

EXAMINATION OF THE ACOUSTIC SUITABILITY OF THE UNOCCUPIED CONCERT HALL

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

Nataša Savić

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

Abstract: In this paper, the acoustic suitability of the unoccupied concert hall Promenadikeskus in Pori (Finland) was examined. In the first part of the paper, the objective acoustic parameters of the concert hall are defined and analyzed, which characterize: sound propagation time (reverberation time, warmth, brilliance, and early reverberation time), sound energy (central time, music clarity index and speech clarity index) and space (early lateral energy, lateral energy fraction and interaural cross-correlation coefficient). Based on the acoustic analysis of impulse responses and the evaluation algorithm, their values were calculated. The results are presented tabularly and graphically. In the second part of the paper, based on the comparison of the obtained results with the values given by Standard ISO 3382, it was determined that the acoustically treated concert hall has excellent acoustic properties and is therefore suitable for its purpose.

Keywords: Room impulse response, acoustic parameters, ARTA, analysis.

ISPITIVANJE AKUSTIČKE PODOBNOSTI PRAZNE KONCERTNE DVORANE

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

Nataša Savić

Akademija tehničko – vaspitačkih strukovnih studija – Odsek Niš, Srbija
natasa.savic@akademijanis.edu.rs

Резиме: U ovom radu izvršeno je ispitivanje akustičke podobnosti prazne koncertne hale Promenadikeskus u Poriju (Finska). U prvom delu rada definisani su analizirani objektivni akustički parametri koncertne dvorane koji karakterišu vreme prostiranja zvuka (vreme reverberacije, toplina, briljantnost i rano vreme reverberacije), zvučnu energiju (centralno vreme, indeks jasnoće muzike i indeks jasnoće govora) i 3) proctor (rana lateralna energija, frakcija lateralne energije i koeficijent interauralne kros-korelacije). Na osnovu akustičke analize impulsnih odziva i algoritma procene izračunate su njihove vrednosti. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. U drugom delu rada je na osnovu komparacije dobijenih rezultata sa vrednostima dati Standardom ISO 3382 utvrđeno da akustički tretirana koncertna dvorana ima odlična akustička svojstva a samim tim je podobna za svoju namenu.

Ključne reči: Impulzni odziv prostorije, akustički parametri, ARTA, analiza.

1. UVOD

Koncertne dvorane su prostorije koje imaju posebne akustičke karakteristike. Muzika koja se u njima sluša predstavlja iskustvo za čula. Za taj doživljaj veliki udeo ima arhitektura dvorana. Dizajn koncertne dvorane egzistira na raskrsnici umetnosti, nauke i inženjerstva. Tu akustičari teže da demistifikuju odličnu zvučnu čujnost (Kelsey A. Hochgraf, 2019). Koncertna dvorana se može uporediti sa velikom rezonantnom kutijom nekog muzičkog instrumenta. Refleksija od njenih zidova inicira fenomen reverberacije. Ovaj fenomen se doživljava subjektivno kao prijatan ili iritirajući (Beranek, 2004). Najprirodniji način proučavanja percepcije muzike u koncertnim salama je

slušanje koncerata na licu mesta i prikupljanje mišljenja publike, muzičara i dirigenta (Lokki et al., 2020). Ovaj metod je bio popularan još od fundamentalnog rada Sabine (1900). Beranek (1962) je autor brojnih članaka i nekoliko knjiga, uključujući opsežne tehničke podatke, o akustici koncertnih dvorana. Suštinski rad u ovoj oblasti su objavili Havkes i Douglas (1971), Barron (1988) i Kahle (1995). Odličan prikaz Maršala i Barona (2001) predstavlja istraživanje utiska o prostoru u koncertnim salama iz 1900-ih. Ovde su binauralni sluh, psihoakustica i širenju zvuka u koncertnim salama posmatrani zajedno. Patynen et al. (2014) bili su jedni od prvih autora, koji su dobro poznate činjenice o dinamički zavisnim spektrima orkestarskih instrumenata i usmerenoj osetljivosti ljudskog sluha povezali sa impulsnim odzivima prostorije.

