

## Određivanje optimalnih parametara vremena reverberacije u oktagonskoj prostoriji pomoću statističke analize

mr Violeta Stojanović<sup>1</sup>; dr Zoran Milivojević<sup>2</sup>; dr Zoran Veličković<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, violeta.stojanovic@vtsnis.edu.rs

<sup>2</sup> Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, zoran.milivojevic@vtsnis.edu.rs

<sup>3</sup> Visoka tehnička škola strukovnih studija, Niš, SRBIJA, zoran.velickovic@vtsnis.edu.rs

**Apstrakt:** U prvom delu rada definisani su akustički parametri prostorije: vreme reverberacije  $RT_{10}$ ,  $RT_{20}$ ,  $RT_{30}$ , i rano vreme reverberacije EDT. U drugom delu rada na osnovu snimljenih impulsnih odziva u „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu, i pomoću softverskih paketa EASERA i Matlab izvršena je statistička analiza dobijenih vrednosti ovih parametara. Komparacijom rezultata statističke analize zaključuje se koji akustički parametri su reprezentivni stanja reverberacije u analiziranoj oktagonskoj prostoriji.

**Cljučne reči:** Impulzni odziv prostorije, vreme reverberacije, statistička analiza.

### 1. UVOD

Akustika prostorija je naučna disciplina koja se zasniva na fizičkoj teoriji i akustičkim merenjima čijom kombinacijom se formira baza za proučavanje, modelovanje i projektovanje akustičkih prostora za različite potrebe [1]. Impulzni odziv prostorije RIR (*engl. Room Impulse Response*), predstavlja osnovni izvor informacija o akustičkim osobinama prostorije. On se dobija kao odziv prostorije na zvučnu pobudu i u potpunosti karakteriše ponašanje i osobine prostorije kao linearnog i vremenski invarijantnog akustičkog sistema. Ako se analizira subjektivni stav slušaoca, kao merilo akustičkog kvaliteta, vremenska struktura impulsnog odziva se može razložiti na: direktan zvuk, rane refleksije i reverberaciju.

Deo odziva, reverberacija se opisuje objektivnim parametrom koji se zove vreme reverberacije RT, (*engl. Reverberation Time*). Od vremena reverberacije zavisi razumljivost i kvalitet zvuka (govora ili muzike) u prostoriji. Ako je poznato vreme reverberacije neke prostorije onda je moguće proceniti i druge objektivne akustičke parametre prostorije: indeks razumljivosti govora, STI (*engl. Speech Transmission Index*), indeks jasnoće muzike, C (*engl. Clarity*), definisanost, D (*engl. Definition*), briljantnost, TR (*engl. Brilliance*). Što je veće vreme reverberacije lošija je razumljivost govora u prostoriji ali je bolji subjektivni doživljaj muzike. Optimalno vreme reverberacije zavisi od namene prostorije i od njene zapremine [2]. Vreme reverberacije je parametar na kome se bazira karakterizacija akustike prostorije zbog toga što se ovaj parametar relativno lako može meriti i predvideti sa prihvatljivom preciznošću.

Sabine (1900.) je izvršio prva merenja vremena reverberacije [3]. On je 1922. dao empirijsku jednačinu za procenu parametra RT koja je bila bazirana na analizi zapremine, dimenzija i koeficijenata apsorpcije zidova prostorije. Nakon toga teorijom reverberacije bavili su se Franklin (1903), Jaeger (1911), Fokker (1924), Buckingham (1925), Schuster i Vaetzmann (1929) [4]. Norris i Eyring (1930.) su objavili empirijsku jednačinu kod koje je procenjeno i izmenjeno RT imalo bolje podudaranje kod manjih reverberacionih prostorija u odnosu na predikciju Sabinovim obrascem. Milington i Sette (1933.) u svojoj jednačini uzimaju u obzir različite apsorpcione koeficijenti zidova prostorije. Posle 25 god. ovim problemom bavio se i Ficroj (1959). Šreder je 1965. god. predložio algoritam procene parametra RT koji se izračunava analizom akustičkog impulsnog odziva prostorije [5]. Rano vreme reverberacije EDT (*engl. Early Decay Time*) , definisano je od strane Jordan-a 1970. [6]. Ovom problematikom su se bavili i Kuttruff (1975), Cremer i Muller (1978), Arau 1988, Nilsson (1992) i Tohiana (1995) [4].

