijeni su proračunima koji uvek nose moguću grešku zbog nesavršenosti matematičkih modela [11-14]. S tim ciljem je organizovano *in situ* merenje rezonantnog odziva ugrađenih rezonatora.

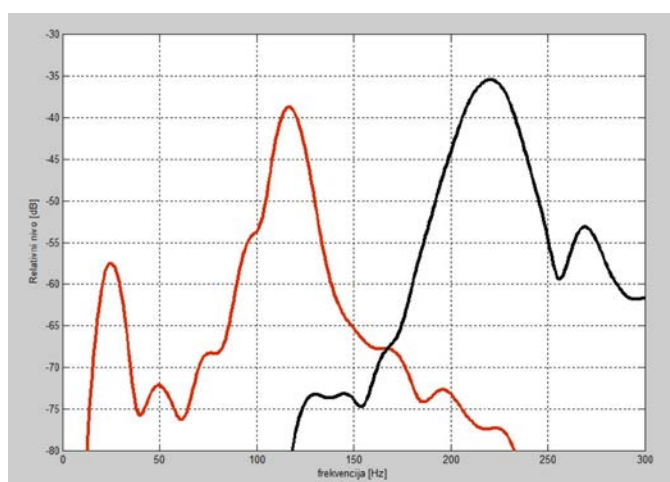
Za tu namenu iskorišćena je dizalica sa platformom koja je u to vreme postojala u hramu i korišćena je za potrebe građevinskih radova. Dizalica je vidljiva na desnoj strani fotografije sa slike 1. Ona je omogućila da se ostvari dovoljno približavanje jednoj grupi rezonatora u kupoli i postavljanje zvučnog izvora i mernih mikrofona. S obzirom na njihovu poziciju u hramu, merenja su izvršena na rezonatorima koji su bili dohvatni sa platforme dizalice i prikazani su na slici 1.

Metodologija merenja rezonantnih svojstava ugrađenih rezonatora ilustrovana je na slici 3. Koncept merenja njihove rezonantne frekvencije i propusnog opsega ranije je razvijen za potrebe detaljne analize izvesnog broja rezonatora izvađenih iz srednjovekovnih srpskih crkava [15]. Za tu namenu korišćen je priručni širokopojasni izvor zvuka pozicioniran u zoni otvora ispitivanih rezonatora. Zvučni signal je registrovan sa dva merna mikrofona – jedan se nalazio u blizini otvora rezonatora i registrovao je pobudu rezonatora iz prostora hrama, a drugi je bio u unutrašnjosti rezonatora i u njemu registrovao odziv na

primenjenu pobudu. Na osnovu razlike signala iz mikrofona u ove dve tačke dobijena je relativna promena nivoa zvuka po frekvencijama u rezonatoru, a koja nastaje kao posledica rezonantnog procesa. Dobijene rezonantne krive za dva tipa rezonatora ugrađena u hramu prikazane su na slici 4.



Sl.3. Šematski prikaz postupka merenja rezonantne frekvencije ugrađenih rezonatora: 1 – mikroskop u rezonatoru, 2 – mikroskop u prostoru ispred rezonatora



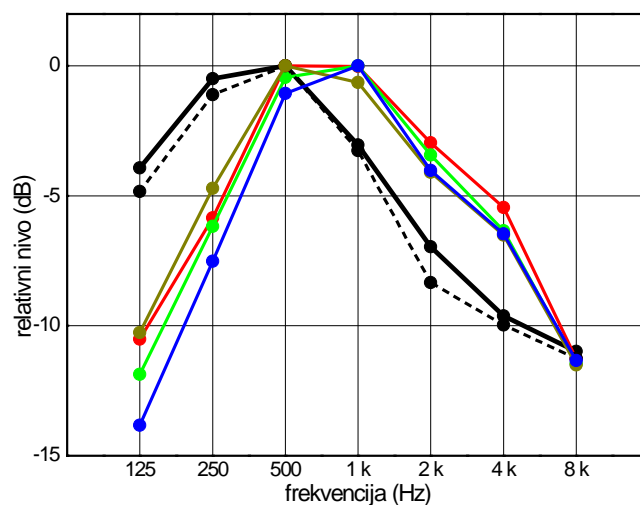
Sl.4. Odzivi dva tipa rezonatora ugrađena u kupoli hrama; odzivi su snimljeni metodologijom prikazanom na slici 2: crvena linija – veći rezonator, crna linija – manji rezonator.

