



Akustička mjerenja i akustička analiza prostora

Oznaka elaborata: 05-102-2025

Naručitelj: HRVATSKI PRIRODOSLOVNI MUZEJ
Demetrova 1
10000 Zagreb

OIB 53150371536

Građevina: HRVATSKI PRIRODOSLOVNI MUZEJ

Prostor: Atrij muzeja

Izradio: MODO d.o.o.
Gajdekova 18, 10000 Zagreb

OIB: 41102864943

dr. sc. Janko Vodopija
Silvio delija, mag. ing. eit.

Datum: Zagreb, 9. srpnja 2025.

Sadržaj

1	Uvjeti izrade elaborata	1
1.1	Zadatak elaborata	1
1.1.1	Podaci o mjerenju.....	1
1.2	Popis primijenjenih propisa i normi	2
1.3	Osnovni pojmovi akustike prostora.....	3
1.3.1	Vrijeme odjeka	3
1.3.2	Efekt popunjenosti	4
1.3.3	Subjektivna akustička kvaliteta	4
2.	Akustička mjerenja – Atrij muzeja	5
3.	Akustička analiza i obrada prostora.....	7
3.1	Prostor atrija - model	7
3.2	Akustička obrada	8
4.	Zaključak	10
	Prilog – Troškovnik	11

1 Uvjeti izrade elaborata

1.1 Zadatak elaborata

Izvršiti akustička mjerenja u prostoru atrija Hrvatskog prirodoslovnog muzeja, te odrediti akustičku kvalitetu i frekvencijsku karakteristiku vremena odjeka sukladno mjerenoj normi HRN EN ISO 3382-1:2010

Sukladno rezultatima mjerenja, napraviti akustičko modeliranje i dati preporuke za akustičku obradu prostora s ciljem da se postigne najbolja moguća akustička kvaliteta.

1.1.1 Podaci o mjerenju

Datum mjerenja: 12.05.2025.

Prostor: Atrij Hrvatskog prirodoslovnog muzeja

Volumen: 3370 m³

Mjerenja su izvršena u građevinski završenom i namještenom prostoru sa svim inventarom u prostoru. Mjerenja su provedena korištenjem omnidirekcijskog zvučnog izvora, te omnidirekcijskog mjernog mikrofona.

Mjerenja su provedena sukladno mjernoj normi HRN EN ISO 3382-1:2010

1.2 Popis primijenjenih propisa i normi

- HRN EN ISO 12354-1:2017 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstava zgrada iz svojstava građevnih dijelova zgrade -- 1. dio: Zračna zvučna izolacija između prostorija (ISO 12354-1:2017; EN ISO 12354-1:2017)
- HRN EN ISO 12354-2:2017 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstava zgrada iz svojstava građevnih dijelova zgrade -- 2. dio: Udarna zvučna izolacija između prostorija (ISO 12354-2:2017; EN ISO 12354-2:2017)
- HRN EN ISO 12354-3:2017 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstava zgrada iz svojstava građevnih dijelova zgrade -- 3. dio: Zračna zvučna izolacija od vanjskog zvuka (ISO 12354-3:2017; EN ISO 12354-3:2017)
- HRN EN ISO 12354-4:2017 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstava zgrada iz svojstava građevnih dijelova zgrade -- 4. dio: Prijenos unutarnjeg zvuka prema van (ISO 12354-4:2017; EN ISO 12354-4:2017)
- HRN EN 12354-5:2010 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstva zgrada iz svojstava elemenata -- 5. dio: Razine zvuka servisne opreme (EN 12354-5:2009)
- HRN EN 12354-6:2005 Akustika u zgradarstvu -- Procjena akustičkih svojstava zgrada iz svojstava elemenata -- 6. dio: Zvučna apsorpcija u zatvorenim prostorima (EN 12354-6:2003)
- HRN EN ISO 266:1998 Akustika -- Preporučene frekvencije (ISO 266:1997; EN ISO 266:1997)
- HRN EN ISO 3382-1:2010 Akustika -- Mjerenje akustičkih parametara prostorija -- 1. dio: Prostori izvođenja (ISO 3382-1:2009; EN ISO 3382-1:2009)
- HRN EN ISO 3382-2:2010 Akustika -- Mjerenje akustičkih parametara prostorija -- 2. dio: Vrijeme odjeka u običnim prostorijama (ISO 3382-2:2008+Cor 1:2009; EN ISO 3382-2:2008+AC:2009)
- HRN EN ISO 3382-3:2012 Akustika -- Mjerenje akustičkih parametara prostorija -- 3. dio: Prostori bez pregrada (ISO 3382-3:2012; EN ISO 3382-3:2012)
- HRN EN ISO 11654:1998 Akustika -- Apsorberi zvuka za upotrebu u zgradama -- Vrednovanje zvučne apsorpcije (ISO 11654:1997; EN ISO 11654:1997)
- HRN EN ISO 18233:2008 -- Primjena novih metoda mjerenja u građevnoj i prostornoj akustici (ISO 18233:2006; EN ISO 18233:2006)
- HRN EN ISO 80000-8:2009 Veličine i jedinice -- 8. dio: Akustika (ISO 80000-8:2007, ispravljena 2007-08-15; EN ISO 80000-8:2007)

