

Akustičke osobine petničke crkve

Ispitivane su globalne akustične osobine crkve u Petnici: vreme reverberacije, apsorpcije i koeficijenta apsorpcije, u zavisnosti od frekvencije zvuka. Rad predstavlja deo akcije ETF-a Beograd na prikupljanju podataka o akustičnosti srpskih pravoslavnih crkava.

Uvod

Zvukom se u užem smislu značenja te reči naziva sve ono što čujemo. Prema fizičkoj definiciji zvuk je oscilovanje u gasovitim, tečnim i čvrstim elastičnim telima. Možemo takođe reći da se zvuk sastoji od talasanja molekula koje u njihov ravnotežni položaj vraćaju njihove međumolekulske sile (Jelaković 1962). Pojedine čestice tela međusobno su vezane elastičnim silama. Pomak jedne čestice ili jednog dela te sredine preneće se preko elastičnih veza na okolne delove. Tako će se početni pomak preneti na celu sredinu.

Zvuk se karakteriše veličinama kao što su: brzina prostiranja zvuka (C [m/s]), frekvencija (ν [Hz]), talasna dužina (λ [m]), zvučni pritisak (p [Pa]), intezitet zvuka (I [W/m²]), gustina zvučne energije (w [J/m³]).

Brzina zvuka u vazduhu zavisi od gustine (ρ_0), od atmosferskog pritiska (p_0), i Poisson-ove konstante (γ). Širenje zvuka je adijabatski proces, a to znači da se toplota koja nastaje pri povećanju gustine vazduha ne može zbog brzine procesa odvesti, što je uzrok pojave Poisson-ove konstante u datoj jednačini. Brzina kojom se širi zvuk u vazduhu (ili bilo kom gasovitom telu) može se računati po formuli:

$$C = \sqrt{\frac{p_0 \gamma}{\rho_0}} \quad (1)$$

gde je p_0 atmosferski pritisak, γ Puasonava konstanta, ρ_0 gustina vazduha.

*Dejan Grabovičkić
(1981), Beograd,
Proleterskih brigada
5a, učenik 2. razreda
Matematičke
gimnazije u Beogradu*

*Ranko Radovanov
(1981), Srbobran,
Bardova 2/1, učenik
2. razreda
Politehničke
akademije u Beogradu*

MENTOR:

*Dr Miomir Mijić,
redovni profesor na
Elektrotehničkom
fakultetu u Beogradu*

Sa porastom nadmorske visine sve je manji atmosferski pritisak p_o , isto tako i gustina vazduha. Zato promena atmosferskog pritiska neznatno utiče na brzinu zvuka. Međutim, brzina zvuka dosta zavisi od temperature. Ta zavisnost se približno izražava sledećim izrazom (Jelaković 1962):

$$c \text{ [m/s]} = 331.4 + 0.6 T \quad (2)$$

gde je T – temperatura vazduha u °C. Na sobnoj temperaturi brzina zvuka u vazduhu je $c = 343$ m/s

Frekvencija je broj oscilacija u sekundi, koje čestica napravi oko svog ravnotežnog položaja. Ljudsko uho može da čuje frekvencije od 16 Hz do 20 kHz. Karakteristika ljudskog uha je da registruje logaritamsku promenu frekvencije, tako da frekvencijska osa na graficima nije linearna već logaritamska, pa su oktavne frekvence (tj. frekvence koje imaju osobinu da niz koji grade predstavlja geometrijsku progresiju sa količnikom dva) linearno raspoređene (Jelaković 1962).

Talasna dužina je put koji talas pređe za jedan period ili rastojanje između dve tačke talasnog fronta u fazi. Talasna dužina može se izraziti kao

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (3)$$

Jačina (intenzitet) zvučnog talasa definiše se odnosom srednje snage koja prođe kroz jedinicu površine koja je normalna na pravac prostiranja. Ovo je tzv. objektivna¹ jačina zvuka. Usled velikog opsega u kome se vrše akustička merenja, koristi se logaritamska skala. Prema ovoj skali, nivo jačine zvučnog talasa je definisan jednačinom

$$n = \log \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

gde je $I_0 = 10^{-12}$ W/m² tzv. prag čujnosti, i ona predstavlja najmanju vrednost intenziteta zvuka koji se može čuti. Nivo jačine zvuka se izražava u decibelima (dB).