U ovom radu je na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u oktagonskoj sali, snimljenih u projektu „Centre for Digital Music“ Univerziteta „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“ u Londonu [7], i korišćenjem programskih paketa EASERA 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, varijanse, standardne devijacije i prikazani su grafici raspodele verovatnoće rezultata merenja ovih akustičkih parametara. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se koji su akustički parametri 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 definisani su analizirani akustički parametri, u sekciji 3 objašnjen je eksperiment, prikazani su rezultati i izvršena je analiza rezultata i sekcija 4 je zaključak.

## 2. VREME REVERBERACIJE

Osnovni objektivni parametar u akustici prostora je vreme reverberacije. Reverberacija prostorije se opisuje sa sledeća dva parametra: vreme reverberacije  $RT_{60}$  i rano vreme reverberacije  $EDT$ .

$RT_{60}$  je vreme potrebno da zvučna energija u prostoriji opadne nakon isključenja izvora, na milioniti deo vrednosti u odnosu na stacionarno stanje [1]. 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.

Definišu ga Sabin-ova (1885. god.) i Eyring-ova jednačina (1930. godine) [1]:

$$RT_{60} = \frac{0.16V}{A}, \quad (1)$$

$$RT_{60} = \frac{0.16V}{-S \ln(1 - \alpha)}, \quad (2)$$

respektivno. U jednačinama je:  $V$  [ $m^3$ ] - ukupna zapremina prostorije;  $A$  [ $m^2$ ] - ukupna apsorpcija u prostoriji;  $S$  [ $m^2$ ] - suma svih površina u prostoriji;  $\alpha$  - srednji koeficijent apsorpcije. Sabin-ov obrazac je primenljiv za prostorije sa približno difuznim zvučnim poljem gde je  $RT > 0.8s$ , dok Eyring-ov obrazac daje preciznije rezultate za prostorije sa  $RT < 0.8s$ .

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, ( $RT_{10}$ ), 20 dB, ( $RT_{20}$ ), 30 dB, ( $RT_{30}$ ) i to polazeći od -5 dB u odnosu na maksimalni nivo.

Rano vreme reverberacije  $EDT$ , je relevantan podatak kada je u pitanju odziv prostorija sa izraženom ulogom ranih refleksija [1]. 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. Zavisi od geometrije prostora. Ukoliko  $EDT$  značajnije odstupa od vremena reverberacije pokazuje se da je dominantno za subjektivni doživljaj reverberantnosti prostora.

## 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I ANALIZA

### 3.1. Eksperiment

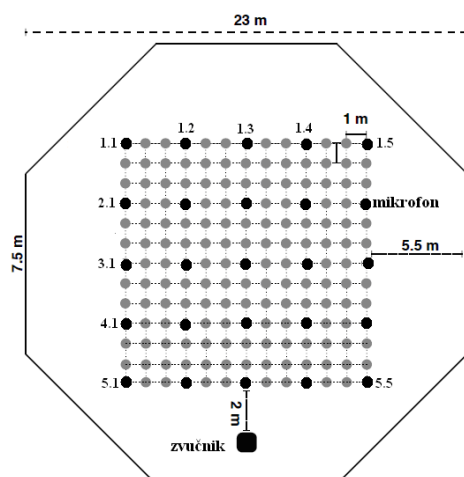
U ovom radu izvršena je statistička analiza akustičkih parametara:  $EDT$ ,  $RT_{10}$ ,  $RT_{20}$  i  $RT_{30}$  na centralnim frekvencijama  $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000\}$  Hz. u sali „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu (Slika. 1) sa ciljem određivanja parametra – reprezenta stanja reverberacije u sali. Pri analizi su korišćeni impulсни odzivi snimljeni 2008. god [7].



Slika 1: Prikaz „Octagon“ sale.

Na osnovu impulsnih odziva i programskog paketa EASERA određene su vrednosti objektivnih akustičkih parametara koji karakterišu vreme reverberacije u sali. Statističkom analizom, koja je odrađena pomoću programskog paketa Matlab, utvrđeno je koji akustički parametar ima najtačniju vrednost, odnosno koji je akustički parametar reprezent stanja reverberacije u sali.

Za akustičku analizu sale, u ovom radu, uzeto je 25 mernih tačaka ( od 169) čiji su položaji prikazani na slici. 2.



Slika 2 Prikaz položaja mernih tačaka i zvučnog izvora u sali za vreme snimanja impulsnih odziva.

