

Određivanje koeficijenta apsorpcije zvuka višeslojnog zida

Lončar, Franko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:391008>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

DIPLOMSKI STUDIJ
DRVNE TEHNOLOGIJE

FRANKO LONČAR

ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE ZVUKA
VIŠESLOJNOG ZIDA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA APSORPCIJE ZVUKA
VIŠESLOJNOG ZIDA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij:	Drvnotehnološki procesi
Predmet:	Energetika drvne industrije
Mentor	izv. prof. dr. sc. Branimir Šafran
Student:	Franko Lončar
JMBAG:	0068234852
Datum odobrenja teme:	19. 04. 2024.
Datum predaje rada:	20.9.2024.
Datum obrane rada:	25.9.2024.


Zagreb, rujan, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov:	Određivanje koeficijenta apsorpcije zvuka višeslojnog zida
Autor:	Franko Lončar
Adresa autora:	Srijemska ulica 20, Zagreb
Mjesto izradbe:	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave:	Diplomski rad
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Branimir Šafran
Izradu rada pomogao:	izv. prof. dr. sc. Kristijan Radmanović
Godina objave:	2024.
Opseg:	27 str., 13 slika, 7 tablica i 13 navoda literature
Ključne riječi:	Koeficijent apsorpcije zvuka, akustična svojstva, impedancijska cijev, kompozitni materijali
Sažetak:	<p>Svijest o prednostima zelene gradnje, drvu i materijalima na bazi drva daje prednost primjene u mnogim industrijskim granama, zbog čega se nameće potreba za bržim i preciznijim određivanjem njihovih akustičnih svojstava. U ovom diplomskom radu pomoću impedancijske cijevi odredit će se koeficijent apsorpcije zvuka višeslojnog zida u frekventnom rasponu od 50 do 1600 Hz. Zid se sastoji od osam slojeva: dva sloja sendvič ploče, dva sloja OSB ploče, dva sloja staklene vune i dva sloja furnirske ploče. Odredit će se koeficijent apsorpcije zvuka za svaki sloj zasebno.</p>

BASIC DOCUMENTATION CARD

Title:	Determining the sound absorption coefficient of a multi-layer wall
Author:	Franko Lončar
Adress of Author:	Srijemska ulica 20, Zagreb
Thesis performed at:	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type:	Graduate thesis
Supervisor:	izv. prof. dr. sc. Branimir Šafran
Preparation Assistant:	izv. prof. dr. sc. Kristijan Radmanović
Publication year:	2024.
Volume:	27 pages, 7 tables, 13 figures and 13 references
Key words:	sound absorption coefficient, acoustic properties, impendence tube, composite materials
Abstract:	<p>Awareness of the advantages of green construction, wood and wood-based materials gives preference to application in many industrial branches, which is why there is a need for faster and more precise determination of their acoustic properties. In this thesis, the sound absorption coefficient of a multi-layer wall in the frequency range from 50 to 1600 Hz will be determined using impedance tubes. The wall consists of eight layers: two layers of sandwich panels, two layers of OSB panels, two layers of glass wool and two layers of plywood panels. The sound absorption coefficient will be determined for each separate layer.</p>

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB ŠF 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 2.2.2021.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u njegovoj izradi nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.“

Zagreb, 25.9.2024. godine

vlastoručni potpis

Franko Lončar

SADRŽAJ

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA	I
BASIC DOCUMENTATION CARD	II
SADRŽAJ	IV
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA	VI
PREDGOVOR ILI ZAHVALA	VII
1. UVOD	1
1.1 Fizika zvuka	1
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	11
3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA	12
3.1 MATERIJALI	12
3.2 METODE	13
3.3 Impedancijska cijev (eng. <i>Impedence tube</i>)	15
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM	16
5. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA	26