Iz impulsnog odziva mogu se proceniti parametri koji opisuju akustičke osobine određene prostorije i na taj način se može kvantifikovati doživljaj zvuka u njoj. Snimanje impulsnih odziva prostorije je detaljno regulisano Standardom ISO 3382 (ISO 3382, 1997). U njemu se propisuje da nivo impulse treba da bude bar 45 dB iznad nivoa ambijentalne buke.

Akustički parametri prostorije su alati za kontrolu i komunikaciju akustičkih kvaliteta prostorije (Andor T. Fürjes, 2021). Prošlo je više od jednog veka, počevši od Sabinovog rada i definicije vremena reverberacije i sada postoje mnogo različitih parametara: vremena opadanja zvučnog pritiska, ravnomerne raspodele zvuka, jasnoće, difuznosti (koeficijent usmerenog rasejanja, broj pikova, relativna standardna devijacija (H. In Jo et al., 2019)), eha, rezonanse, razumljivost govora i muzike i td. Najpoznatiji su definisani u Standardima, ali još uvek postoji aktivna debata: na šta primeniti, kako tumačiti, šta ima veći prioritet, koji je pravi oblik specifikacije, itd.

U ovom radu izvršeno je ispitivanje akustičke podobnosti prazne koncertne dvorane Promenadikeskus u Poriju (Finska). Baza impulsnih odziva koncertne dvorane, dostupna na <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/>, čini osnovu izvršene analize sledećih akustičkih parametara: vremena reverberacije (**engl. Reverberation Time**), RT_{30} , topline (**engl. Bass Ratio**), BR , briljantnosti (**engl. Brilliance**), Br , ranog vremena reverberacije (**engl. Early Decay Time**), EDT , centralnog vremena (**engl. Central Time**), T_C , indeksa jasnoće muzike (**engl. Music Clarity Index**), C_{80} , indeksa jasnoće govora (**engl. Speech Clarity Index**), C_{50} , rane lateralne energije (**engl. Early Lateral Energy**), LF , frakcije lateralne energije (**engl. Lateral Energy Fraction**), LFC i koeficijenta interauralne kros-korelacije (**engl. Interaural Cross Correlation Coefficient**), $IACCE$. Pomoću programskih paketa ARTA i Matlab dobijene vrednosti ovih parametara su analizirane u odnosu na standardne vrednosti i dati su određeni zaključci.

Organizacija rada je sledeća: u sekciji 2 definisani su analizirani akustički parametri, u sekciji 3 objašnjen je eksperiment, u sekciju 4 prikazani su rezultati eksperimenta, u sekciji 5 izvršena je analiza rezultata i sekcija 6 je zaključak.

2. OBJEKTIVNI AKUSTIČKI PARAMETRI

Uzimajući u obzir šta primarno identifikuju i kako se izračunavaju objektivni akustički parametri se mogu grupisati prema tri kriterijuma (M. Skålevik, 2012): vreme, energija i prostornost. U tabeli 1 prikazani su parametri koji će se analizirati u ovom radu, njihova pripadnost navedenim kriterijumima i definisanost prema Standardu ISO-3382.

2. EKSPERIMENT

U okviru tehničkog projekta TAKU/VARE, koji je realizovala "Laboratorija za akustiku i audio signale" sa Tehničkog fakulteta u Helsinkiju, akustički je tretirana koncertna dvorana Promenadikeskus u Poriju (Finska) na osnovu snimljenih akustičkih impulsnih odziva čija je baza dostupna na <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/> (J. Merimaa et al., 2005). Prikaz ove sale dat je na slici 1.

