

REPRESENTATIVE OF THE STATE OF REVERBERATION IN THE SERBIAN ORTHODOX CHURCH

Violeta Stojanović

The Academy of Applied Technical and Preschool Studies - Department Niš, Serbia,
violeta.stojanovic@akademijanis.edu.rs

Zoran Milivojević

The Academy of Applied Technical and Preschool Studies - Department Niš, Serbia,
zoran.milivojevic@akademijanis.edu.rs

Abstract: In this paper, the statistical analysis determined a representative of the state of reverberation in the Serbian Orthodox Church of "St. Prokopius" in Katun. The first part of the paper explains the experiment based on the process of recording acoustic impulse responses and determines the value of the early reverberation time EDT and the reverberation time RT_{10} , RT_{20} , and RT_{30} at the central frequencies $f_c = \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz using ARTA software package. The experiment results (tabular and graphical) obtained by statistical analysis using the Matlab software package are also presented. In the second part of the paper, the results of the experiment analysis were carried out. By comparing them, it was concluded which acoustic parameter is representative of the state of reverberation in the analyses of the Serbian Orthodox church.

Keywords: Room impulse response, reverberation, ARTA, statistical analysis.

REPREZENT STANJA REVERBERACIJE U SRPSKOJ PRAVOSLAVNOJ CRKVI

Violeta Stojanović

Akademija tehničko - vaspitačkih strukovnih studija – Odsek Niš, Srbija,
violeta.stojanovic@akademijanis.edu.rs

Zoran Milivojević

Akademija tehničko - vaspitačkih strukovnih studija – Odsek Niš, Srbija,
zoran.milivojevic@akademijanis.edu.rs

Резиме: U prvom delu rada objašnjen je eksperiment koji se bazira na procesu snimanja akustičkih impulsnih odziva i određivanju vrednosti ranog vremena reverberacije EDT i vremena reverberacije RT_{10} , RT_{20} , RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz pomoću softverskog paketa ARTA. Prikazani su i rezultati eksperimenta (tabelarno i grafički) dobijeni statističkom analizom pomoću softverskog paketa Matlab. U drugom delu rada izvršena je analiza rezultata eksperimenta i njihovom komparacijom zaključuje se koji akustički parametar je reprezent stanja reverberacije u analiziranoj srpskoj pravoslavnoj crkvi.

Ključne reči: Impulsni odziv prostorije, reverberacija, ARTA, statistička analiza.

1. UVOD

Poznato je da je vreme reverberacije RT , objektivni akustički parametar za procenu kvaliteta zvuka u prostorijama (muzike i razumljivosti govora) (Kuttruff, 1991). Za predviđanje akustičkog dizajna prostorije najčešće se koriste jednačine vremena reverberacije koje su jednostavne i obično daju korektne rezultate. Prva i najviše korišćena jednačina vremena reverberacije je Sabinova jednačina (Sabine, 1922) koja je bazirana na analizi zapremine, dimenzija i koeficijenata apsorpcije zidova prostorije. Kasnije je predloženo i više revidiranih jednačina poput Ajringove ili Milingtonove jednačine (Eiring 1930; Millington 1932). Šreder je 1965. god. predložio algoritam procene parametra RT koji se izračunava analizom akustičkog impulsnog odziva prostorije (Schroeder, 1965). Rano vreme reverberacije EDT definisao je Jordan 1970. (Jordan, 1970).

Reverberacija prostorije se opisuje sa sledeća dva parametra (Kuttruff, 1991): 1) vreme reverberacije RT_{60} i 2) rano vreme reverberacije EDT . 1) RT_{60} je vreme potrebno da zvučna energija u prostoriji opadne nakon isključenja izvora, na milioniti deo vrednosti u odnosu na stacionarno stanje. Odnosno, to je vreme potrebno da nivo zvuka, nakon isključenja izvora zvuka, opadne u prostoriji za 60 dB u odnosu na nivo zvuka u stacionarnom stanju. Parametar RT_{60} je isti u svim tačkama prostorije i ne zavisi od izvora zvuka u prostoriji i od geometrije prostora ali je frekvencijski zavisna veličina. U proceduri merenja ponekad nije moguće ostvariti dinamiku pada nivoa zvuka u prostoriji od 60dB, pa se vreme reverberacije određuje na osnovu pada nivoa zvuka od 10 dB, 20 dB i 30 dB, akustičkim parametrima RT_{10} , RT_{20} i RT_{30} , respektivno, i to polazeći od -5 dB u odnosu na maksimalni nivo. 2) Rano