Sa slike 4 se vidi da je snimljeni odziv analiziranih rezonatora na spoljašnju zvučnu pobudu karakterističan za rezonantni proces. Jasno se vidi da je njihova selektivnost relativno uska. Rezonantna frekvencija većeg rezonatora je bliska 125 Hz, kao što je bilo predviđeno projektom, a propusni opseg je oko 10 Hz. Rezonantna frekvencija manjeg rezonatora je oko 220 Hz (projektom je predviđeno 250 Hz), a propusni opseg je oko 20 Hz. To ukazuje da se njihov uticaj na zvučno polje može očekivati samo u okvirima njihovih propusnih opsega vidljivih na dijagramu. Činjenica je da se opseg delovanja rezonatora može širiti korišćenjem nekog apsorpcionog materijala, ali proširivanje selektivnosti

rezonantnog procesa neumitno smanjuje eventualni efekat apsorpcije zvuka na rezonantnoj frekvenciji. Rezultat merenja sa slike 4 pokazuje da je sa aspekta akustičkog odziva u prostoru hrama eventualni dobitak takvom modifikacijom upitan.

III. KARAKTERISTIKE ZVUČNE POBUDE KOJA SE JAVLJA U HRAMU

Potencijalni doprinos ugrađenih rezonatora u akustičkom odzivu hrama, sa njihovim izmerenim rezonantnim odzivima, zavisi od zvučnih sadržaja koji se pojavljuje tokom službi. Da bi se to razjasnilo izvršena je frekvencijska analiza uzoraka zvučnih signala koji se pojavljuju tokom službe u srpskim pravoslavnim crkvama, i kojim se pobuđuje njihov prostor. Za analizu su uzeti liturgijsko pevanje hora i pojanje sa pevnice. Da bi rezultati takve analize bili primenjivi moraju se posmatrati izvorni akustički signali koje emituju glasovi kao zvučni izvori, to jest bez uticaja ambijenta koji promenama u frekvencijskom i vremenskom domenu utiče na karakter zvuka koji se čuje. Zbog toga su upotrebljeni snimci bliski anehoičnim, napravljeni u jednom ranijem istraživanju, pa su primenjeni i za potrebe ove analize. Pojanja su snimljena u crkvenom prostoru, ali sa vrlo bliskim mikrofonom. Na taj način je u dobijenom signalu potisnut uticaj ambijenta karakterističnog za crkve. Pevanje hora je snimljeno u relativno maloj prostoriji za probe koja je prigušena izvesnom količinom apsorpcionog materijala. Dugovremeni spektri šest uzoraka takvih signala prikazani su na slici 5.



Sl.5. Dugovremeni spektri segmenata liturgije koju peva hor i pojanja grupe pojaca: crne linije – pojanje sa pevnice, obojene linije – pevanje hora.

Dijagrami sa slike 5 pokazuju karakter zvuka kojim se uobičajeno pobuđuje prostor pravoslavnih crkava za vreme službe. Spektri u kome dominiraju muški glasovi, kao što je pojanje sa pevnice, imaju maksimum spektra u oktavi na 500 Hz, dok je u pevanju mešovitog hora maksimum energije u oblasti oktava sa centralnim frekvencijama na 500 Hz i 1 kHz, i sa opadanjem relativnog nivoa ka višim i nižim frekvencijama.

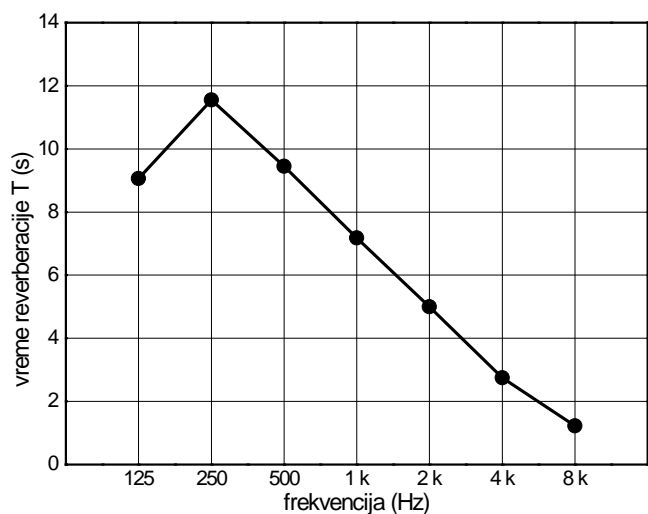
Upoređujući dugovremene spektre sa slike 5 sa rezonantnim svojstvima akustičkih rezonatora prikazanim na slici 4, zaključuje se da su oni podešeni na frekvencije ispod oblasti u