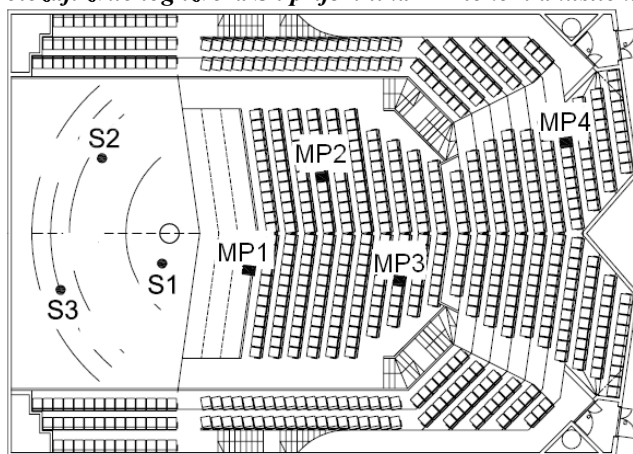
Slika 1. Koncertna dvorana Promenadikeskus u Poriju (Finska)



Tabela 1 Akustički parametri, njihovi kriterijumi i definisanost prema ISO-3382

Parametar	Kriterijum	Definisanost
Vreme reverberacije RT_{30} (s)	vreme	$RT_{mid} = \frac{1}{2}(RT^{500Hz} + RT^{1kHz})$
Toplina (odnos basa) BR		$BR = \frac{RT^{125Hz} + RT^{250Hz}}{RT^{500Hz} + RT^{1kHz}}$
Briljantnost Br		$Br = \frac{RT^{2kHz} + RT^{4kHz}}{RT^{500Hz} + RT^{1kHz}}$
Rano vreme reverberacije EDT (s)		$EDT_{mid} = \frac{1}{2}(EDT^{500Hz} + EDT^{1kHz})$
Centralno vreme T_C (s)	energija	$T_C = T_{C1kHz}$
Indeks jasnoće muzike C_{80} (dB)		$C_{80} = \frac{1}{3}(C_{80}^{500Hz} + C_{80}^{1kHz} + C_{80}^{2kHz})$
Indeks jasnoće govora C_{50} (dB)		$C_{50} = 0.15 \cdot C_{50}^{500Hz} + 0.25 \cdot C_{50}^{1kHz} + 0.35 \cdot C_{50}^{2kHz} + 0.25 \cdot C_{50}^{4kHz}$
Rana lateralna energije LF (%)	prostornost	$LF_4 = \frac{1}{4}(LF^{125Hz} + LF^{250Hz} + LF^{500Hz} + LF^{1kHz})$
Fracija lateralne energije LFC (%)		$LFC_4 = \frac{1}{4}(LFC^{125Hz} + LFC^{250Hz} + LFC^{500Hz} + LFC^{1kHz})$
Koeficijent interauralne kros-korelacije $IACCE$		$IACC_{E3} = \frac{1}{3}(IACC_E^{500Hz} + IACC_E^{1kHz} + IACC_E^{2kHz})$

Slika 2. Položaji zvučnog izvora S i prijemnika MP tokom akustičkih merenja



U ovom radu izvršeno je ispitivanje akustičke podobnosti ove koncertne dvorane tako što je izvršena analiza akustičkih parametara definisani jednačinama u tabeli 1 za tri lokacije zvučnog izvora S i četiri lokacije prijemnika MP (slika 2.).

Izračunate su srednje vrednosti navedenih parametara za svaki položaj zvučnog izvora po mernom mestu i za svaki položaj zvučnog izvora na nivou svih mernih mesta u akustički tretiranoj hali. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Za analizu su korišćeni programski paketi ARTA i Matlab.

3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U tabelama 2 - 7 prikazane su srednje vrednosti akustičkih parametara RT , LF i LFC , BR i Br , EDT , T_{S1kHz} , C_{80} i C_{50} respektivno, izračunate za svaki položaj zvučnog izvora po mernom mestu za svaku frekvenciju iz mernog opsega i za svaki položaj zvučnog izvora za sva merna mesta i za sve frekvencije iz mernog opsega. Srednje vrednosti $IACC_E$ izračunate na $f_c \in \{500, 1000, 2000\}$ Hz imaju vrednost 1 za sve opcije.