vreme reverberacije EDT je relevantan podatak kada je u pitanju odziv prostorija sa izraženom ulogom ranih refleksija. Parametar EDT je definisan kao vreme za koje relativni nivo zvuka opadne za 10 dB i to računajući od -5 dB u odnosu na maksimalni nivo. Zavisí od geometrije prostora. Ukoliko EDT značajnije odstupa od vremena reverberacije pokazuje se da je dominantna veličina za subjektivni doživljaj reverberantnosti prostora.

U ovom radu je na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u crkvi “Sveti Prokopije” u Katunu, u Srbiji, i korišćenjem programskih paketa ARTA i Matlab, izvršena statistička analiza akustičkih parametara: ranog vremena reverberacije EDT i vremena reverberacije RT_{10} , RT_{20} , RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000\}$ Hz. Izračunate su srednje vrednosti, standardne devijacije, varijanse i prikazani su grafici raspodele verovatnoće rezultata merenja ovih akustičkih parametara. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se koji je akustički parametar optimalni, odnosno, koji je od akustičkih parametara relevantan za procenu drugih akustičkih parametara i dalju akustičku analizu prostorije.

Organizacija rada je sledeća: u sekciji 2 objašnjen je eksperiment, u sekciji 3 prikazani su rezultati eksperimenta, u sekciji 4 izvršena je analiza rezultata i sekcija 5 je zaključak.

2. EKSPERIMENT

U ovom radu izvršena je statistička analiza akustičkih parametara: EDT , RT_{10} , RT_{20} i RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz sa ciljem određivanja parametra – reprezenta stanja reverberacije u crkvi “Sveti Prokopije” u Katunu, u Srbiji (slika 1.).

Ova pravoslavna crkva po tipu gradnje pripada moravsko – vizantijskom stilu. Osnova crkve je u obliku “upisanog krsta” sa izraženim bočnim polukružnim apsidama u visini krovnog venca i oltarskim prostorom. Zapremina crkve je $V = 1659.68 \text{ m}^3$ a površina $S = 646.68 \text{ m}^2$. Unutrašnji zidovi i plafoni su od pune opeke sa završnom obradom od krečnog maltera koeficijenta apsorpcije $\alpha = 0.02$ a pod je pokriven keramičkim pločicama koeficijenta apsorpcije $\alpha = 0.015$. Na krovu crkve nalazi se kupola, prečnika 3 m koja dostiže visinu od 10,9 m, i četvorostrani zvonik.

Slika 1. Crkva “Sveti Prokopije” u Katunu (Srbija).