kojoj se nalazi maksimum energije glasova, a to znači maksimum zvučne pobude crkvenog prostora tokom službe. Takav zaključak je apostrofiran i u ranijem istraživanju akustičkih rezonatora pronađenih u srednjovekovnim srpskim crkvama [15]. Ovakva činjenica ograničava moguće auditivne efekte koje oni mogu ispoljavati u srpskim pravoslavnim crkvama, pa i u hramu Svetog Save.

IV. MERENJE U HRAMU PRE POSTAVLJANJA MOZAIKA

Da bi se utvrdilo realno stanje akustičkog odziva prostora hrama sa ugrađenim rezonatorima organizovano je merenje akustičkog odziva. Merenje je sprovedeno u dve seanse tokom 2010. godine. Bilo je to u fazi izgradnje hrama, kada je objekat u ugrađevinskom smislu bio završen, a pre početka većih radova na oslikavanju i ukrašavanju. Merenja su vršena tokom noći kada u njemu nije bilo posetilaca. Od dodatnih elemenata u hramu kojih neće biti u njegovom finalnom stanju tom prilikom su postojale skele u jednom delu prostora, manja količina građevinskog materijala ograđenog mrežama koja ih štiti i dizalica vidljiva na slici 1. Pod u to vreme nije bio popločan.

Merenje akustičkog odziva je izvršeno direktnom metodom, što znači da je za pobudu korišćen izvor impulsnog zvuka. U prostoru koji ima tako veliku zapreminu to je bio jedini dostupan način za njegovu pobudu neusmerenim zračenjem. Rezultat merenja vremena reverberacije prikazan je na slici 6, dobijen usrednjavanjem za nekoliko prijemnih i predajnih mesta u hramu.



S1.6. Rezultat merenja vremena reverberacije u hramu u fazi pre postavljanja mozaika.

Sa dijagrama na slici 6 može se uočiti nekoliko karakterističnih činjenica.

1. I pored postojanja rezonatora prostor hrama na nižim frekvencijama ima veliku vrednost vremena reverberacije, čak do 12 s u oktavi na 250 Hz. Vrednosti oko 10 s su konstatovane i u drugim tako velikim prostorima, kao na primer u Beogradskoj areni čija je unutrašnja zapremina oko 300.000 m³ [16]

2. U hramu ne postoje površine koje bi mogli doprineti povećanoj apsorpciji na niskim frekvencijama. To bi teorijski

mogle biti sve površine koje deluju kao mehanički rezonatori: drvene obloge, površine sa gipsanim pločama i slično. Činjenica je da u hramu postoje relativno velike površine vrata, podašćane zone i površine slične materijalizacije koje mogu u nekoj maloj meri doprineti apsorpciji najnižih frekvencija, ali je to po ukupnoj kvadraturi minorno u datoj zapremini. Zbog toga je pad vrednosti vremena reverberacije u oktavi na 125 Hz očigledna posledica delovanja rezonatora. Pa ipak, i pored svih tih uticaja vrednost vremena reverberacije je relativno velika, čak 9 s.

3. Uticaj rezonatora se u oktavi na 250 Hz iz nekih razloga ne primećuje, iako dijagram sa slike 3 pokazuje da je oko polovina od njihovog ukupnog broja podešena na frekvenciju koja se nalazi upravo u tom opsegu. Razlog tome može biti suviše uzak propusni opseg rezonatora u odnosu na ukupnu širinu oktave na 250 Hz koja je oko 170 Hz (od oko 180 Hz do oko 350 Hz). Njegov doprinos sa delovanjem u opsegu širine od samo 20 Hz očigledno se ne primećuje u usrednjenoj oktavnoj vrednosti vremena reverberacije.