Na slikama 3. – 7. prikazana je zavisnost srednjih vrednosti RT_{30} , C_{80} , C_{50} , LF i LFC od frekvencija na kojim je izvršeno merenje ovih veličina.

Tabela 2 Srednje vrednosti RT, BR i Br
($f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz)

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	$RT (s)$	2.391	2.368	2.39	2.418
	$RT_{sr} (s)$	2.392			
	BR	1.082	1.056	1.126	1.081
	BR_{sr}	1.086			
	Br	0.803	0.816	0.806	0.806
S2	$RT (s)$	2.406	2.348	2.412	2.374
	$RT_{sr} (s)$	2.385			
	BR	1.048	1.064	1.085	1.127
	BR_{sr}	1.081			
	Br	0.788	0.81	0.806	0.823
S3	$RT (s)$	2.386	2.372	2.408	2.409
	$RT_{sr} (s)$	2.394			
	BR	1.083	1.092	1.093	1.098
	BR_{sr}	1.092			
	Br	0.817	0.802	0.799	0.808
	Br_{sr}	0.806			

Tabela 3 Srednje vrednosti LF i LFC
($f_c \in \{125, 250, 500, 1000\}$ Hz)

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	LF	0.360	0.382	0.395	0.389
	LF_{sr}	0.382			
	LFC	0.358	0.385	0.392	0.426
	LFC_{sr}	0.390			
S2	LF	0.353	0.368	0.367	0.367
	LF_{sr}	0.364			
	LFC	0.354	0.37	0.365	0.368
	LFC_{sr}	0.364			
S3	LF	0.371	0.375	0.38	0.366
	LF_{sr}	0.373			
	LFC	0.371	0.38	0.381	0.365
	LFC_{sr}	0.374			

Tabela 4 Srednje vrednosti EDT
($f_c \in \{500, 1000\}$ Hz)

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	$EDT (s)$	2.204	2.398	2.46	2.574
	$EDT_{sr} (s)$	2.409			
S2	$EDT (s)$	2.406	2.362	2.378	2.45
	$EDT_{sr} (s)$	2.399			
S3	$EDT (s)$	2.278	2.314	2.256	2.382
	$EDT_{sr} (s)$	2.308			

Tabela 5 Srednje vrednosti T_{S1kHz}

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	$T_{C1kHz} (ms)$	127.578	164.805	163.165	187.014
	$T_{Csr} (ms)$	160.64			
S2	$T_{C1kHz} (ms)$	183.087	169.088	175.601	172.937
	$T_{Csr} (ms)$	175.178			
S3	$T_{C1kHz} (ms)$	164.448	170.723	178.255	146.466
	$T_{Csr} (ms)$	164.973			

Tabela 6 Srednje vrednosti C_{80}
($f_c \in \{500, 1000, 2000\}$ Hz)

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	$C_{80} (dB)$	-0.14	-2.033	-2.74	-2.073
	$C_{80sr} (dB)$	-1.746			
S2	$C_{80} (dB)$	-3.077	-2.907	-2.61	-1.8
	$C_{80sr} (dB)$	-2.6			
S3	$C_{80} (dB)$	-1.867	-2.44	-2.687	-0.91
	$C_{80sr} (dB)$	-1.976			

Tabela 7 Srednje vrednosti C_{50}
($f_c \in \{500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz)

		MP1	MP2	MP3	MP4
S1	$C_{50} (dB)$	-1.772	-3.976	-5.301	-4.717
	$C_{50sr} (dB)$	-3.942			
S2	$C_{50} (dB)$	-5.015	-4.375	-4.505	-3.35
	$C_{50sr} (dB)$	-4.311			
S3	$C_{50} (dB)$	-2.94	-3.02	-3.465	-2.73
	$C_{50sr} (dB)$	-3.039			