Subjektivna jačina zvuka odnosi se na osećaj u svesti ljudskog posmatrača. Ova pojam je čisto subjektivan, nasuprot objektivnoj definiciji jačine zvuka, i ne može se meriti uređajima.

¹Objektivna jačina zvuka je fizička veličina koja se izražava u W/m². Međutim ljudsko uho registruje logaritamsku promenu, pa se uvodi veličina poznata kao subjektivna jačina zvuka.

Vreme reverberacije i koeficijent apsorpcije

Pri kretanju zvuka u zatvorenim prostorijama zvuk nailazi na prepreke (zidovi, vazduh). U interakciji zvuka sa apsorberima dolazi do odbijanja i apsorpcije zvuka i pri tom procesu pojavljuju se gubici energije tj. ab-

sorberi se zagrevaju. Karakteristika koja definiše moć apsorpcije naziva se koeficijent apsorpcije. Koeficijent apsorpcije po definiciji jednak je odnosu absorbovane energije P_α i ukupne energije P_u (Jelaković 1962).

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P_u} \quad (5)$$

Dok izvor emituje novu energiju, ranije emitovana energija takođe se zadržava u prostoriji, ali oslabljena usled apsorpcije na graničnim površinama. To znači da se ukupna akustična energija u početku povećava. Gubici energije na graničnim površinama srazmerni su raspoloživoj energiji, dakle ukupnoj energiji prostorije. Kako ona raste rastu i gubici u apsolutnom iznosu. U jednom trenutku absorbovana energija postaje jednaka energiji koju emituje izvor. Tada ukupna akustička energija prestaje da raste, pa samim tim prestaje da raste i intenzitet zvuka. Nastupilo je takozvano stacionarno stanje, koje ostaje nepromenjeno dok je zvučni izvor uključen. Usled dalje apsorpcije, pri isključenju zvučnog izvora dolazi do opadanja akustičke energije i zvučnog inteziteta. Porast zvuka po subjektivnoj oceni je veoma brz (stacionarno stanje uspostavlja se u kratkom vremenskom intervalu), dok je opadanje postepeno i ravnomerno po zakonu

$$I = I_0 e^{-kt} \quad (6)$$

gde je I_0 početni intezitet zvuka, k pozitivna konstanta i t vreme.

Pošto ljudsko uho oseća 'logaritamski', jednačina opadanja zvučnog inteziteta je

$$P = -K t \lg e + \lg I_0 \quad (\lg \equiv \log_{10}), \quad (7)$$

što znači da čovek linearno registruje opadanje snage zvuka izraženog u decibelima.

Kao merilo brzine opadanja zvuka upotrebljava se pojam *vremena reverberacije*, pri čemu se pod reverberacijom podrazumeva niz uzastopnih, sve slabijih refleksija koje prate direktan zvuk u prostoriji i koje se uhom ne mogu međusobno razlučiti.

Po definiciji, vreme reverberacije je vreme potrebno da intenzitet zvuka opadne (po isključenju izvora) na milioniti deo svoje prvobitne vrednosti odnosno za 60 dB. Međutim, mogućnost registrovanja slabljenja od 60 dB bila bi otežana, s jedne strane usled nemogućnosti proizvodnje inteziteta zvuka od 60 dB (Gambiroža 1997), a s druge strane zato što bi signal niskog nivoa pri kraju utišavanja sigurno nestao u buci koja vlada u prostoriji. Zato se gleda pad zvuka od 30 dB (u odnosu na početni nivo).

Vremena reverberacije merena su na frekvencijama oktava od 125 Hz do 8 kHz. Na osnovu očitanih vrednosti vremena reverberacije, proračuna-

tih vrednosti površine i zapremine prostorije, pomoću Sabine-ovog obrasca izračunava se prosečan koeficijent apsorpcije. Krajem XIX veka američki naučnik W. C. Sabine je vršio niz eksperimenata kojima je proučavao akustičnost prostorija tj. zavisnost vremena reverberacije od globalnih osobina prostorije. Ovim postupkom je došao do rezultata koji su mu pomogli da izvede sledeću formulu (Jelaković 1962).

$$T = \frac{0.161 V}{A} \quad (8)$$

Imajući u vidu da je $A = \alpha S$, pri čemu je

$$\alpha = \frac{0.161 V}{T S}, \quad (9)$$

gde je T – vreme reverberacije, V – zapremina prostorije, A – apsorpcija, α – koeficijent apsorpcije, S – površina prostorije