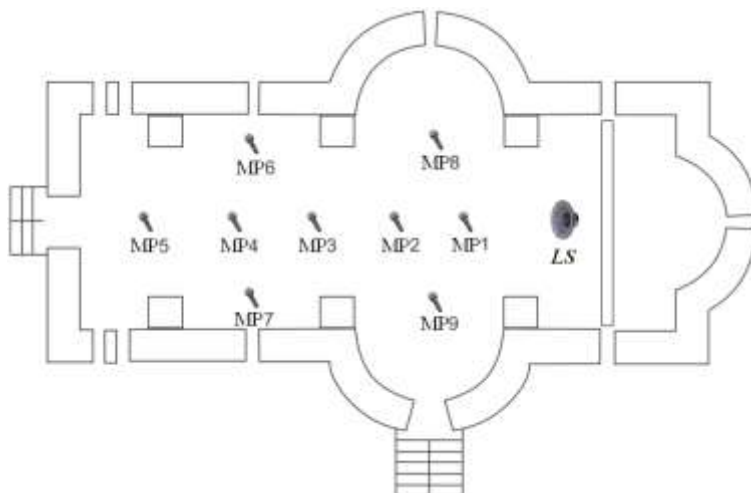


Osnovu eksperimenta čini proces snimanja akustičkih impulsnih odziva. Merenja su vršena u skladu sa standardom ISO 3382 (ISO 3382, 1997) pri temperaturi $t = 11 \text{ }^\circ\text{C}$. Za eksperiment je korišćena sledeća oprema: a) omnidirekcionni mikrofoni PCB 130D20 koji ima prečnik dijafragme 7mm; b) B&K omnidirekcionni zvučni izvor tipa 4295, c) B&K audio pojačalo snage 100W RMS, stereo, tip 2716-C i d) laptop koji ima zvučnu karticu Soundmak Integrated Digital Audio kompanije Analog Devices. Merenje impulsnog odziva izvršeno je pomoću pobudnog log - sweep signala u trajanju od 6 s. Frekvencija semplovanja je $f_s = 44.1 \text{ kHz}$.

Snimanjem akustičkih impulsnih odziva pomoću softverskih paketa ARTA dobijeni su wav fajlovi koji čine bazu podataka. Snimanja su izvršena u $MP = 9$ mernih tačaka čiji je raspored prikazan na slici 2. Za svaku mernu tačku izvršeno je po 7 merenja, što ukupno čini 63 fajlova.

Na osnovu impulsnih odziva i programskog paketa ARTA određene su vrednosti objektivnih akustičkih parametara koji karakterišu vreme reverberacije u crkvi na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz za svaku mernu tačku. Pomoću programskog paketa Matlab izračunate su srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse analiziranih akustičkih parametara na svakoj frekvenciji, za sve merne pozicije u crkvi i prikazani su grafici raspodele verovatnoće rezultata merenja. Na osnovu ove analize zaključuje se koji akustički parametar ima najtačniju vrednost, odnosno koji je akustički parametar predstavnik stanja reverberacije u crkvi.

Slika 2. Prikaz centralne prostorije crkve u kojoj su vršena snimanja impulsnih odziva: LS - lokacija zvučnog izvora, 1-9 - merne tacke.



3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U tabeli 1 prikazane su srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse akustičkih parametara EDT i RT_{10} , a u tabeli 2 su prikazane srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse akustičkih parametara RT_{20} i RT_{30} . Na slikama (3 – 6) prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara EDT , RT_{10} , RT_{20} i RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz, respektivno.

Tabela 1: Srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse EDT i RT_{10} .

f (Hz)	μ_{EDT} (s)	σ_{EDT} (s)	σ_{EDT}^2 (s ²)	$\mu_{RT_{10}}$ (s)	$\sigma_{RT_{10}}$ (s)	$\sigma_{RT_{10}}^2$ (s ²)
125	3.306	1.4492	2.1001	3.0769	0.3057	0.0934
250	3.0219	0.2264	0.0512	3.0211	0.2758	0.0761
500	2.7065	0.1400	0.0196	2.7353	0.1512	0.0229
1000	2.1734	0.1514	0.0229	2.2155	0.1310	0.0172
2000	1.5894	0.0473	0.0022	1.6126	0.0371	0.014
4000	1.2085	0.0344	0.0012	1.2018	0.0325	0.011

Tabela 2: Srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse RT_{20} i RT_{30} .