### 3.2. Baza akustičkog impulsnog odziva

Baza akustičkih impulsnih odziva je objavljena u [7]. Bazu podataka čine wav fajlovi koji su dobijeni merenjem impulsnih odziva u 169 mernih tačaka prostorije „Octagon“, snimljenih od strane „Centre for Digital Music“ sa „Queen Mary“ Univerziteta u Londonu. „Octagon“ je građevina sagrađena u viktorijanskom stilu, 1888. god. u istočnom Londonu čija je osnovna namena bila glavna biblioteka „Queen Mary’s College“. Danas ona predstavlja objekat koji se koristi za održavanje konferencija, raznih svečanosti, izložbi i td. „Octagon“ ima 8 zidova visine 7.5 m koji su prekriveni knjigama, drveni pod i plafon obloženi gipsom. Kupola plafona je visine 21 m. Zapremina je 9500 m<sup>3</sup>. Merenja impulsnih odziva vršena su pomoću pobudnog log -sweep signala u trajanju od 2 s sa  $f_s = 96$  kHz sa 3 BpS. Pri ovom eksperimentu korišćen je zvučnik „Genelec“ 8250A i omnidirekcionni mikrofon DPA 4006.

### 3.3. Rezultati eksperimenta

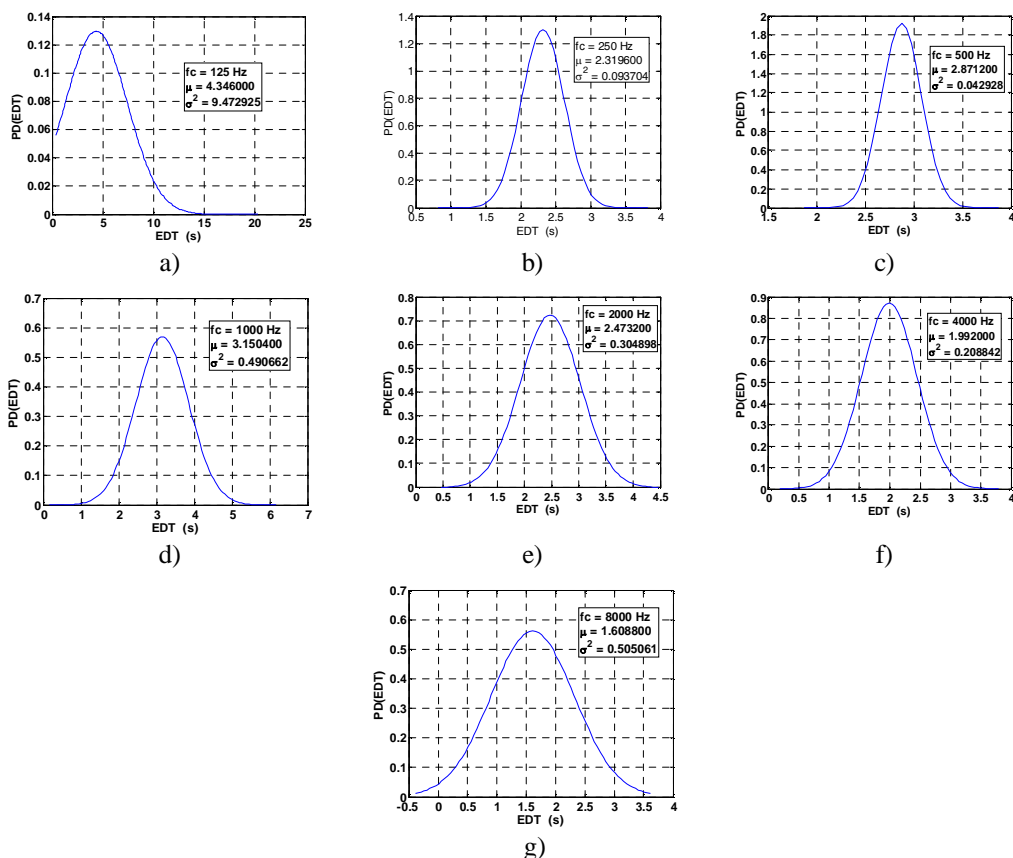
U tabeli 1 prikazane su srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije akustičkih parametara  $EDT$  i  $RT_{10}$ , a u tabeli 2 su prikazane srednje vrednosti, varijanse i standardne devijacije akustičkih parametara  $RT_{20}$  i  $RT_{30}$ . Na slikama (3 – 6) prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara  $EDT$ ,  $RT_{10}$ ,  $RT_{20}$  i  $RT_{30}$  na centralnim frekvencijama.