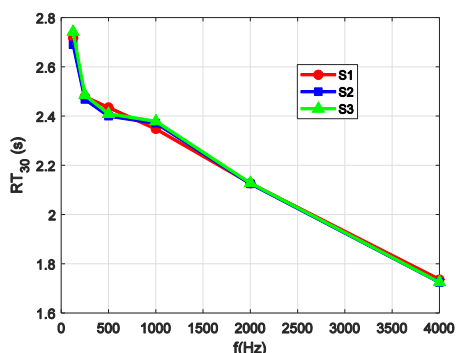
4. ANALIZA REZULTATA

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 2 -7 i na slikama 3. – 6. zaključuje se sledeće:

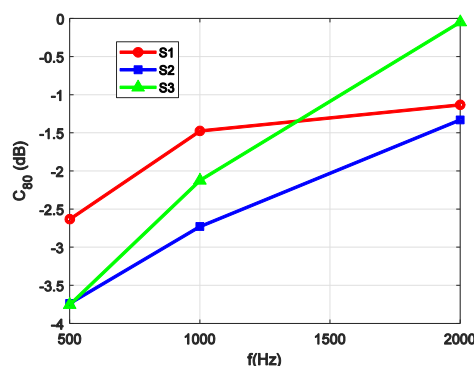
- akustički parametar RT_{30} je analiziran na centralnim frekvencijama definisanim po oktavama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\}$ Hz. Za svaku poziciju zvučnog izvora i sve pozicije MP prijemnika, srednje

vrednosti ovog parametra su približne i iznose: $RT_{sr} = \{2.392 \text{ s}, 2.382 \text{ s}, 2394 \text{ s}\}$. Ove vrednosti su očekivano veće od vrednosti optimalnog vremena reverberacije $RT_{opt} = 2.04 \text{ s}$ (koje se izračunava preko zapremine hale), kao i od vrednosti preporučene Standardom: $RT = 1.5 \div 2.2 \text{ s}$ jer se odnose na praznu halu. Prisustvo ljudi u koncertnoj dvorani inicira niže vrednosti ovog parametra (V. Stojanović, Z. Milivojević, 2018), $RT_{30sr} = 1.695 \text{ s}$, tako da je ona u potpunosti

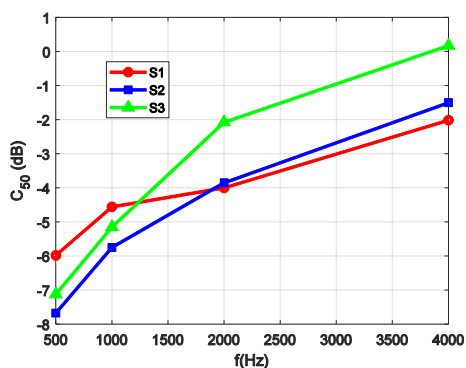
Slika 3. Srednje vrednosti RT_{30} za svaki položaj zvučnog izvora i za sva merna mesta na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000, 2000, 4000\} \text{ Hz}$



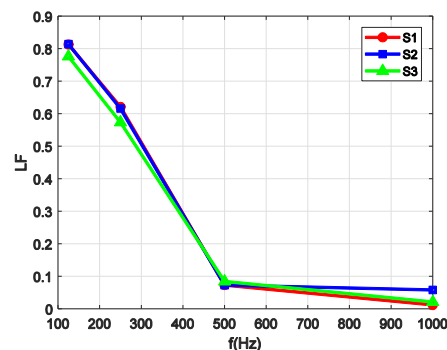
Slika 4. Srednje vrednosti C_{80} za svaki položaj zvučnog izvora i za sva merna mesta na centralnim frekvencijama $f_c \in \{500, 1000, 2000\} \text{ Hz}$