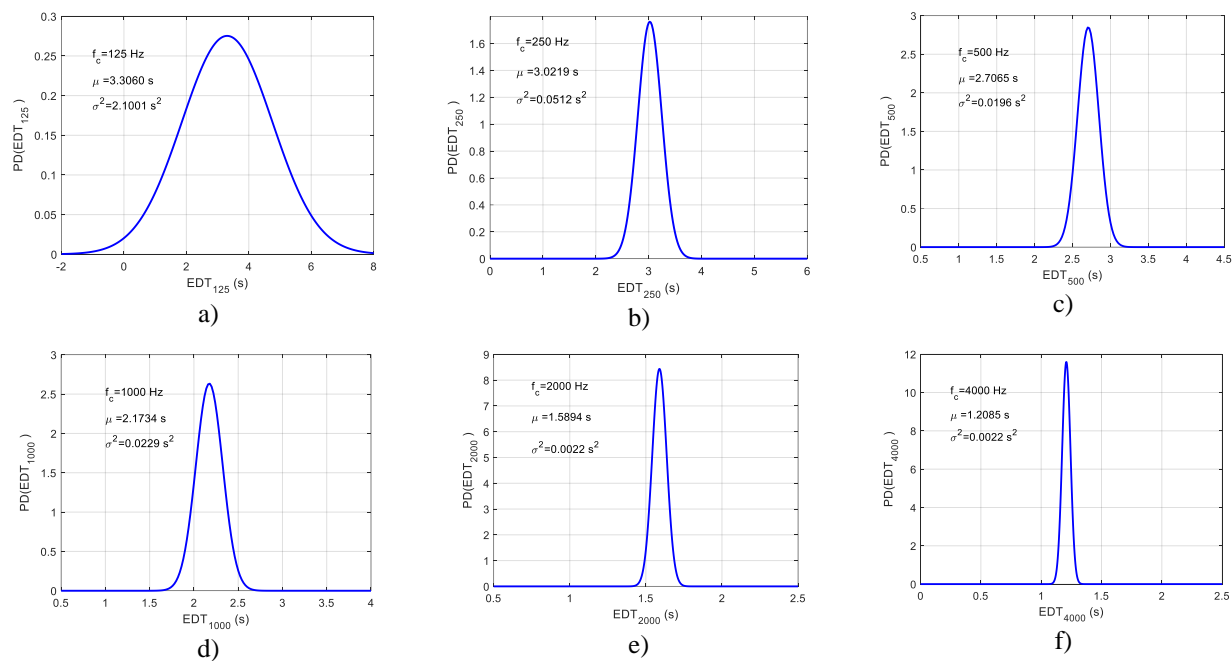
f (Hz)	$\mu_{RT_{20}}$ (s)	$\sigma_{RT_{20}}$ (s)	$\sigma_{RT_{20}}^2$ (s ²)	$\mu_{RT_{30}}$ (s)	$\sigma_{RT_{30}}$ (s)	$\sigma_{RT_{30}}^2$ (s ²)
125	3.154	0.1925	0.0371	3.2247	0.1461	0.0213
250	3.1598	0.1904	0.0363	3.1693	0.1726	0.0298
500	2.7297	0.1082	0.0117	2.6911	0.0742	0.0055
1000	2.2327	0.0522	0.0027	2.2327	0.0608	0.0037
2000	1.647	0.018	$3.2499 \cdot 10^{-4}$	1.659	0.0121	$1.4659 \cdot 10^{-4}$
4000	1.2252	0.0140	$1.9716 \cdot 10^{-4}$	1.1021	0.4099	0.168

4. ANALIZA REZULTATA

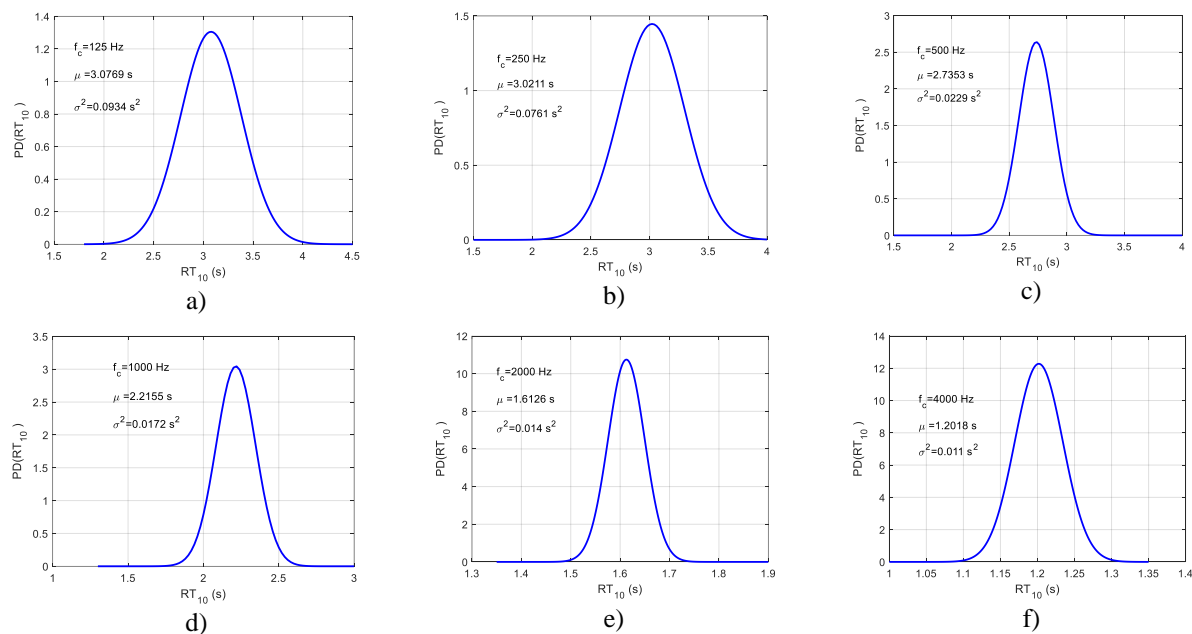
Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 1. i 2. i na slikama (3. – 6.) zaključuje sledeće:

1) srednje vrednosti veličina EDT ($\mu_{EDT} = 1.2085$ s), RT_{10} ($\mu_{RT_{10}} = 1.2018$ s) i RT_{20} ($\mu_{RT_{20}} = 1.2252$ s) na $f_c = 4$ kHz imaju najmanje standardne devijacije, ($\sigma_{EDT} = 0.0344$ s, $\sigma_{RT_{10}} = 0.0325$ s i $\sigma_{RT_{20}} = 0.014$ s) a samim tim i najveće tačnosti (slike 3.f, 4.f i 5.f); najveću tačnost RT_{30} ima za srednju vrednost $\mu_{RT_{30}} = 1.659$ s ($\sigma_{RT_{30}} = 0.0121$ s) na $f_c = 2$ kHz (slika 6.e);

Slika 3. Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra EDT na: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz i f) 4000 Hz za sve MP crkve.



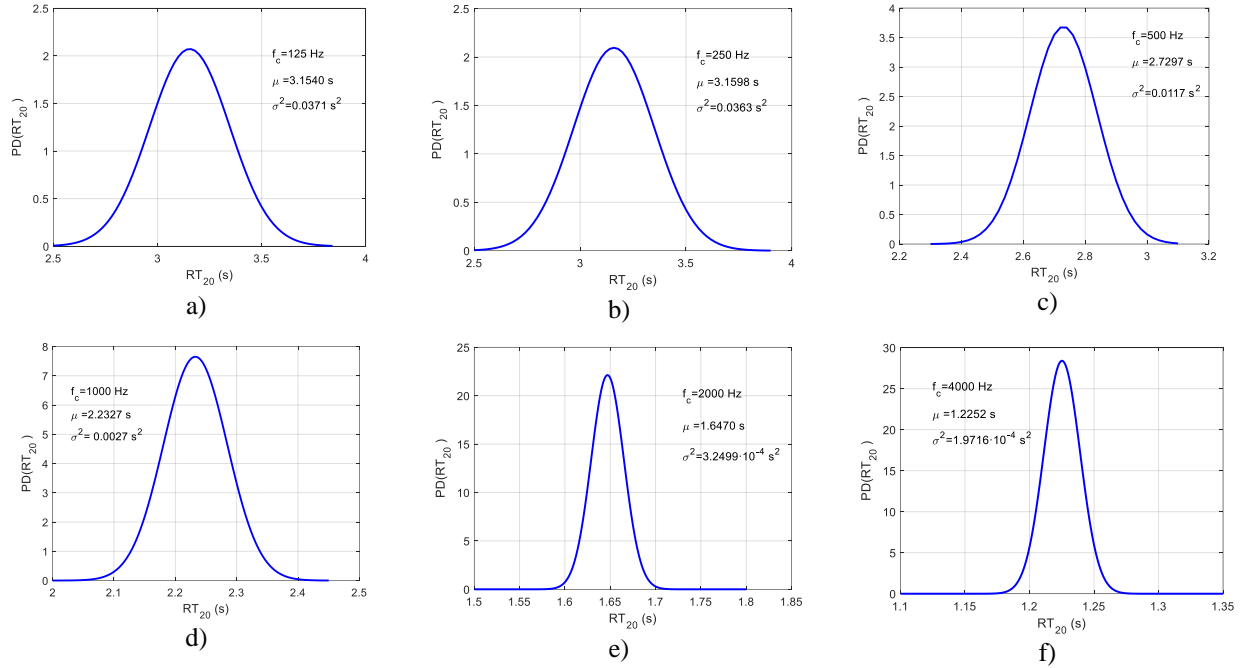
Slika 4. Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra RT_{10} na: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz i f) 4000 Hz za sve MP crkve.