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Različite vrste zvučnih valova s obzirom na smjer titranja čestica u mediju (https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/val-zvucni, 28.6.2024.)</i>	2
<i>Slika 2. Vrste izvora zvuka (Šaš, 2007)</i>	2
<i>Slika 3. Područje sluha čovjeka i nekih životinja (http://gbssalotea.blogspot.com/2018/03/can-you-hear-that-summary.html, 27.06.2024.)</i>	5
<i>Slika 4. Shematski prikaz interakcije zvuka s materijalom (Amares i sur. 2017)</i>	9
<i>Slika 5. Uzorci ispitivanja: a) Furnirska ploča; b) OSB ploča; c) Sendvič ploča; d) Staklena vuna</i>	13
<i>Slika 6. Prikaz aparature impedancijske cijevi i njenih segmenata (Çelikel i Babaarslan, 2017)</i>	15
<i>Slika 7. Vrijednosti apsorpcijskih koeficijenata uzoraka višeslojnog zida pri rasponu od 50 do 1600 Hz.</i>	16
<i>Slika 8. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri nižim rasponima frekvencija od 50 do 600 Hz.</i>	19
<i>Slika 9. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri srednjim rasponima frekvencija od 600 do 1000 Hz.</i>	20
<i>Slika 10. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri većim rasponima frekvencija od 1000 do 1600 Hz.</i>	21
<i>Slika 11. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri nižim rasponima frekvencija od 50 do 600 Hz.</i>	22
<i>Slika 12. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri srednjim rasponima frekvencija od 600 do 1000 Hz.</i>	23
<i>Slika 13. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri većim rasponima frekvencija od 1000 do 1600 Hz.</i>	24

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Brzina zvuka nekih plinova (Aleksić, 2007).....</i>	<i>3</i>
<i>Tablica 2. Brzina zvuka nekih tekućina (Aleksić, 2007).....</i>	<i>4</i>
<i>Tablica 3. Brzina zvuka nekih krutina (Aleksić, 2007).....</i>	<i>4</i>
<i>Tablica 4. Vrijednosti zvučne snage kod nekih izvora zvuka (Aleksić, 2007).....</i>	<i>6</i>
<i>Tablica 5. Prikaz zvučne skale SPL za nekoliko primjera zvučnih izvora (https://helpwiki.evergreen.edu/wiki/index.php/How_Sound_Works, 12.8.2024.).....</i>	<i>8</i>
<i>Tablica 6. Debljine, masa i gustoća uzoraka (slojeva) višeslojnog zida.</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 7. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka pri rasponu frekvencija od 50 do 1600 Hz</i>	<i>18</i>

PREDGOVOR ILI ZAHVALA

Ja, Franko Lončar, htio bih se zahvaliti svome mentoru izv. prof. dr. sc. Branimiru Šafranu i komentoru izv. prof. dr. sc. Kristijanu Radmanoviću što su mi predložili temu te svojim trudom i radom me usmjeravali na uspješnost pisanja diplomskog rada. Zahvalio bih se svojim roditeljima, mami Lidiji, tati Željku i svome bratu Karlu, koji su me podržavali u školskom i akademskom obrazovanju. Također bih se zahvalio svojim kolegama i kolegicama što su mi uljepšali moje studentsko iskustvo. Hvala vam svima iz srca.