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

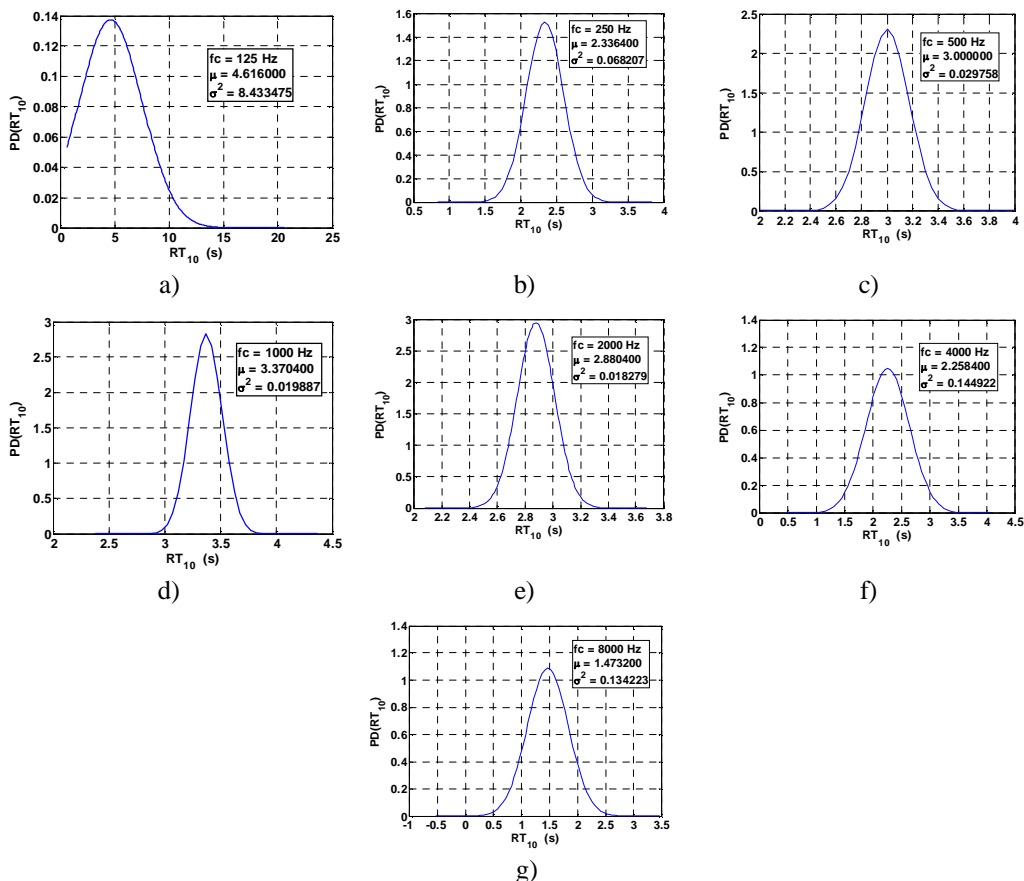
$f$ (Hz)	$\mu_{EDT}$ (s)	$\sigma_{EDT}^2$ (s <sup>2</sup> )	$\sigma_{EDT}$ (s)	$\mu_{RT_{10}}$ (s)	$\sigma_{RT_{10}}^2$ (s <sup>2</sup> )	$\sigma_{RT_{10}}$ (s)
125	4.3460	9.4729	3.078	4.6160	8.4335	2.904
250	2.3196	0.0937	0.306	2.3364	0.0682	0.261
500	2.8712	0.0429	0.207	3	0.0298	0.173
1000	3.1504	0.4907	0.7	3.3704	0.0199	0.141
2000	2.4732	0.3049	0.552	2.8804	0.0183	0.135
4000	1.9920	0.2088	0.457	2.2584	0.1449	0.381
8000	1.6088	0.5051	0.711	1.4732	0.1342	0.366