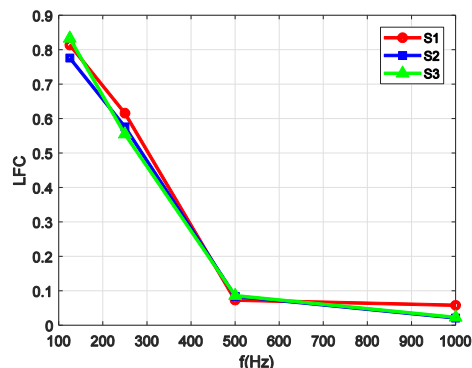
Slika 5. Srednje vrednosti C_{50} za svaki položaj zvučnog izvora i za sva merna mesta na centralnim frekvencijama $f_c \in \{500, 1000, 2000, 4000\} \text{ Hz}$



Slika 6. Srednje vrednosti LF za svaki položaj zvučnog izvora i za sva merna mesta na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000\} \text{ Hz}$



Slika 7. Srednje vrednosti LFC za svaki položaj zvučnog izvora i za sva merna mesta na centralnim frekvencijama $f_c \in \{125, 250, 500, 1000\}$ Hz



akustički podobna za izvođenje rane klasične muzike ($RT = 1.6 \div 1.8$ s), opere ($RT = 1.3 \div 1.8$ s) i kamerne muzike ($RT = 1.4 \div 1.7$ s).

2) srednje vrednosti parametra topline (odnos basa) $BR_{sr} = \{1.086, 1.081, 1.092\}$ su bliske donjoj granici opsega definisanog za muzičke nastupe ($BR_{opt} = 1.1 \div 1.25$) i veće su od 1. Može se zaključiti da subjektivni doživljaj topline zvuka zadovolja, da je ova dvorana akustički "topla" i da se zvuci niskih frkvencija (125 Hz i 250 Hz) jasno čuju.

3) optimalne vrednosti parametra briljantnost su $Br_{opt} = 0.8 \div 0.9$ što znači da srednje vrednosti ovog parametra za halu, $BR_{sr} = \{0.808, 0.807, 0.806\}$ pripadaju ovom opsegu, da je subjektivni osećaj briljantnosti zvuka odličan a samim tim i da se zvuci visokih frkvencija (2000 Hz i 4000 Hz) jasno čuju.

4) za koncertne dvorane opseg optimalnih vrednosti ranog vremena reverberacije je $EDT_{opt} = 1.8 \div 2$ s i ona bi trebalo da bude bliska vrednostima vremena reverberacije RT . Za ispitivanu praznu halu vrednosti za ovaj parametar i jesu bliske vrednostima RT : $EDT_{sr} = \{2.409$ s, 2.399 s, 2.308 s} ali i one će sigurno imati manje vrednosti za punu salu kao i RT (što treba ispitati). U koncertnim salama, poželjno je imati kraći EDT da bi se poboljšala jasnoća, ali duži RT da bi se obezbedila živost muzike.

5) veličina koja odgovara energetske ravnoteži impulsnog odziva, centralno vreme ili vremensko težište ima optimalne vrednosti u opsegu $T_{Copt} = 60 \div 260$ ms i njemu pripadaju srednje vrednosti ovog parametra za ispitivanu halu: $T_{Csr} = \{160.64$ ms, 175.178 ms, 164.973 ms}.

6) srednje vrednosti indeksa jasnoće muzike, za sve ispitane pozicije zvučnog izvora u hali, $C_{80sr} = \{-1.756$ dB, -2.6 dB, -1.976 dB} nalaze se u opsegu optimalnih vrednosti $C_{80opt} = -4 \div 1$ dB.

7) srednje vrednosti indeksa jasnoće govora za sve ispitane pozicije zvučnog izvora u hali, $C_{50sr} = \{-3.942$ dB, -4.311 dB, -3.039 dB} pripadaju optimalnim vrednostima $C_{50opt} > -2$ dB.