Ukupna apsorpcija prostorije jednaka je zbiru apsorpcija svih površina

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n, \quad (10)$$

gde su $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ koeficijenti apsorpcije pojedinih materijala, a srednji koeficijent apsorpcije je dat izrazom

$$\alpha_{sr} = \frac{A}{S_u}. \quad (11)$$

Merenja i obrada mernih rezultata

Petnička crkva je najstarija u valjevskom kraju. Posvećena je Uspenju Presvete Bogorodice. Izgrađena je 1864. godine. Metalni krov izgrađen je 1923. godine a obnovljen je 1996. Unutrašnjost crkve renovirana je 1994. godine i ovo skorašnje renoviranje veoma je uticalo na povećanje vremena reverberacije, zbog čega je istraživanje akustičnosti crkve i zanimljivo.

Aparatura

Prilikom merenja vremena reverberacije upotrebljena je sledeća oprema:

1. Neusmereni sferni zvučni izvor (ETF Beograd)
2. Generator šuma sa pojačavačem (ETF Beograd)
3. Mikrofon SHURE SMT-8
4. Digitalni audio rekorder TASCAM TD-1

Postupak

Zvučni izvor postavljen je na visini 1.7 m iznad nivoa poda u delu naosa. Tokom merenja zvučni izvor je stacionaran. Merenja su vršena na četiri mesta (m1, m2, m3, m4). Za svako mesto vršena su tri merenja. Na svim mernim mestima mikrofoni se nalazio na visini od oko 2 m. Prilikom svih ovih merenja zvučni signal je sniman digitalnim audio rekorderom. Dobijeni signal u računaru je filtriran oktavnim frekvencama, i grafički je predstavljeno opadanje zvuka na tim frekvencijama. Filtriranje je proces odabiranja frekvenci iz belog šuma. Grafici koji su dobijeni ovim putem obrađivani su programom, koji je napisan u MATLAB-u, koji je računao vreme reverberacije i standardnu devijaciju. Standardna devijacija je mera za prosečnu fluktuaciju slučajne promenljive oko svoje vrednosti. Definiše se kao:

$$\sigma = (1/n) \times \sqrt{\sum_{i=1}^n F_i (x_i - \bar{x})^2}$$

gde je x_i merena vrednost vremena reverberacije, F_i frekvencija odgovarajuće verovatnoće za tu vrednost, a \bar{x} srednja vrednost vremena reverberacije.

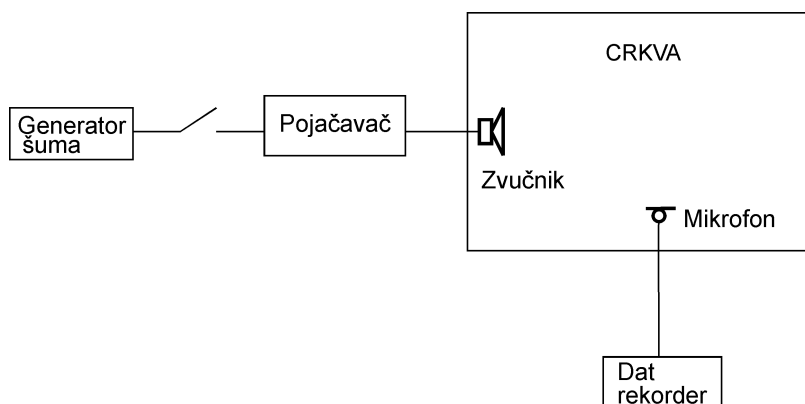
Teoretski, promene koje nastaju u zatvorenim prostorijama pri uključivanju i isključivanju zvuka ne zavise od mesta posmatranja, nego samo od globalnih karakteristika crkve – površine, zapremine i srednjeg koeficijenta apsorpcije.

Primećuje se da su vremena reverberacije različita na svim frekvencijama, jer su kolebanja nivoa zvuka pri opadanju za razna mesta uvek drugačija, pa su i dobijeni rezultati različiti.