1.3 Osnovni pojmovi akustike prostora

1.3.1 Vrijeme odjeka

Osnovni objektivni parametar akustičke karakterizacije nekog zatvorenog prostora jest **vrijeme odjeka**, **RT** (engl. Reverberation Time). Mjera je to određenog dijela zvučnog procesa koji se naziva odjek, a označava vremenski interval potreban da se zvuk utiša do praga čujnosti, odnosno za 10^6 puta, što je ekvivalentno padu zvučnog tlaka od 60 dB. To vrijeme ovisi o nekoliko čimbenika:

- volumenu prostorije – njime je određena apsorpcija zvuka u zraku, kao i doprinosi izravnog i reflektiranog zvuka
- obliku prostorije – njime je određen broj i intenzitet refleksija
- apsorpciji zidova prostorije – njome je određena količina zvuka koji će se reflektirati u odnosu na apsorbirani zvuk

Proučavajući svojstva zvuka u zatvorenom prostoru između ostalog ustanovljeno je sljedeće:

- vrijeme utišavanja zvuka gotovo je jednako svugdje u prostoriji
- vrijeme utišavanja zvuka praktički ne ovisi o položaju izvora zvuka
- efikasnost apsorpcijskih materijala postavljenih u prostoriji ne ovisi o njihovoj lokaciji

Prilikom izražavanja vremena odjeka kao karakteristike određene prostorije ne smije se zaboraviti da je to frekvencijski ovisna veličina, budući da je apsorpcija zvuka u zraku i stjenkama prostorije različita na različitim frekvencijama.

1.3.2 Efekt popunjenosti

Količina apsorpcije u prostoriji i njezin volumen najznačajnije utječu na vrijeme odjeka. U zatvorenom prostoru tapecirani namještaj i ljudi ponajviše svojom odjećom doprinose apsorpciji zvuka, te je bitno znati na koji način popunjenost prostora odnosno površine poda utječe na vrijeme odjeka. Općenito možemo reći da su efekti popunjenosti koje idu u prilog boljim akustičkim uvjetima sljedeći:

- smanjenje vremena odjeka zbog povećane apsorpcije u prostoriji
- smanjenje odjeka kojeg donosi zvučnički sustav; razglasi su posebno usmjereni na područje auditorija, te ako je on popunjen, apsorbira većinu dodatne zvučne energije koja se emitira preko zvučnika; dok u slučaju praznog auditorija razglas donosi samo dodatne, često neželjene refleksije

No, istovremeno sljedeći efekti popunjenosti prostora negativno utječu na akustičku kvalitetu:

- povećanje pozadinskog šuma zbog ljudskog faktora i šumova koje proizvode; hodanje, govor, šapat, otvaranje vrata i slično: što je veća razina pozadinskog šuma smanjuje se odnos signal/šum, a posljedično i razumljivost govora i glazbe
- brže smanjenje razine zvuka, kako direktne, tako i reflektirane komponente, uslijed povećane apsorpcije, što se posebno osjeti na većim udaljenostima, u središnjem i stražnjem dijelu auditorija

1.3.3 Subjektivna akustička kvaliteta

Subjektivna akustička kvaliteta jest ono što će finalno odrediti akustičku kvalitetu nekog prostora, jer prostor je namijenjen korisnicima sa željom da im se što ugodnije i kvalitetnije prenese određena zvučna informacija, kako govor tako i glazba. Koliko god se trudili mjerenjima napraviti preciznu sliku objektivnih parametara i akustički prostor definirati kao dobar ili loš, konačna ocjena bit će ona koju daju slušatelji. Mjerenjem objektivnih akustičkih parametara kao što je vrijeme odjeka te provođenjem ispitivanja subjektivne akustičke kvalitete, te njihovom korelacijom i statističkom obradom napravljeni su modeli kojima je u određenoj mjeri moguće predvidjeti subjektivnu akustičku ocjenu prostorije na osnovu objektivno određenih u modelu ili izmjerenih parametara.