4. Modelovanje funkcije usamljenog rezonatora ugrađenog u masivnom zidu pokazuje da je maksimalno moguća vrednost ekvivalentne apsorpcione površine koju on ispoljava [17]:

$$A = \frac{\lambda_0^2}{2\pi} [\text{m}^2]$$

Ova vrednost se dostiže samo ako je dizajn rezonatora optimalan. To znači da će udeo rezonatora u ukupnoj apsorpciji prirodno da opada sa frekvencijom. To može biti objašnjenje manje vidljivosti uticaja rezonatora na vreme reverberacije u oktavi na 250 Hz u odnosu na oktavu na 125 Hz.

5. Monotoni pad vrednosti vremena reverberacije na višim frekvencijama jasno je određen uticajem disipacije u vazduhu, jer u enterijeru hrama nema poroznih materijala koji bi uneli takvu apsorpciju. To znači da je kriva vremena reverberacije u toj oblasti frekvencija u izvesnoj meri promenljiva u funkciji promene vlažnosti i temperature vazduha, ali da ima očekivani monotoni pad ka višim frekvencijama počev od oktave 250 Hz.

V. ANALIZA MOGUĆEG DOPRINOSA REZONATORA U HRAMU SIMULACIJOM ZVUČNOG POLJA

Da bi se procenila mogućnost predikcije efekta ugrađenih rezonatora u prostoru hrama sprovedena je analiza proračunima. Za to su primenjena dva pristupa:

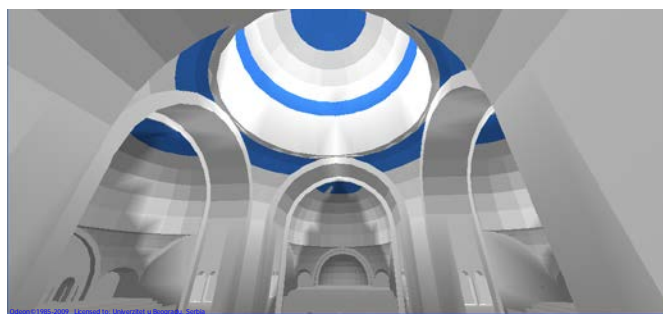
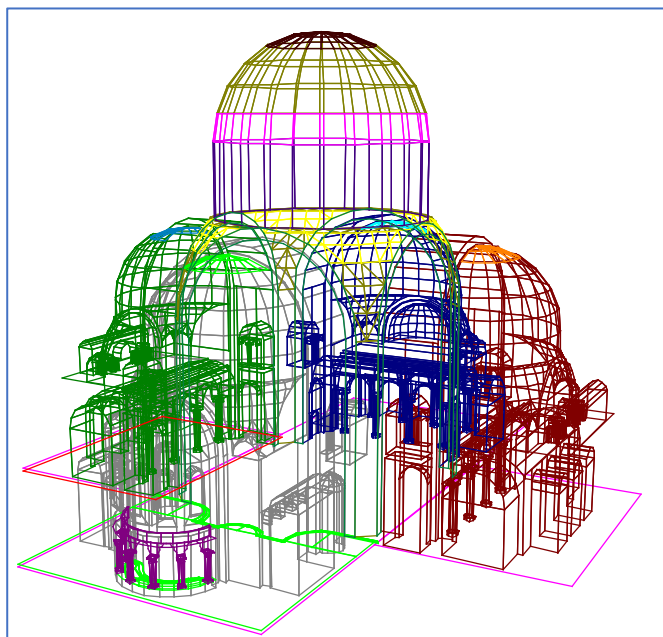
- simulacijom zvučnog polja u softverskom modelu njegove unutrašnjosti pomoću rej-trejsing analize i
- pomoću statističkog modela zvučnog polja koristeći poznatu Sabinovu formulu za vreme reverberacije u prostoriji.

Za potrebe rej-trejsing simulacije napravljen je model unutrašnjosti hrama čiji je izgled prikazan na slici 7. Unutrašnjim površinama dodeljene su procenjene vrednosti koeficijenta apsorpcije koristeći podatke iz literature [18]. Za potrebe proračuna posebno je izvršena procena vrednosti koeficijenta apsorpcije površina sa ugrađenim rezonatorima, tačnije izračunavanje njihove apsorpcione površine, da bi se to primenilo u ovim modelima.

Rezultat proračuna vremena reverberacije metodom rej-trejsinga i Sabinovom formulom prikazan je na slici 8. Radi

poređenja, na dijagramu je ucrtan i rezultat merenja sa slike 6. Na osnovu ovih rezultata može se izvesti nekoliko važnih zaključaka.