Grafike (m1r1, m1r2, m1r3, m2r1, m4r3 na određenim frekvencama: 125 Hz, 250 Hz, 8 kHz) dobili smo *wave* analizom signala koji smo snimili dat-rekorderom u crkvi. Vreme reverberacije dobili smo uz pomoć već pomenutog programa, na sledeći način:

Prvo se softverski na grafiku odredi srednja jačina zvuka u stacionarnom stanju. Zatim se meri vreme pada jačine zvuka od –5 dB do –35 dB, i to vreme predstavlja vreme reverberacije. Međutim, usled ovakvog načina određivanja vremena reverberacije pojavljuje se greška, koja se predstavlja standardnom devijacijom.

Snimanje zvuka smo vršili korišćenjem navedene aparature prema sledećoj šemi (slika 1).



Slika 1.
Blok-šema merenja.

Figure 1.
Instrumental setup.

Površina i zapremina petničke crkve

Površine i zapremine pojedinih delova crkve dati su u tabeli 1.

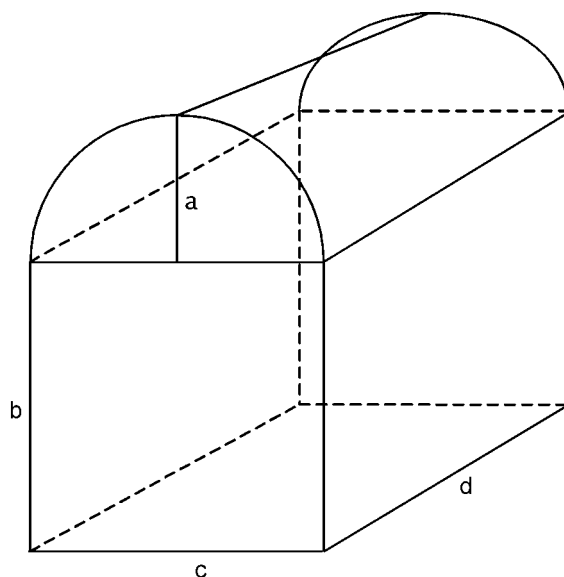
Tabela 1. Površine i zapremine pojedinih elemenata petničke crkve

	Površina poda	Površina svoda	Površina zida	Ukupna površina	Ukupna zapremina
Priprata	25.1	21.2	176.4	222.7	149.3
Lađa	25.1	31.0	86.2	142.3	126.0
Naos	29.3	34.8	81.4	145.5	154.5
Oltar	11.2	17.7	42.2	71.1	68.5
Crkva	90.7	104.7	386.2	581.6	498.3

Proračuni su vršeni uz pomoć građevinske dokumentacije. Međutim, u dokumentaciji smo imali samo detaljni plan poda tako da smo ostale karakteristike merili na licu mesta korišćenjem metra i upoređivanjem dimenzija. Naravno usled ovakvog rada pojavljuju se greške.

Greške pri merenju površine i zapremine

Sve površine i zapremine u crkvi mogu se aproksimacijom predstaviti preko geometrijske figure koja je prikazana na slici 2. Upravo zato smo i mi sveli unutrašnjost crkve na niz ovih oblika. Greške prilikom merenja visina su najveće. Zato se ta greška pojavljuje i pri računanju površine i zapremine. Kao apsolutna greška uzeta je Δm koja je jednaka 0.1 m. Samo kod prozora i vrata zbog preciznijeg merenja uzeta je vrednost od 0.05 m.



Slika 2.
Aproksimativna šema osnovne geometrije unutrašnjosti petničke crkve.

Figure 2.
Geometrical approximation of interior of Petnica's church.

Greška koja je nastala pri merenju površina svih zidova (zid i svod) se može izračunati preko date figure, iz razloga što je unutrašnja površina date figure predstavlja površinu svih zidova za određeni deo crkve

Greške površine

Da bi izračunali unutrašnju površinu moramo da izračunamo obim poprečnog preseka date figure. Obim preseka se računa po formuli

$$O = O_1 + 2b$$

gde je O_1 poluobim elipse, čije su dužine osa c i $2a$.

Iz tog razloga možemo da kažemo da je greška pri izračunavanju obima preseka ΔO jednaka zbiru apsolutnih grešaka koji su nastali pri merenju dužine b i (Δb) izračunavanju obima poluelipse ΔO_1 .

Pošto su c i d konstante važi:

$$\Delta O = \frac{\Delta a}{2} + 2 \Delta b \quad \Delta a = \Delta b = \Delta m$$

Ako označimo unutrašnju površinu sa P_u , tada važi:

$$\Delta P_u = d \Delta O.$$

ΔP_u predstavlja grešku unutrašnje površine.