2. Akustička mjerenja – Atrij muzeja

Osnovni arhitektonski i akustički podaci dani su u tablici 2.1

Tablica 2.1 Osnovni podaci o prostoru atrija

Osnovni podaci o prostoru	
Volumen (m ³)	3369
Tlocrtna površina (m ²)	250
Prosječna visina pod-strop (m)	13,5
Ukupna površina svih ploha (m ²)	1883
Preporučeno vrijeme odjeka RT (s) na 1000 Hz	1,40
Postojeće vrijeme odjeka RT (s) na 1000 Hz	4,52

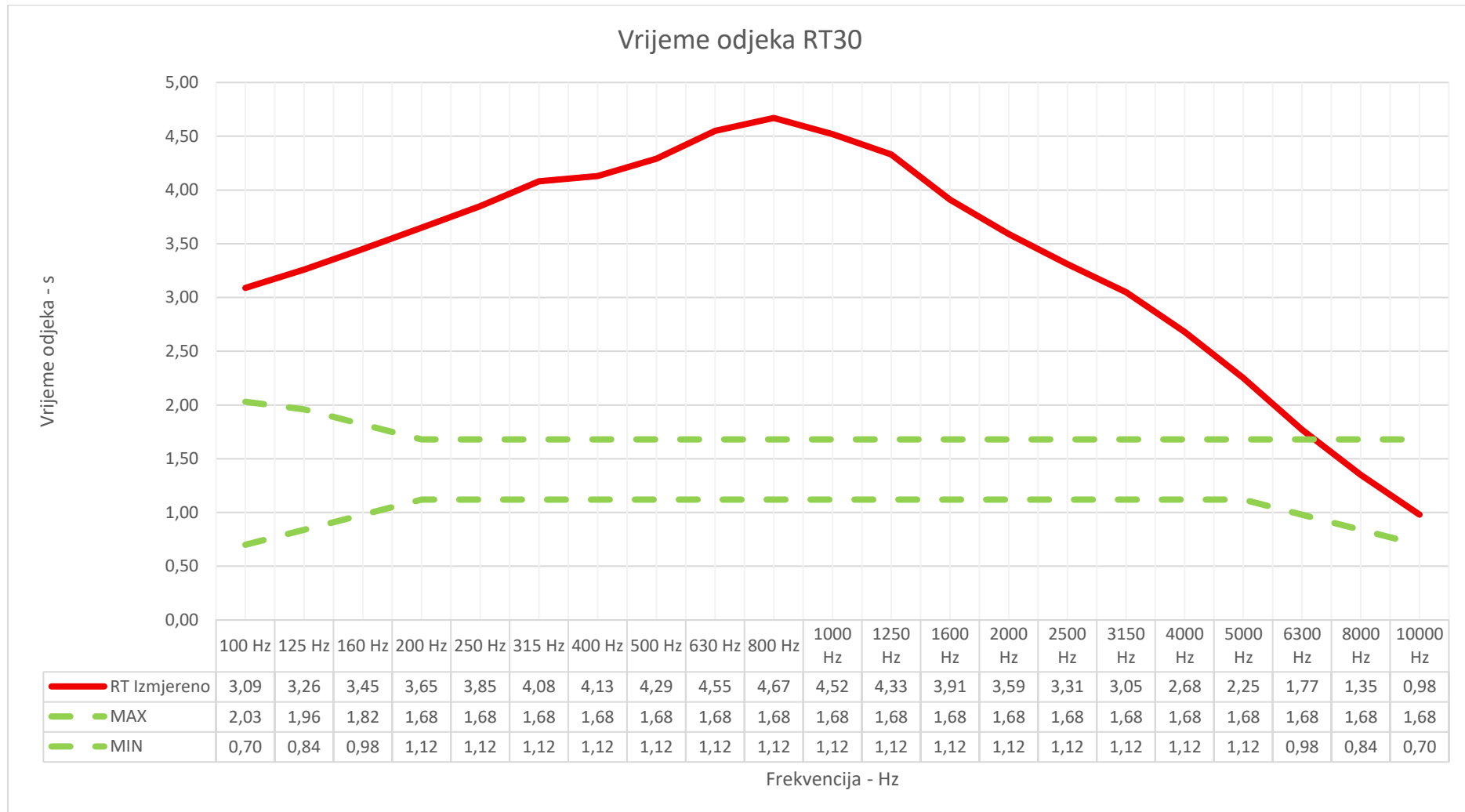
Vrijeme odjeka **RT30** u dvorani na centralnoj frekvenciji 1000 Hz iznosi **4,52 s**. Vrijeme odjeka na centralnoj frekvenciji značajno je veće od preporučenog, te je općenito postojeća akustička kvaliteta loša, što se očituje u vrlo lošoj razumljivosti govora i glazbe.