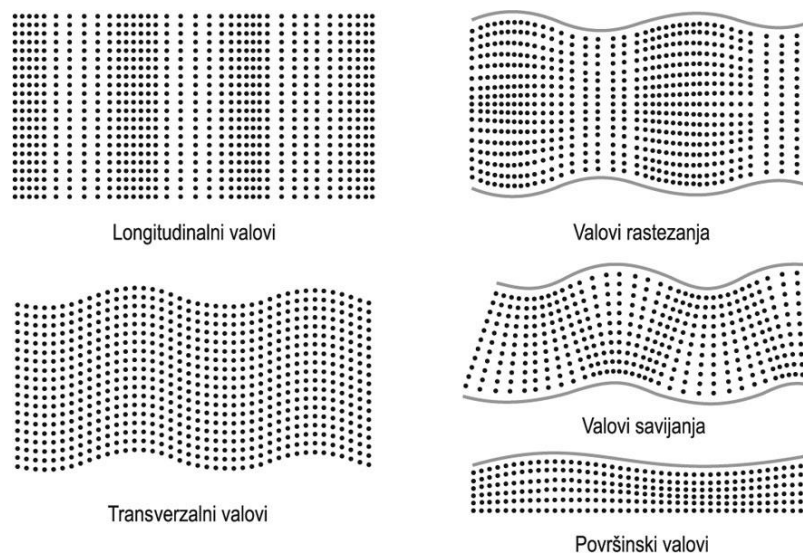
1. UVOD

Problemi sa postepenom nestašicom sirovina, prisile su svijet da na ekološki prihvatljiv i održivi način iskoriste preostale dostupne sirovine. Puno svjetskih zajednica, poput Europske Unije, su zakonski postavile razne regulacije i direktive vezane za iskorištavanje sirovine u industrijskom sektoru. Zakonski se potiče smanjenje emisije stakleničkih plinova, korištenje alternativnih bioloških obnovljivih izvora, gradnja s prirodnim građevinskim materijalima, odnosno zelenom gradnjom. Zadnjih nekoliko desetljeća, zakonski su se zabranili korištenje nekih vrsta sirovina u potpunosti ili djelomično su dopuštene u manjim količina. S tim zabranama, dolazi do traženja novih alternativnih materijala koja imaju slična, a u mogućnosti i bolja svojstva. Danas, zbog svih tih regulacija i direktiva, stroži su kriteriji kod ispitivanje kvalitete i svojstva materijala. Materijali, ovisno o primjeni, moraju ispunjavati kriterije za sigurnosno korištenje. Građevinski materijali najčešće imaju najstrože kriterije koje se moraju ispuniti. Njihova mehanička svojstva moraju biti u skladu s normama kako bi se mogli na sigurnosni način ugraditi. Mehanička svojstva materijala su bitna radi sigurnosti i stabilnosti građevine dok toplinska i akustična svojstva su bitna radi psihofizičke udobnosti čovjeka. Čovjek je jako osjetljiv na nelagodu, stoga je bitno da su toplinska i akustična svojstva materijala kvalitetno projektirane kako ne bi došlo do toga.

U ovom diplomskom radu će se istraživati akustična svojstva, odnosno odrediti koeficijente apsorpcije zvuka višeslojnog zida iz pokusne kuće *bungalov*. U prvom dijelu rada će se opisati kako zvuk utječe na materijale, odnosno fizika zvuka. Potom će se opisati tijek ispitivanja i koja aparatura se koristila tijekom ispitivanja. Na kraju će se diskutirati rezultati i donijeti zaključak.

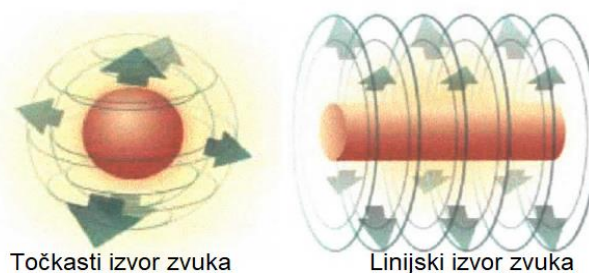
1.1 Fizika zvuka

Kako bi se bolje razumjelo postupak i cilj istraživanja diplomskog rada, moraju se objasniti neki osnovni pojmovi vezani za fiziku zvuka. Zvuk po svojoj definiciji je svaki podražaj koje ljudsko uho može registrirati u zraku (plinu). Da bi zvuk nastao, mora postojati neki izvor zvuka te medij u kojem se širi. Zvuk se može širiti u sva tri agregatna stanja (plin, tekućina i krutina). Zvuk nastaje kada neka vanjska sila poput udarca u metal, izbaci čestice iz ravnotežnog položaja, odnosno te čestice zatitraju te počinju se širiti. Te čestice, koje sadrže mehaničku energiju, šire se u obliku valova zbog svojih elastičnih veza među molekulama. Valovi zvuka se šire isključivo longitudinalno u plinovima i tekućinama, a u krutinama, osim longitudinalnog širenja, mogu se i transverzalno širiti. Longitudinalno širenja vala znači da čestice vala se šire u istom pravcu kojim se gibaju, a transverzalno širenje vala znači da čestica vala se mogu širiti okomito na pravac kojim se gibaju. Uz ove vrste valova, postoji i ostali poput valovi širenja i rastezanja koji se mogu naći u štapovima i pločama te površinski (Rayleighovi) valovi (slika 1) (Petošić i sur. 2018).



Slika 1. Različite vrste zvučnih valova s obzirom na smjer titranja čestica u mediju (<https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/val-zvucni>, 28.6.2024.)