Greške površine poprečnog preseka i zapremine

Neka je površina poprečnog preseka P . Podelimo datu površinu na dva dela koji predstavljaju površine poluelipse i pravougaonika i označimo ih sa P_1 i P_2 .

$$P = \frac{ac}{4} \cdot \pi + bc$$

Iz razloga što je c konstanta sledi:

$$\Delta P = \frac{\Delta ac}{4} \cdot \pi + c \Delta b$$

Pošto se zapremina ove figure se izračunava po formuli $V = dP$, pri čemu je d konstanta sledi:

$$\Delta V = d \Delta P.$$

Zahvaljujući ovim formulama koje smo sada izveli, elementarnim izračunavanjem dobijamo sve potrebne greške za sve delove crkve koje smo prikazali u sledećoj tabeli.

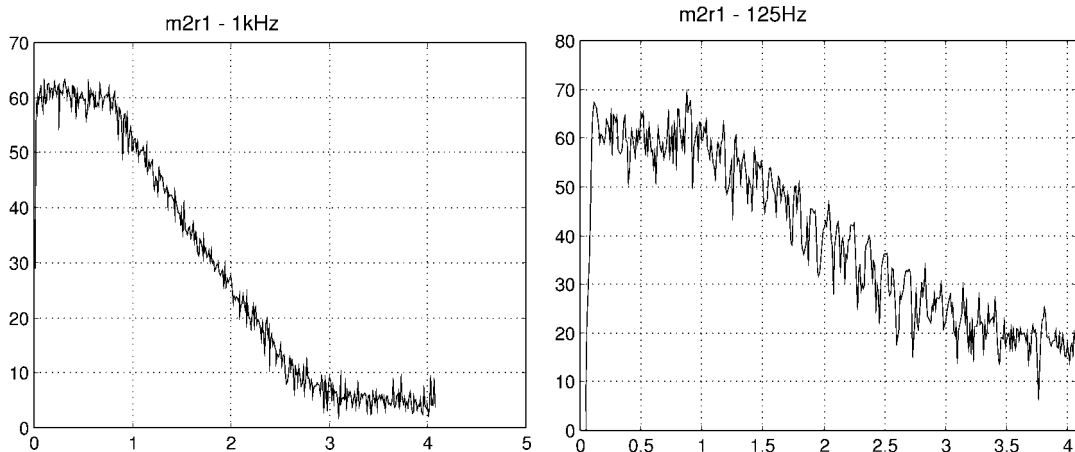
Tabela 2. Greške određivanja geometrijskih karakteristika

	Apsolutna greška površine [m ²]	Relativna greška površine [%]	Apsolutna greška zapremine [m ²]	Relativna greška zapremine [%]
Priprata	9.0	4.8	5.0	3.3
Ladja	7.0	7.2	6.0	4.1
Naos	7.0	8.4	6.0	3.9
Oltar	3.0	6.1	3.0	4.5
Crkva	30.0	5.2	20.0	4.0

Slika 3.
Jačina zvuka (dB) u funkciji vremena.

Primeri grafika zavisnosti jačine zvuka u dB u odnosu na vreme od uključivanja zvučnog izvora do pada jačine od 30 dB (merno mesto 2, merenje 1), na frekvencijama 1000 Hz i 125 Hz dati su na slici 3.

Figure 3.
Sound strength (dB) versus time (s).



Prikaz vremena reverberacije, srednjeg vremena reverberacije, standardne devijacije i koeficijenta apsorpcije u zavisnosti od frekvenci dat je u tabeli 3. Srednje vreme reverberacije je aritmetička sredina vremena dva-naest merenja na datim frekvencama.