U tablici 2.2 prikazane su izmjerene vrijednosti vremena odjeka po tercama u frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 10000 Hz, dok je na slici 2.1 prikazano izmjereno vrijeme odjeka (crveno), te maksimalno i minimalno preporučeno vrijeme odjeka (zeleno crtkano).

Tablica 2.2 Vrijednosti vremena odjeka po tercama - dvorana

f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
RT30 / s	3,09	3,26	3,45	3,65	3,85	4,08	4,13	4,29	4,55	4,67	4,52
f / Hz	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	
RT30 / s	4,33	3,91	3,59	3,31	3,05	2,68	2,25	1,77	1,35	0,98	

Uočavamo da je vrijeme odjeka u gotovo cijelom frekvencijskom opsegu značajno veće od preporučenog. Na niskim i srednjim frekvencijama postojeće vrijeme odjeka je više nego duplo veće od preporučenog. Tek na frekvencijama iznad 6000 Hz vrijeme odjeka ima dobre vrijednosti, no ove frekvencije nemaju utjecaja na razumljivost govora, te se može zaključiti da je akustička kvaliteta u dvorani vrlo loša. Neophodno je postavljanjem akustičkih panela popraviti postojeću situaciju.



Slika 2.1 Frekvencijska karakteristika izmjerenog vremena odjeka RT30 u atriju

3. Akustička analiza i obrada prostora

S obzirom na rezultate akustičkih mjerenja, te potrebu za akustičkom obradom u gotovo cijelom spektru, napravljeno je akustičko modeliranje, te su projektirani materijali koje je potrebno primijeniti i postaviti u prostor s ciljem da se dobije optimalna akustička kvaliteta.

3.1 Prostor atrija - model

Napravljen je akustički model atrija, te je modelirano vrijeme odjeka koje odgovara izmjerenom. U tablici 3.1 dana je raspodjela materijala u prostoru. Promatrajući arhitektonsku cjelinu prostora predlažemo da se kao površine na kojima treba postaviti akustičke panele koriste rubovi mostova, te samostojeći apsorberski paneli koji bi bili postavljeni uz parapet.

Tablica 3.1 Raspodjela materijala u prostoru

Materijal	Površina - m ²	Površina - %
Žbuka na cigli ili betonu	798,8	42,43%
Staklene površine	372,5	19,78%
Glatke kamene ravne površine	202,2	10,74%
Metalne površine	181,0	9,61%
Čelične konstrukcije	166,2	8,83%
Tkanina 500g	60,9	3,23%
Drvene konstrukcije i površine	59,1	3,14%
Površine otvorenih volti	31,1	1,65%
Glatki kamen ili mramor	11,0	0,58%
UKUPNO	1882,7	100,00%

3.2 Akustička obrada

Nakon analize prikladnih materijala i akustičkih obloga, dobivena je varijanta uređenja dvorane. Ovom varijantom obrade postiže se značajno smanjenje vremena odjeka, uz korištenje najmanje količine akustičnih panela. Također ova varijanta ne zahtjeva doradu prostora, već su svi akustički elementi montažni. U tablici 3.2 prikazani su podaci o prostoru kada su postavljeni paneli akustičke obrade, ukupno 109 m².