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

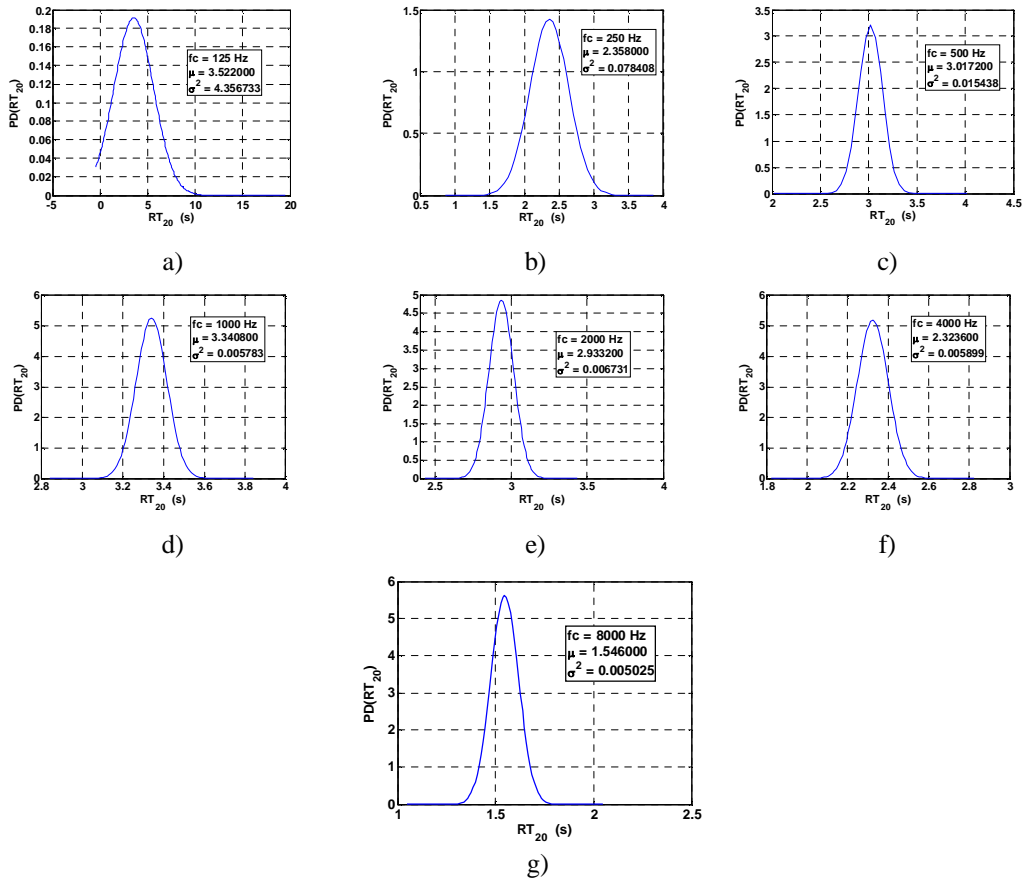
$f$ (Hz)	$\mu_{RT_{20}}$ (s)	$\sigma_{RT_{20}}^2$ (s <sup>2</sup> )	$\sigma_{RT_{20}}$ (s)	$\mu_{RT_{30}}$ (s)	$\sigma_{RT_{30}}^2$ (s <sup>2</sup> )	$\sigma_{RT_{30}}$ (s)
125	3.5220	4.3567	2.087	3.1828	3.7241	1.93
250	2.3580	0.0784	0.28	2.4824	0.3204	0.566
500	3.0172	0.0154	0.124	2.9920	0.0181	0.135
1000	3.3408	0.0058	0.076	3.2288	0.0032	0.057
2000	2.9332	0.0067	0.082	2.9252	0.0039	0.062
4000	2.3236	0.0059	0.077	2.4068	0.0028	0.053
8000	1.5460	0.0050	0.071	1.6028	0.0031	0.056