8) srednje vrednosti rane lateralne energije $LF_{sr} = \{-1.756, -2.6, -1.976\}$ i frakcije lateralne energije $LFC_{sr} = \{-0.39, -0.364, -0.374\}$ zadovoljavaju kriterijum da trebaju biti veće od 0.25 za koncertne dvorane.

9) formiranje zvučne slike kod slušaoca u ispitanoj hali je odlično što potvrđuju vrednosti za koeficijente interauralne kros-korelacije izračunati za sve pozicije zvučnog izvora i sva MP slušaoca: $IACCE = 1$. Dakle prisutno je idealno podudaranje prijema zvuka levim i desnim uvom kod slušaoca.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršeno ispitivanje akustičke podobnosti prazne koncertne dvorane Promenadikeskus u Poriju (Finska). Na osnovu dobijenih srednjih vrednosti parametara koji karakterišu: 1) vreme (vreme reverberacije $\overline{RT}_{30} = 2.39$ s, toplina $\overline{BR} = 1.086$, briljantnost $\overline{Br} = 0.807$ rano vreme reverberacije $\overline{EDT} = 2.372$ s) može se zaključiti da je ova koncertna dvorana pogodna za izvođenje rane klasične muzike, opere i kamerne muzike, da je akustički "topla" i da je subjektivni osećaj briljantnosti zvuka odličan, 2) energiju (centralno vreme $\overline{T}_C = 166.93$ ms, indeks jasnoće muzike $\overline{C}_{80} = -2.107$ dB, indeks jasnoće govora $\overline{C}_{50} = -3.764$ dB) zaključuje se da je u hali jasnoća muzike i govora u granicama optimalnih vrednosti i 3) prostornost (rana lateralna energija $\overline{LF} = 0.373$, frakcija lateralne energije $\overline{LFC} = 0.376$, koeficijent interauralne kros-korelacije $\overline{IACCE} = 1$) zaključuje se da su sve vrednosti u granicama preporučenih tj. da se kod slušaoca stvara dobra percepcija zvuka, što je odlika dobrih dvorana. Na osnovu izvršene analize može se reći da je akustički tretirana koncertna dvorana akustički podobna za svoju namenu.

REFERENCE

- Beranek, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses*, Springer-Verlag New York.
- Fürjes, A. T. (2021). Room acoustic parameters – Whats – Up? 9th Congress the Alps Adria Acoustics Association 2021 Budapest, Hungary.
- Hochgraf, K. A. (2019). The Art of Concert Hall Acoustics: Current Trends and Questions in Research and Design, Spring 2019, *Acoustic Today*, Vol. 15, Issue 1, pp. 28-36.
- In Jo, H., Kwak, K. H., & Jeon J. Y. (2019). Objective assessment of a scattered sound field in simulated concert halls and cal model, *International Symposium on Room Acoustics*, 2019 Amsterdam, Netherlands, pp. 265-270.
- ISO 3382 (1997). *Acoustics - Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters*.
- Merimaa, J., Peltonen, T., & Lokki, T. (2005). *Concert hall impulse responses*, Pori, Finland: Analysis results, Available at <http://www.acoustics.hut.fi/projects/poririrs/>.
- Lokki, T., & Pätynen, J. (2020). Auditory Spatial Impression in Concert Halls. In *The Technology of Binaural Understanding*, pp. 173-202.
- Peltonen, T., & Lokki, T. B. (2001). Goutarb`es, J. Merimaa, and M. Karjalainen A system for multi-channel and binaural room response measurements. In *AES 110th Convention*, Amsterdam, The Netherlands, Preprint 5289.
- Skålevik, M. (2012). *Concert Hall Parameters - a status report*, BNAM 2012, Odense, Denmark.
- Sabine, W. (1964). *Collected Papers on Acoustics (1922)*, Harvard University Press.Reimpresión Dover.
- Stojanović, V., Milivojević, Z., & Prašćević, M. (2018). The Prediction of Acoustic Parameters of the Occupied Concert Hall, 53th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2018, Sozopol, Bulgaria, pp. 347 – 351.