Tablica 3.2 Podaci o prostoru i akustičkoj obradi

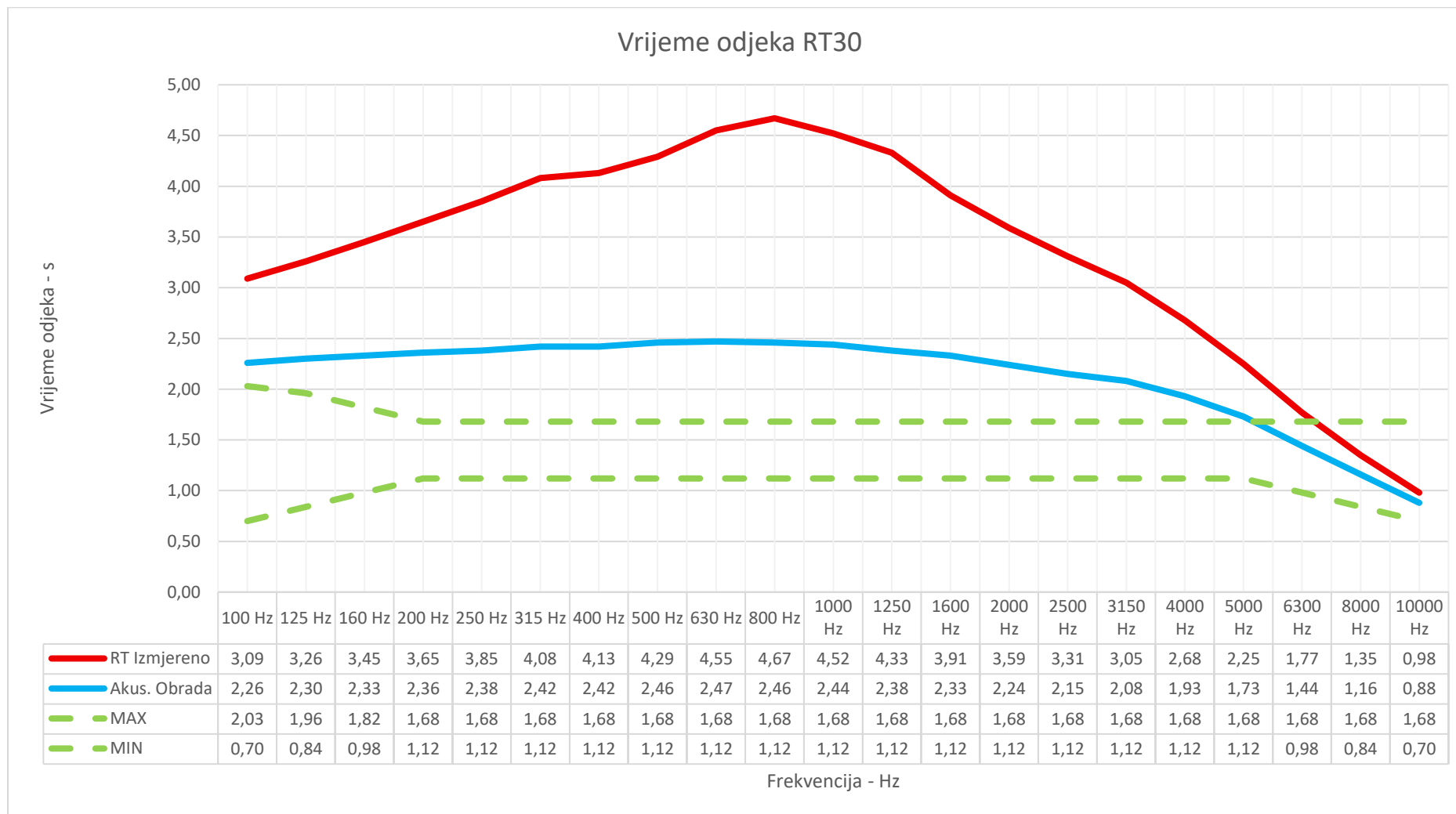
Osnovni podaci o prostoru	
Volumen (m ³)	3369
Tlocrtna površina (m ²)	250
Visina pod-strop (m)	13,5
Ukupna površina svih ploha (m ²)	1883
Projektirana akustička obrada (m ²)	108,80
Preporučeno vrijeme odjeka RT (s) na 1000 Hz	1,40
Dobiveno RT (s) na 1000Hz	2,44

Vrijeme odjeka na centralnoj frekvenciji smanjeno je na 2,44 sekundi, što je i dalje veće od idealnih 1,4 s, ali je značajno poboljšanje s obzirom da je trenutno vrijeme odjeka 4,52 sekundi. Jednoliko poboljšanje vrijeme odjeka postignuto je u cijelom frekvencijskom opsegu, te se krivulja frekvencijske karakteristike nalazi bitno bliže preporučenim vrijednostima. Velik dobitak ove varijante obrade jest što je korištena samo dvije vrste akustičkih panela, apsorbera i rezonatora. U tablici 3.3 dana je količina i vrijednosti koeficijenta apsorpcije koje imaju akustički paneli.

Tablica 3.3 Količina i karakteristike koeficijenta apsorpcije

Količina/ Frekvencija	m ²	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Apsorber_freefield	54,8	0,72	0,71	0,74	0,83	0,90	0,94
Rezonator_6mm_30%	54,0	0,43	0,84	0,94	0,92	0,79	0,54

Na slici 3.1 prikazana je frekvencijska karakteristika novog vremena odjeka u usporedbi s postojećim,. Plavo je označeno novo projektirano vrijeme odjeka, a crveno je postojeće izmjereno u dvorani.