Tabela 3. Vreme reverberacije i apsorpcija korišćene frekvencije zvuka

Merenje	Frekvencija [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
m1-r1	3.32	3.22	2.82	2.24	1.81	1.71	1.43
m1-r2	3.42	3.30	2.80	2.25	2.00	1.67	1.41
m1-r3	3.45	3.34	2.79	2.25	1.97	1.70	1.46
m2-r1	3.20	3.25	2.79	2.22	1.87	1.58	1.46
m2-r2	3.20	3.10	2.78	2.15	1.84	1.58	1.52
m2-r3	3.25	3.15	2.77	2.22	1.86	1.60	1.46
m3-r1	3.80	2.99	2.74	2.25	1.89	1.62	1.50
m3-r2	3.35	2.81	2.84	2.21	1.87	1.65	1.46
m3-r3	3.31	2.90	2.79	2.23	1.89	1.62	1.49
m4-r1	3.42	3.28	2.87	2.25	1.98	1.66	1.55
m4-r2	3.67	3.32	2.84	2.30	1.99	1.66	1.51
m4-r3	3.90	3.22	2.74	2.23	1.92	1.64	1.56
t_{sr}	3.44	3.16	2.80	2.23	1.91	1.64	1.48
st. devijacija	3.90	3.10	2.37	1.62	1.12	0.93	1.20
α	0.040	0.043	0.049	0.061	0.072	0.084	0.092

U sledećim tabelama se osobine pojedinih apsorbera, koji su, u našem slučaju, bitni u analizi i određivanju vremena reverberacije crkve:

Tabela 4a. Tabelarni prikaz pojedinih apsorbera (Mijić 1993)

Frekven. [Hz]	Mermer		Malter		Drvo		Staklo	
	α	A	α	A	α	A	α	A
125	0.01	0.907	0.013	5.97	0.15	2.1	0.08	1.40
250	0.01	0.907	0.015	6.89	0.20	2.8	0.04	0.70
500	0.01	0.907	0.020	9.19	0.10	1.4	0.03	0.53
1000	0.01	0.907	0.030	13.78	0.10	1.4	0.03	0.53
2000	0.02	1.814	0.040	18.38	0.10	1.4	0.02	0.35
4000	0.02	1.814	0.050	22.97	0.10	1.4	0.02	0.35
8000	0.02	1.814	0.060	27.56	0.10	1.4	0.02	0.35

α – koeficijenta apsorpcije; A – apsorpcija po m²

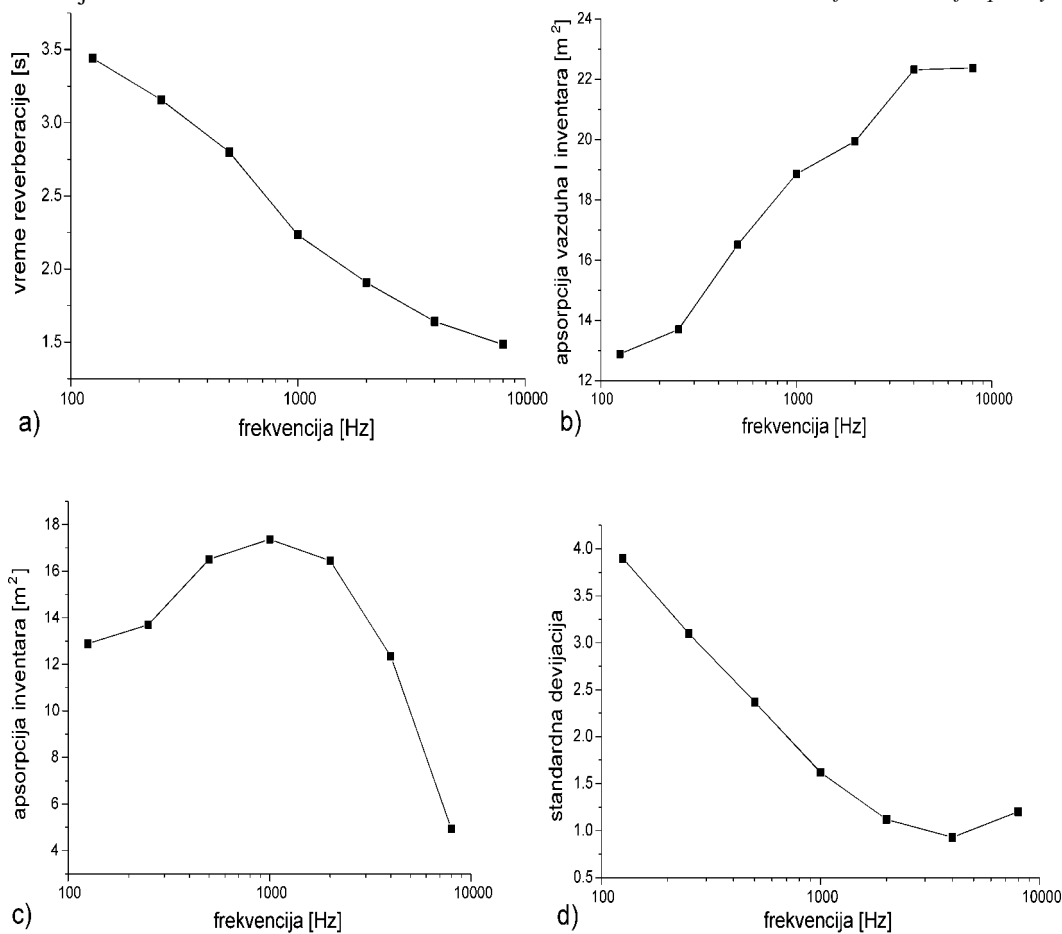
Tabela 4b. Procenjena apsorpcija zvuka po frekvencijama