1. U oktavi na 125 Hz izmerena vrednost vremena reverberacije poklapa se sa rezultatom proračunom za obe primenjene metode modelovanja.



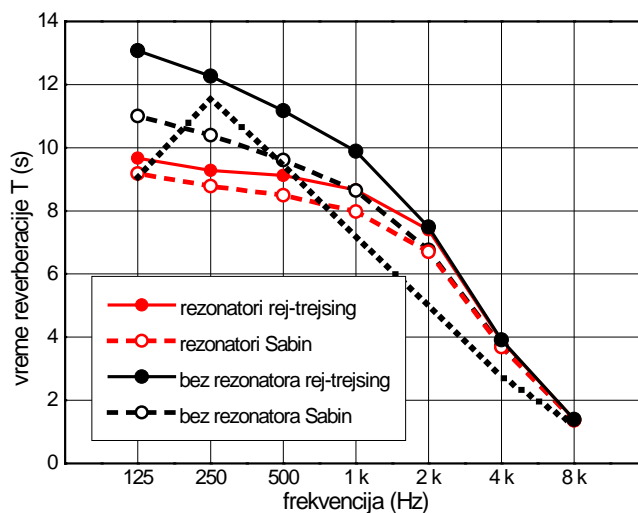
Sl.7. Izgled softverskog modela unutrašnjosti hrama u kome je izvršeno modelovanje zvučnog polja metodom *rej-trejsing*: gore – žičani model, dole – model sa unetom materijalizacijom gde je vrednost koeficijenta apsorpcije kodovana bojama.

2. U oktavi na 250 Hz izmerena vrednost vremena reverberacije se približno poklapa sa vrednostima izračunatim za slučaj hrama bez rezonatora. Preciznije, izmerena vrednost je između vrednosti dobijenih Sabinovom formulom i *rej-trejsing* simulacijom za slučaj bez rezonatora.

3. Na višim frekvencijama proračuni po obe metode premašuju izmerene vrednosti. To može biti posledica dva faktora: razlike u proceni disipacije u vazduhu i činjenice da u nedovršenom hramu neke površine ipak imaju izvesnu poroznost koja može imati uticaja na apsorpciju viših frekvencija, a što nije moglo biti sagledano u primenjenim proračunima.

VI. MERENJA U ZAVRŠENOM PROSTORU HRAMA

Da bi se zaokružila slika o mogućim efektima rezonatora na akustički odziv hrama potrebno je izvršiti finalno merenje akustičkog odziva u njemu. Uslovi za takvo merenje su se stekli tek nedavno, nakon finalizacije oslikavanja i nekih drugih bitnih detalja. Time su svi otvori ugrađenih rezonatora zatvoreni masivnim slojem materijala od koga je načinjen mozaik. Nažalost, sticajem raznih okolnosti organizacione prirode to merenje još uvek nije izvršeno.



Sl.8. Rezultati proračuna vremena reverberacije u hramu za slučaj sa i bez uticaja ugrađenih rezonatora: proračuni su urađeni na dva načina: metodom *rej-trejsing* i pomoću Sabinove formule; tačkasto je ucrtan rezultat merenja u hramu.

VII. ZAKLJUČAK

Iz analize uticaja akustičkih rezonatora u hramu Svetog Save u Beogradu proizašlo je nekoliko zaključaka koji se odnose na tu temu, ali i na šire aspekte akustike.

1. Pokazalo se da su rezonantne frekvencije primenjenih rezonatora ispod oblasti frekvencija gde se dominantno nalazi najveći dio energije glasova horskog pevanja i pojanja. To potvrđuje ranije zaključke koji su prizašli iz studije akustičkih rezonatora u srednjovekovnim srpskim crkvama.

2. Rezultati sprovedenih proračuna i njihovo poređenje sa rezultatima merenja u izgrađenom hramu pokazuju da postoji problem tačnosti modelovanja zvučnog polja i predikcije akustičkog odziva tako velikih prostora kao što je hram Svetog Save (117.000 m³). Očigledno je da u projektovanju to zahteva poseban istraživački pristup. Sličan zaključak je već ustanovljen prilikom projektovanja Beogradske arene [16].

3. U veoma velikim prostorima kao što je hram nemoguće je da se služba odvija bez primene sistema za ozvučavanje. Naime, ne postoje sredstva akustičkog dizajna prihvatljiva u kanonizovanom crkvenom prostoru koja bi mogla da vreme reverberacije svedu na optimalnu meru za takve ambijente (2-3 s) [7].