Slika 3.1 Frekvencijska karakteristika novog modeliranog optimalnog i postojećeg izmjerеног vremena odjeka RT30

4. Zaključak

Provedena su akustička mjerenja i analiza, te se odredila postojeća akustička kvaliteta prostora atrija HPM. Postojeća akustička kvaliteta je vrlo loša, te je stoga razumljivost govora loša. Postojeće vrijeme odjeka na centralnoj frekvenciji od 1000 Hz iznosi 4,52 sekundi, što je značajno više od preporučenog vremena odjeka koje iznosi 1,4 sekundu.

S obzirom na kompleksnost zahtjeva za akustičkom obradom, gdje radi zaštićene kulturne građevine nije moguće stavljati trajnu akustičku obradu na bočne zidove i strop, razmatrane su najefikasnije mogućnosti montažne akustičke obrade koja bi se relativno jednostavno mogla montirati, te prema potrebi demontirati.

U varijanti preporučene akustičke obrade koristi se dvije vrste akustičkih elemenata. Na podu uz zid atrija koriste se samostojeći apsorberi koji su postavljeni na 10 cm od zida, te imaju djelomično obostrano djelovanje u ukupnoj korisnoj akustičkoj površini od 54,8 m². Drugi primjenjeni akustički element su rezonatori koji se vješaju na rubove mostova, te čine ukupnu akustičku površinu od 54 m². Primijenjenom akustičkom obradom značajno se smanjuje postojeće vrijeme odjeka, te ono sada iznosi 2,44 s na centralnoj frekvenciji od 1000 Hz. Ova vrijednost je i dalje iznad preporučenih vrijednosti, no s obzirom na kompleksnost prostora koji je zaštićeno kulturno dobro, postignuta je vrlo dobra vrijednost vremena odjeka, te će dobitak ove primjene rezultirati značajnim poboljšanjem razumljivosti govora i glazbe u prostoru atrija.