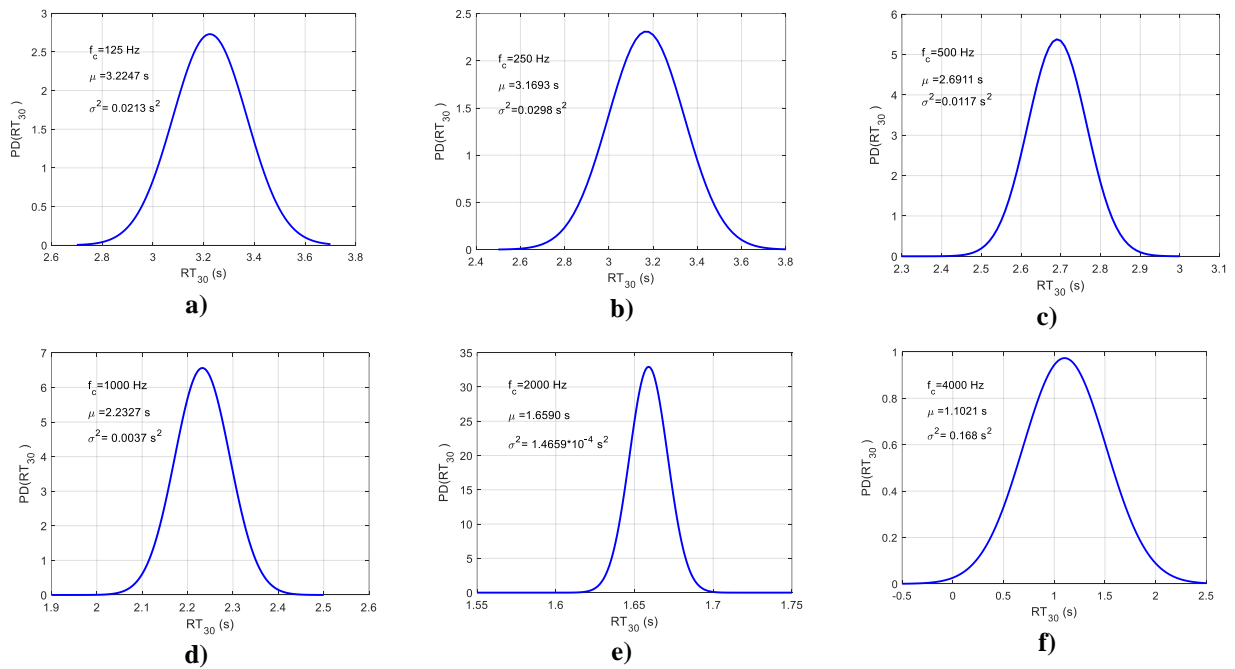
2) srednje vrednosti veličina EDT , RT_{10} i RT_{20} na $f_c = 125$ Hz: $\mu_{EDT} = 3.306$ s, $\mu_{RT_{10}} = 3.0769$ s i $\mu_{RT_{20}} = 3.154$ s, respektivno, imaju najveće vrednosti standardnih devijacija ($\sigma_{EDT} = 1.4492$ s, $\sigma_{RT_{10}} = 0.3057$ s i $\sigma_{RT_{20}} = 0.1925$ s),

odnosno najmanje tačnosti (slike 3.a, 4.a i 5.a) a srednja vrednost veličine RT_{30} , $\mu_{RT_{30}} = 1.1021$ s ima najmanju tačnost na $f_c = 4$ kHz sa $\sigma_{RT_{30}} = 0.4099$ s (slika 6.f);

Slika 5. Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra RT_{20} na: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz i f) 4000 Hz za sve MP crkve.