Frekvencija [Hz]	Vazduh		Iventar	Ukupno
	α	A	A	A
125	–	–	12.88	23.26
250	–	–	13.70	25.00
500	–	–	16.51	28.54
1000	0.003	1.49	17.37	35.48
2000	0.007	3.49	16.45	41.88
4000	0.020	9.97	12.35	48.85
8000	0.035	17.44	4.94	53.50

Slika 4.
Zavisnost ispitivanih akustičkih parametara (a–c) i standardne devijacije (d) od frekvencije zvuka.

Na sledećim graficima (slika 4) prikazana je zavisnost vremena reverberacije (a), apsorpcije vazduha (b), apsorpcije inventara (c) i standardne devijacije (d) od frekvencije. Na svim graficima se x-osa nalazi u logaritamskoj razmeri.

Figure 4.
Relation between measured acoustic parameters (a–c) and standard deviation (d) from sound frequency.



Zaključak

Rezultati dobijeni za vreme reverberacije i ostalih veličina koje su ispitivane u ovom projektu nisu sasvim precizne, a razlozi su postojanje dekorativnih detalja portala i drugog inventara. Upravo zato se došlo na ideju da se proračuna i ta 'parazitska' apsorpcija. Ovo je ostvareno putem upoređivanja ukupne apsorpcije (koja je eksperimentalno utvrđena) i apsorpcije pojedinih površina koje su poznate.

Jedan od standarda za merenje vremena reverberacije, koeficijenta apsorpcije, i apsorpcije je vrednost datih veličina na 500 Hz. Na osnovu grafika ustanovili smo da vrednosti navedenih veličina na 500 Hz teže srednjoj vrednosti. Upoređujući vremena reverberacije Petničke crkve i drugih crkava (koje je ETF Beograd ranije izmerio), primećuje se da je vreme reverberacije Petničke crkve znatno veće od ostalih crkava, koje imaju približno istu zapreminu kao i Petnička crkva. Ova pojava objašnjava se skorim renoviranjem unutrašnjih površina (1994 godine). Samim tim apsorpcija površina je manja pa je vreme reverberacije veće.

Literatura

Gambiroža, V. 1997. Akustičke osobine crkava. Nepublikovani diplomski rad. Elektrotehnički fakultet, Beograd.

Jelaković, T. 1962. *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*. Zagreb: Školska knjiga.

Mijić, M. 1993. *Apsorpcione karakteristike materijala i konstrukcija*. Beograd: Elektrotehnički fakultet.

Dejan Grabovičkić and Ranko Radovanov

Acoustic Parameters of Petnica's Church

The goal of this project was to examine global acoustic parameters of Petnica's church: reverberation time, absorption, absorption coefficient which depend on sound frequency.

The results obtained for the reverberation time and other parameters which were examined in this project are not quite precise, and the reasons are portal details and other church inventory. Therefore an idea of estimating this 'parasite' absorption appeared. It was accomplished by comparing the total absorption that were experimentally determined with absorption of each surface that were already known. One of standards for determining of reverberation time, absorption's coefficient, and absorption is value on

this parameters on 500 Hz. Analyzing graphics we found that value of cite parameters on 500 Hz tends to middle value. By comparing reverberation time Petnica's church and other churches (which was earlier measured by ETF Belgrade) we noticed that the reverberation time of Petnica's church is much bigger then other churches, which have almost equal volume as Petnica's church has. This appearance is explaining by the soon renovating interior's surface of the church (1994 year). Increased value of reverberation time doesn't have influence on the acoustic of church.

Subsequent research will determine the standard which will help the architecture and construction in future.