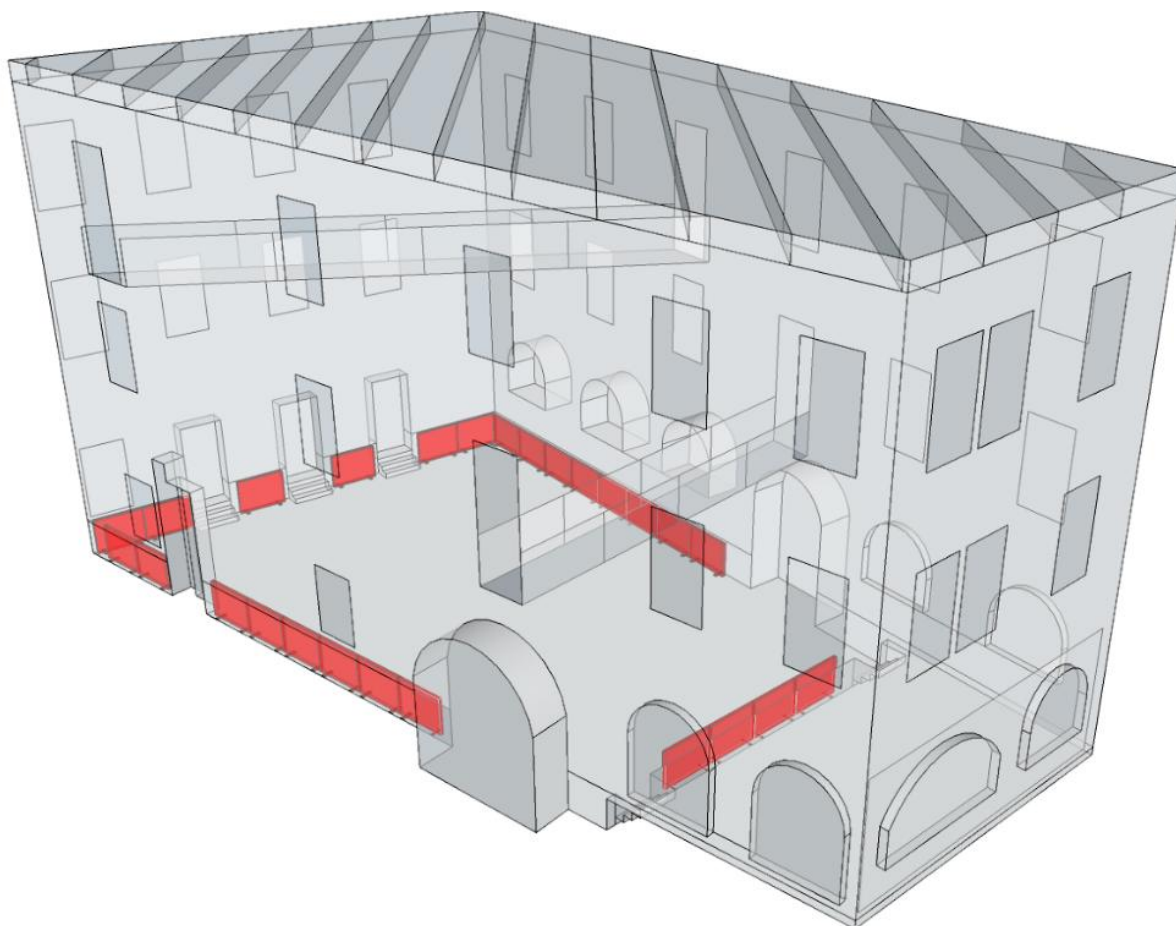
Prilog – Troškovnik

Akustička obrada

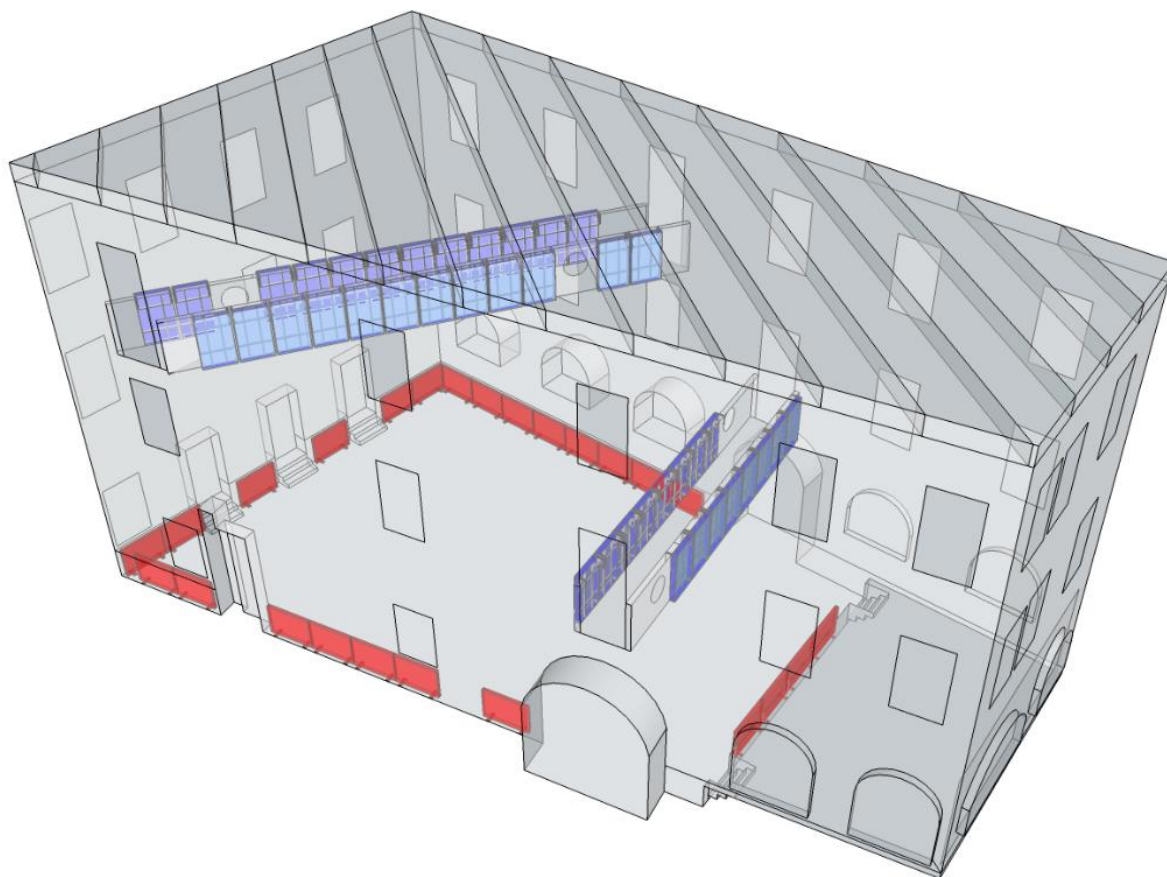
Akustičke karakteristike elemenata, koeficijent apsorpcije zvuka po oktavama