Slika 6. Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra RT_{30} na: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz i f) 4000 Hz za sve MP crkve.



3) $f_c = 500$ Hz (Kuttruff, 1991) je srednja frekvencija opsega u kome je ponašanje prostorije najmanje zavisno od disipacije u vazduhu i ekstremnih pojava. Zbog toga je i globalni pokazatelj stanja reverberacije u odzivu prostorija upravo vrednost vremena reverberacije na ovoj frekvenciji. Srednje vrednosti analiziranih parametara na ovoj frekvenciji su približne i iznose oko 2.7 s: $\mu_{EDT} = 2.7065$ s ($\sigma_{EDT} = 0.14$ s), $\mu_{RT_{10}} = 2.7353$ s ($\sigma_{RT_{10}} = 0.1512$ s),

$\mu_{RT_{20}} = 2.7297$ s, ($\sigma_{RT_{20}} = 0.1081$ s) i $\mu_{RT_{30}} = 2.6911$ s ($\sigma_{RT_{30}} = 0.0742$ s) a njihove funkcije raspodele verovatnoće prikazane su na slikama 3.c, 4.c, 5.c i 6.c, respektivno. Primećuje se da srednja vrednost $\mu_{RT_{30}} = 2.6911$ s ima najveću tačnost.

4) kada je reč o pojanju sa pevnice u crkvi u kome dominiraju muški glasovi i koje je karakteristično za manje crkve poput analizirane, maksimum zvučne energije je izražen u oktavi na 500 Hz. U pevanju mešovitoj hora maksimum energije je u oblasti oktava sa centralnim frekvencijama $f_c \in \{500, 1000\}$ Hz (Šumarac Pavlović D. et al. 2022). Srednje vrednosti vremena reverberacije na $f_c = 1$ kHz približno iznose oko 2.2s: $\mu_{EDT} = 2.1734$ s ($\sigma_{EDT} = 0.1514$ s), $\mu_{RT_{10}} = 2.2155$ s ($\sigma_{RT_{10}} = 0.131$ s), $\mu_{RT_{20}} = 2.2327$ s, ($\sigma_{RT_{20}} = 0.0522$ s) i $\mu_{RT_{30}} = 2.2327$ s ($\sigma_{RT_{30}} = 0.0608$ s). Njihove funkcije raspodele verovatnoće prikazane su na slikama 3 d, 4. d, 5. d i 6.d, respektivno. Ovde srednja vrednost $\mu_{RT_{20}} = 2.2327$ s ima najveću tačnost. Vrednosti i tačnosti ovih veličina na $f_c = 500$ Hz je već razmatrana.

5) oktavni pojas sa $f_c = 2$ kHz ima najveći doprinos indeksu razumljivosti govora (preko 30%). Srednje vrednosti vremena reverberacije su na ovoj frekvenciji, takođe, približne i iznose oko 1.6 s: $\mu_{EDT} = 1.5894$ s ($\sigma_{EDT} = 0.0473$ s), $\mu_{RT_{10}} = 1.6126$ s ($\sigma_{RT_{10}} = 0.0371$ s), $\mu_{RT_{20}} = 1.647$ s ($\sigma_{RT_{20}} = 0.018$ s) i $\mu_{RT_{30}} = 1.659$ s ($\sigma_{RT_{30}} = 0.0121$ s). Njihove funkcije raspodele verovatnoće prikazane su na slikama 3 e, 4. e, 5. e i 6.e, respektivno. Uočava se da srednja vrednost parametra RT_{30} , $\mu_{RT_{30}} = 1.659$ s ima najveću tačnost. Srednja vrednost $\mu_{EDT} = 1.5894$ s je najmanja od vrednosti analiziranih akustičkih parametara i ima i najmanju tačnost jer joj je srednja devijacija najveća, $\sigma_{EDT} = 0.0473$ s.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena statistička analiza akustičkih parametara vremena reverberacije: EDT , RT_{10} , RT_{20} i RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ dobijenih na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u crkvi “Sveti Prokopije” u Katunu, u Srbiji, sa ciljem da se istakne koja je od ovih veličina reprezent stanja reverberacije akustički tretirane crkve. Izračunate su srednje vrednosti, standardne devijacije i varijanse ovih veličina i prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara.

Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se da su: 1) na frekvencijama $f_c = 2$ kHz, koja ima najveći doprinos indeksu razumljivosti govora (preko 30%), srednje vrednosti vremena reverberacije približne i iznose oko 1.6 s: $\mu_{EDT} = 1.5894$ s ($\sigma_{EDT} = 0.0473$ s), $\mu_{RT_{10}} = 1.6126$ s ($\sigma_{RT_{10}} = 0.0371$ s), $\mu_{RT_{20}} = 1.647$ s ($\sigma_{RT_{20}} = 0.018$ s) i $\mu_{RT_{30}} = 1.659$ s

($\sigma_{RT_{30}} = 0.0121$ s) i da najveću tačnost među njima ima srednja vrednost parametra RT_{30} , $\mu_{RT_{30}} = 1.659$ s; 2) na frekvenciji $f_c = 500$ Hz, koja je bitna za pojanje u crkvi ali i na kojoj je ponašanje prostorije najmanje zavisno od disipacije u vazduhu i ekstremnih pojava, srednje vrednosti vremena reverberacije približne i iznose oko 2.7 s: $\mu_{EDT} = 2.7065$ s ($\sigma_{EDT} = 0.14$ s), $\mu_{RT_{10}} = 2.7353$ s ($\sigma_{RT_{10}} = 0.1512$ s), $\mu_{RT_{20}} = 2.7297$ s, ($\sigma_{RT_{20}} = 0.1081$ s) i $\mu_{RT_{30}} = 2.6911$ s ($\sigma_{RT_{30}} = 0.0742$ s) pri čemu se uočava da najveću tačnost među njima ima srednja vrednost parametra RT_{30} , $\mu_{RT_{30}} = 2.6911$ s.

Na osnovu prikazane analize akustičkih veličina, vremena reverberacije: EDT , RT_{10} , RT_{20} i RT_{30} na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz u ovom radu, zaključuje se da se vreme reverberacije RT_{30} može uzeti kao reprezent stanja reverberacije za akustički tretiranu srpsku pravoslavnu crkvu.

REFERENCE

- Djordjević Z., Novković D., & Andrić U. (2019). Archaeoacoustic Examination of Lazarica Church Acoustics, 1(2), pp.423-438.
- Eyring, C.F. (1930). Reverberation Time in 'Dead' Rooms. J. Acoust. Soc. Am. 1, pp. 217-241.
- ISO 3382 (1997). Acoustics - Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters.

- Jordan, V. L. (1970). Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques, *JASA*, Vol. 47, No. 2 (Part 1), pp. 408-412.
- Kuttruff, H. (1991). *Room Acoustics*. London: Elsevier.
- Millington, G. (1932). A Modified Formula for Reverberation. *J. Acoust. Soc. Am.* 4, pp: 69.
- Novosviat, A., Oleshowska, M., & Marchacz, M. (2020). The effect of acoustical remedies shanging the reverberation time for different frequencies in doma used for worship: A case stydy, *Applied Acoustics*, Vol. 160.
- Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *J. Acoust. Soc. Am.* 37.3, pp.: 402-419.
- Stojanović, V., Milivojević, Z., & Veličković, Z. (2017). Određivanje optimalnih parametara vremena reverberacije u oktagonskoj prostoriji pomoću statističke analize, 10th International Scientific Conference “Science and Higher Education in Function of Sustainable Development”, Mećavnik - Drvengrad, Užice, pp. 2.85 – 2.90.
- Thomson D. (2018). *Room Acoustics*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 413.
- Šumarac Pavlović, D., Mijić, M., Erdeljan, J., & Miljković, T. (2022). O ulozi akustičkih rezonatora u prostoru hrama Svetog Save u Beogradu, *Zbornik radova, LXVI Konferencija ETRAN, Novi Pazar, AK1.4*, pp. 1-4.