Po definiciji, svaki nepoželjni zvuk naziva se buka. Svaki čovjek ima svoj doživljaj na buku te ovisi o puno faktora poput duljini trajanje buke, udaljenosti od izvora, amplitudi i frekvencijskom sastavu. Titranjem čestica, zvuk se prenosi iz izvora u okolinu. Što je zvuk dalje od izvora, razina zvučnog tlaka se smanjuje. Apsorpcija zvuka u zraku bitno utječe na zvučni tlak kao što i udaljenost od izvora, vrsti izvora, itd. Izvori buke mogu biti unutarnji ili vanjski. Unutarnji izvori se odnose na prostore u kojima ljudi rade i borave poput rad sa strojevima ili razgovor ljudi u okolini. Vanjski izvori se odnose na izvore zvuka koji nisu vezani s aktivnošću čovjeka. Izvori zvuka se najčešće predstavljaju u točkastom ili linijskom obliku. Zvuk se širi jednoliko (kuglasto) iz točkastog izvora, a kod linijskog izvora širi se cilindrično (slika 2). Primjer točkastog izvora je u svakodnevnom životu je industrijsko postrojenje, odnosno njegovi segmenti. Primjer linijskog izvora je prometnica u tunelu promatrana s određene udaljenosti (Petošić i sur.2018).



Slika 2. Vrste izvora zvuka (Šaš, 2007)

Zvuk, odnosno zvučno polje, može se opisati pomoću nekoliko parametara: Dinamičkog tlaka kao funkcija vremena $p(t)$ [Pa], pomaka čestice medija iz ravnotežnoga položaja ξ , brzine titranja materijalnih čestica medija u , akceleracije a , statičke ρ_s i dinamičke gustoće ρ_d , intenziteta I , snage P i energije E . Sve navedene veličine su vremenske promjenjive te ovise o pobudnoj sili koja izbacuje česticu iz ravnotežnog položaja. Ako je pobudna sila izvora harmonične veličine, proračun tih

parametara se pojednostavljuje gdje se zvučno polje smatra kao harmonički oscilator (Petošić i sur. 2018).

Brzina širenja zvuka je manja nego brzina širenja svjetlosti. Brzina širenja zvuka ovisi o mediju kojim se prenosi, bilo to u plinu, tekućini ili krutini. Brzina zvuka u zraku ovisi o nekoliko faktora: Gustoći zraka, atmosferskog tlaku i konstanti γ . Konstantna γ pokazuje odnos specifične topline pri određenoj gustoći i određenom tlaku te ona u zraku iznosi 1,4. Budući da širenja zvuka je adijabatski proces, topline koja nastaje pod tlakom ne može se zbog brzine procesa odvesti (Aleksić, 2007). Brzina širenje zvuka se računa prema sljedećoj jednadžbi (1):

$$c = \sqrt{\frac{p_0 \times \gamma}{\rho_0}} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Gdje su:

c – brzina širenja zvuka [m/s];

p_0 – atmosferski tlak [Pa];

ρ_0 – gustoća zraka [kg/m³].

Atmosferski tlak s porastom nadmorske visine pada, ali uz to pada i gustoća zraka pa zato ne utječe puno na brzinu širenja zvuka. Međutim, temperatura zraka (medija) utječe na brzinu širenja zvuka što se približno računa prema sljedećoj jednadžbi (2):

$$c = 331,4 + 0,6 \times t \text{ [m/s]} \quad (2)$$

gdje je:

t – temperatura [°C]

Brzina zvuka u zraku pri 20 °C iznosi 343 m/s, a pri - 20 °C padne na 319 m/s. Brzine zvuka u ostalim plinovima su različiti nego kod zraka te su prikazani u tablici 1 (Aleksić, 2007).

Tablica 1. Brzina zvuka nekih plinova (Aleksić, 2007)

Plin	Brzina zvuka [m/s]
Vodik	1270
Helij	971
Dušik	338
Zrak	317

Kod tekućina, brzina zvuka ovisi o njoj sposobnosti kompresije K i gustoći ρ_0 te se izračunava sljedećom jednadžbom (3) te podaci brzine zvuka nekih tekućina prikazani su u tablici 2.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho_0 \times K}} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

Tablica 2. Brzina zvuka nekih tekućina (Aleksić, 2007)