<i>Količina/ Frekvencija</i>	<i>m²</i>	<i>125 Hz</i>	<i>250 Hz</i>	<i>500 Hz</i>	<i>1000 Hz</i>	<i>2000 Hz</i>	<i>4000 Hz</i>
<i>Apsorber_freefield</i>	54,8	0,72	0,71	0,74	0,83	0,90	0,94
<i>Rezonator_6mm_30%</i>	54,0	0,43	0,84	0,94	0,92	0,79	0,54

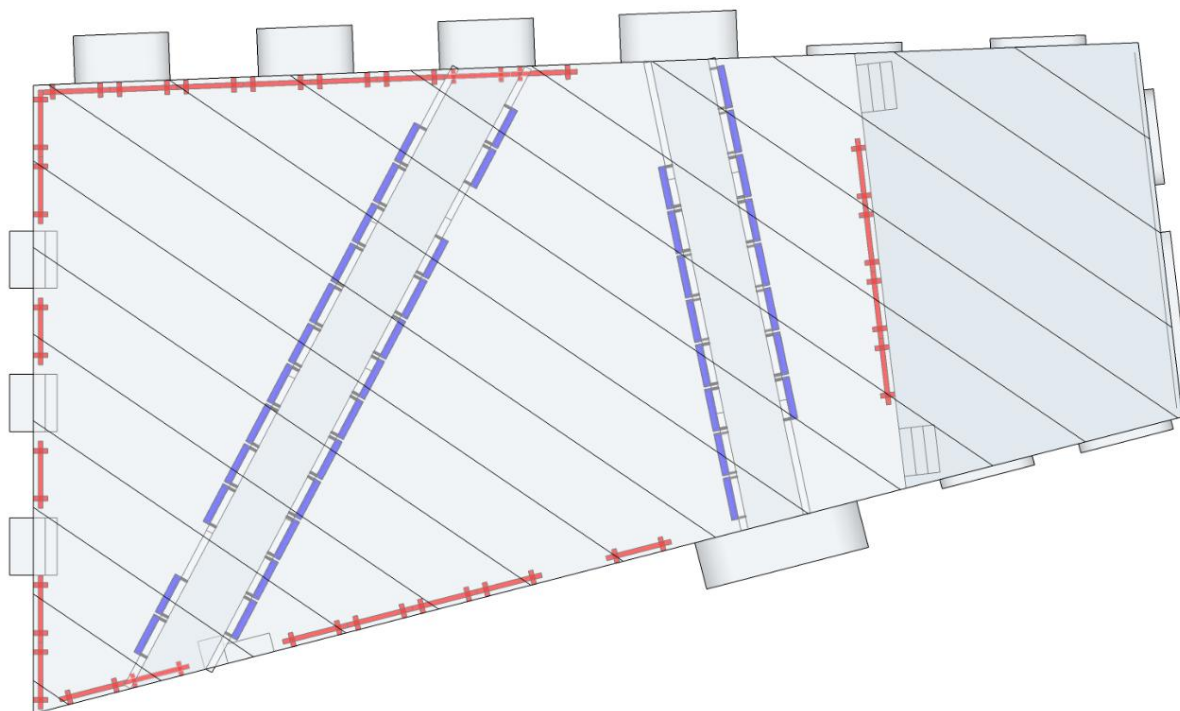
Skica postavljanja apsorbera (označeni crvenom bojom)



Skica pozicija rezonatora (označeni plavom bojom) na mostovima



Tlocrtni prikaz akustičkih elemenata – samostojeći parapet apsorberi označeni crveno i viseći rezonatori na rubovima mostova označeni plavo



Izvedbeni troškovnik akustičkih elemenata:

Troškovnik akustičkih elemenata HPM		
Rbrb	Stavka	Količina
1	Samostojeći apsorber 140x100x10 cm Ispuna 10 cm tvrde kamene vune gustoće preko 40 kg/m ³ , prekrivena retexom, te završnom poroznom tkaninom; samostojeći apsorber mora biti postavljen na minimalno 10 cm od zida	26
2	Rezonator 150x90x15 cm MDF debljine 6 mm, perforacije 30%, na podlozi od 10 cm tvrde kamene vune gustoće preko 40 kg/m ³ , sa zračnim rasporom 4 cm, završno lakiran u boju mosta, sa čeličnim kukama za vješanje na rub mostova	40