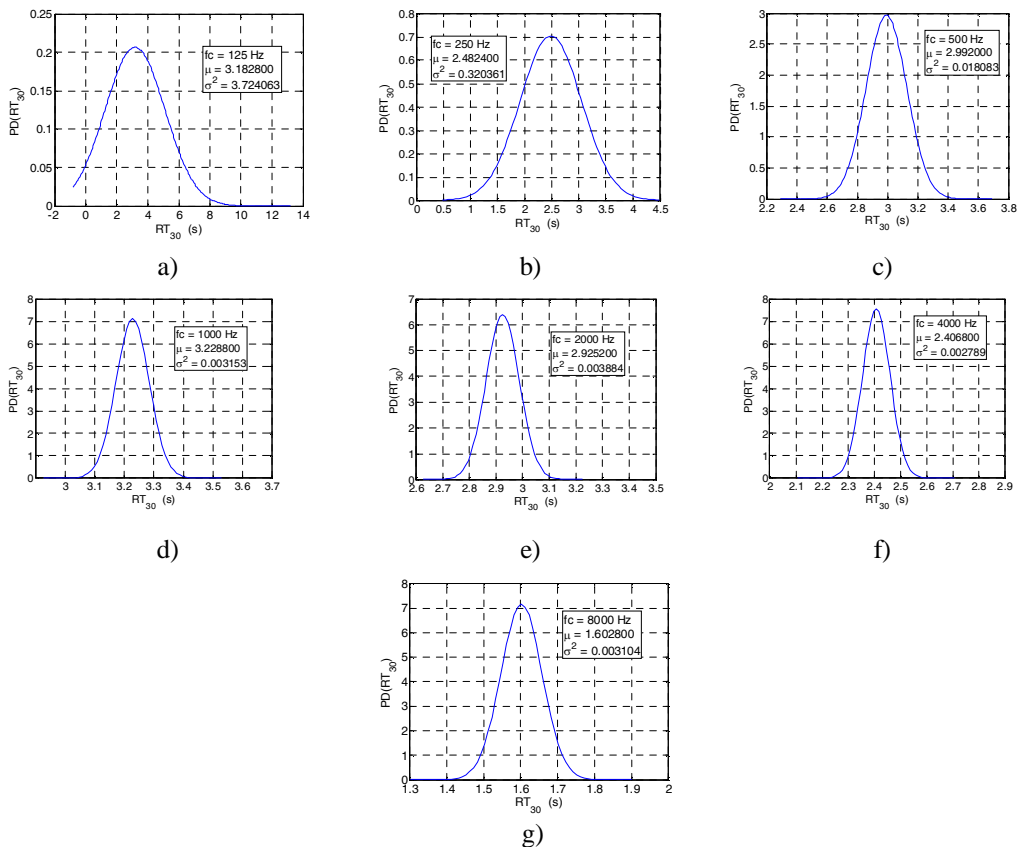
Slika 3 Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra  $EDT$  za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.



Slika 4: Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra  $RT_{10}$  za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.



Slika 5: Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra  $RT_{20}$  za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.



Slika 6: Funkcija raspodele verovatnoće rezultata merenja parametra  $RT_{30}$  za: a) 125 Hz, b) 250 Hz, c) 500 Hz, d) 1000 Hz, e) 2000 Hz, f) 4000 Hz i g) 8000 Hz.

### 3.4. Analiza rezultata

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 1. i 2. i na slikama (3. – 6.) zaključuje se da je statistička analiza standardnih devijacija analiziranih akustičkih parametara u frekvencijskom oktavnom opsegu pokazala da:

1) najmanje standardne devijacije, a samim tim i najveću tačnost, imaju vrednosti: a)  $EDT$  na  $f_c = 500$  Hz ( $\mu_{EDT} = 2.87$  s i  $\sigma_{EDT} = 0.207$  s), b)  $RT_{10}$  na  $f_c = 2$  kHz ( $\mu_{RT_{10}} = 2.88$  s i  $\sigma_{RT_{10}} = 0.135$  s), c)  $RT_{20}$  na  $f_c = 8$  kHz ( $\mu_{RT_{20}} = 1.546$  s i  $\sigma_{RT_{20}} = 0.071$  s) i d)  $RT_{30}$  na  $f_c = 4$  kHz ( $\mu_{RT_{30}} = 2.4068$  s i  $\sigma_{RT_{30}} = 0.053$  s);

2) najveće vrednosti standardnih devijacija, odnosno, najmanju tačnost svi analizirani akustički parametri imaju na  $f_c = 125$  Hz:  $\mu_{EDT} = 4.346$  s sa  $\sigma_{EDT} = 3.078$  s,  $\mu_{RT_{10}} = 4.616$  s sa  $\sigma_{RT_{10}} = 2.904$  s,  $\mu_{RT_{20}} = 3.522$  s sa  $\sigma_{RT_{20}} = 2.087$  s i  $\mu_{RT_{30}} = 3.18$  s sa  $\sigma_{RT_{30}} = 1.93$  s.