4. Savremena tehnologija daje mogućnost primene vrlo usmerenih zvučnih sistema kakvi su danas uobičajeni u sistemima za ozvučavanje, koji kombinovani sa bliskim mikrofonomima na sveštenicima i pojcima omogućavaju minimizaciju uticaja akustičkog ambijenta na ono što će se čuti

na pozicijama slušaoca. Na taj način danas je u izvesnom smislu eliminisana neophodnost podešavanja vremena reverberacije u vrlo velikim verskim prostorima kakav je hram, što se odražava i na eventualnu ideju o primeni rezonatora.

LITERATURA

- [1] <https://hramsvetogsave.rs/>
- [2] M.Kayili, "Use of cavity resonators in Anatolia since Vitruvius", Proc. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, 1621-8 (2000)
- [3] T.Pretlove, "Helmholtz resonators for the new Russian Orthodox church in London", Acoustic Bulletin, London, January/February (1998)
- [4] A.Carvalho, V.Desarnaulds, Y.Loerincik, "Acoustic behavior of ceramic pots used in middle age worship spaces - a laboratory analysis", Proc. 9th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, 1621-8 (2000)
- [5] S.Nenadovic, "Rezonatori u crkvama srednjovekovne Srbije", Zbornik Arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Beogradu (1960) sveska V
- [6] M.Bajalovic-Hadzi-Pesic, "Keramika u srednjovekovnoj Srbiji", Muzej grada Beograda, (1981) 71-73
- [7] M.Mijic, V. Banjac, "O ulozi ugrađenih akustičkih rezonatora u srpskim crkvama na primeru Gornje crkve u Sremskim Karlovcima", Građa za proučavanje spomenika kulture Vojvodine XX, Novi sad (1999) 87-104
- [8] M.Mijic, D. Sumarac-Pavlovic, "Acoustic resonators in serbian orthodox churches", Proc. Forum Acusticum, Sevilla (2002) RBA-05-001-IP
- [9] D.Kalic, "Acoustic resonators in Serbian medieval churches ", Proc. II Joint meeting of Greek and Yugoslav Acoustical Societies (1984), Proceedings, 91-97
- [10] D.Kalić, "Akustika hrama Svetog Save", Izgradnja, No 1 (1993) 23-29
- [11] J.Holtmark, "The absorption and diffusion of sound by resonators", I Kommissjon hos Jacob Dybwad, Oslo (1946)
- [12] A.K.Nielsen, "Acoustic resonators of circular cross-section and with axyal symmetry", Trans. of the Danish Academy of Technical Sciences, No 10 (1949)
- [13] A.Alster, "Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators", Journal of Sound and Vibration, Vol. 24, No 1 (1972) 63-85
- [14] G.R.Biggs, "The three dimensional cavity resonator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 85 (1982) 85-103
- [15] Miomir Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, „Acoustic Resonators in Serbian Orthodox Churches“, poglavlje u monografiji „Collected Papers in Building Acoustics: Room Acoustics and Environmental Noise“, Multi Science Publishing Co., London, 2010, 141-156
- [16] M.Mijić, Dragana Šumarac-Pavlović, "Acoustic design of the Belgrade Arena hall", FORUM ACUSTICUM, Budimpešta, 2005. Proceedings, 2399-2404
- [17] U.Ingard, "On the Theory and Design of Acoustic Resonators", JASA, Vol.25, NO 6 (1953) 1037-1061
- [18] M.Mijić, „ELA 1 – Koeficijenti apsorpcije materijala“, Laboratorija za akustiku Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, 1998.

ABSTRACT

Acoustic resonators are elements that have long been used in churches with the idea of using them to control the acoustic response of the worship space. The project of the Saint Sava temple in Belgrade included the installation of 476 specially designed resonators in order to reduce the expected reverberation. During the construction of the mosaic with which the temple was painted, such a large number of resonators with relatively large diameter of opening made it difficult to assemble the stone elements of the mosaic. Due to that, the question of their necessity and purposefulness in the temple arose. So, the research of the built-in resonators' real acoustic efficiency in the temple and the acoustical risk of their termination was initiated. The paper describes the results of the research and the achieved conclusions.

On the role of acoustic resonators in the temple of Saint Sava in Belgrade

Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Jelena Erdeljan, Tatjana Miljković