Globalni pokazatelj stanja reverberacije u odzivu prostorija je vrednost vremena reverberacije na  $f_c = 500$  Hz [1]. To je srednja frekvencija opsega u kome je ponašanje prostorije najmanje zavisno od disipacije u vazduhu i ekstremnih pojava na najnižim frekvencijama. Analizirane srednje vrednosti vremena reverberacije oktavonske prostorije su na ovoj frekvenciji približne i iznose oko 3s:  $\mu_{EDT} = 2.87$  s ( $\sigma_{EDT} = 0.043$ s),  $\mu_{RT_{10}} = 3$  s ( $\sigma_{RT_{10}} = 0.173$  s),  $\mu_{RT_{20}} = 3.017$  s, ( $\sigma_{RT_{20}} = 0.124$  s) i  $\mu_{RT_{30}} = 2.99$  s ( $\sigma_{RT_{30}} = 0.135$  s). Primećuje se da srednja vrednost  $\mu_{RT_{20}} = 3.017$  s ima najveću tačnost (Slika 5 c)).

Najveći doprinos indeksu razumljivosti govora (preko 30%) ima oktavni pojas sa  $f_c = 2$  kHz. Srednje vrednosti vremena reverberacije su na ovoj frekvenciji, takođe, približne i iznose oko 3s:  $\mu_{RT_{10}} = 2.88$  s ( $\sigma_{RT_{10}} = 0.135$  s),  $\mu_{RT_{20}} = 2.93$  s ( $\sigma_{RT_{20}} = 0.082$  s) i  $\mu_{RT_{30}} = 2.92$  s ( $\sigma_{RT_{30}} = 0.062$  s). Uočava se da srednja vrednost  $\mu_{RT_{30}} = 2.92$  s ima najveću tačnost (Slika 6 e)). Srednja vrednost  $\mu_{EDT} = 2.47$  s je najmanja od vrednosti analiziranih akustičkih parametara, ali ona ima i najmanju tačnost jer joj je srednja devijacija najveća,  $\sigma_{EDT} = 0.55$  s.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena statistička analiza akustičkih parametara vremena reverberacije:  $EDT$ ,  $RT_{10}$ ,  $RT_{20}$  i  $RT_{30}$  na centralnim frekvencijama  $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000\}$  na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva u sali „Octagon at the Mile End campus of Queen Mary“, na Univerzitetu u Londonu. Izračunate su srednje vrednosti, varijanse, standardne devijacije i prikazane su funkcije raspodele verovatnoće rezultata merenja akustičkih parametara. Komparacijom dobijenih rezultata zaključuje se da je vreme reverberacije sa najmanjom tačnošću određeno samo na  $f_c = 125$  Hz. Globalni pokazatelj stanja reverberacije u odzivu prostorija je optimalna vrednost vremena reverberacije  $RT_{20}$  na  $f_c = 500$  Hz:  $\mu_{RT_{20}} = 3.017$  s, ( $\sigma_{RT_{20}} = 0.124$  s). Na frekvencijama  $f_c \in \{500, 1000, 2000\}$  Hz, koje su bitne za razumljivost govora, svi analizirani parametri imaju približnu srednju vrednost, oko 3 s. Najveći doprinos indeksu razumljivosti govora u oktavnom pojasu sa  $f_c = 2$  kHz ima optimalna vrednost vremena reverberacije  $RT_{30}$ :  $\mu_{RT_{30}} = 2.92$  s ( $\sigma_{RT_{30}} = 0.062$  s).

Razumljivost govora u oktavonskoj prostoriji je tema koja će se obrađivati u daljim istraživanjima.

## LITERATURA

- [1] H. KUTTRUFF: *Room Acoustics*, E&FN Spon, London, 2000.
- [2] ISO 12001:1998: *Acoustics Noise emitted by machinery and equipment*, Rules for the drafting and presentation of a noise test code, 1998.
- [3] SABINE, W.: *Collected Papers on Acoustics* (1922), Harvard University Press.Reimpresión Dover, 1964.
- [4] R. NEUBAUER, B. KOSTEK: *Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non – uniformly distributed sound absorption*, Arhives of Acoustics, 26, 3, 183 – 201, 2001.
- [5] SCHROEDER, M. R.: *New method of measuring reverberation time* JASA 38 (1965), S. 329 and 40, S. 549.
- [6] JORDAN, V. L.: *Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques*, JASA, Vol. 47, No. 2 (Part 1), pp. 408-412, 1970.
- [7] R. STEWART, M. SANDLER: *Database of omnidirectional and B – format room impulse responses*, ICASSP – 8, pp. 165 -168, 2010.