Tekućina	Brzina zvuka [m/s]
Glicerin, 20°C	1920
Morska voda, 3,6 % soli, 15°C	1505
Voda, 21,5°C	1484
Voda, 10°C	1440
Petrolej, 15°C	1330

Kod krutina, brzina zvuka ovisi o modulu elastičnosti E i gustoći čvrstoga tijela te računa se prema sljedećoj jednadžbi (4):

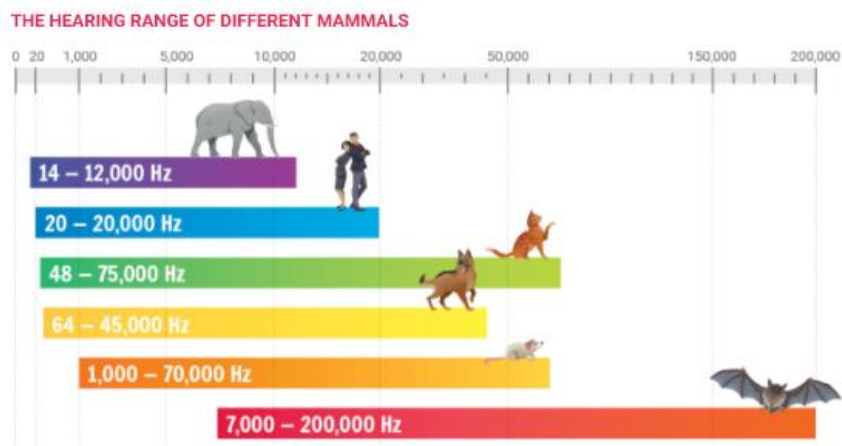
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \text{ [m/s]} \quad (4)$$

Podaci za brzinu zvuka za neke krutine se nalazi u tablici 3.

Tablica 3. Brzina zvuka nekih krutina (Aleksić, 2007)

Krutina	Brzina zvuka [m/s]
Aluminij	5105
Staklo	3490
Jelovina	3320
Srebro	2700
Olovo	1300
Pluto	500
Guma	40 - 150

Zvuk kao i ostali valovi se određuje s dvije fizikalne veličine, a to su frekvencija f i valna duljina λ . Frekvencija se može definirati kao broj titraja koje naprave čestice materijala u vremenskom periodu od jedne sekunde, a mjerna jedinica je herc [Hz]. Ljudsko uho može čuti raspon frekvencije od 16 do 20 000 Hz. Sve ispod 16 Hz naziva se infrazvukom, a sve iznad 20 000 Hz naziva se ultrazvukom. Svaki izvor zvuka ima različito frekventno područje kao što su buka u prometu, sviranje violine i rad nekih uređaja. Sisavci, a i ostale životinje imaju različite frekventna područja koja mogu čuti (slika 3) (Petošić i sur., 2018).



Slika 3. Područje sluha čovjeka i nekih životinja (<http://gbssalotea.blogspot.com/2018/03/can-you-hear-that-summary.html>, 27.06.2024.).

Razmak između dviju susjednih točaka gdje je zvučni val najgušći i najrjeđi u sredstvu kojim se val širi naziva se valna duljina λ . Odnos valnih duljina i odnos frekvencija je ista, to znači da na 16 Hz valna duljina iznosi 20 m, a na 20 000 Hz iznosi 2 cm. Valna duljina se može izračunati preko puta koji pređe u jednoj sekundi, odnosno preko brzine širenja zvuka i frekvencije (Aleksić, 2007). Valna duljina se računa prema sljedećoj jednadžbi (5):

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]} \quad (5)$$

Zvučni val koji se širi, izaziva zvučni tlak čija je vrijednost dvostruko manja nego atmosferski tlak. U jednom dijelu polu-perioda iznos ukupnog tlaka poraste iznad iznosa atmosferskog tlaka, a u drugom se smanji. Čovjekovo uho može čuti niske zvučne tlakove. Na najosjetljivijim frekvencijama, čovjek može čuti zvučne tlakove 10^{-10} puta niže od atmosferskog tlaka, a svi zvučni tlakovi koji su 10^{-4} puta od atmosferskog tlaka izazivaju bol. Mjerna jedinica za zvučni tlak je $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$, odnosno [Pa] (Aleksić, 2007).

Zvučni val sadrži kinetičku energiju u obliku zvučnog tlaka koja se prenosi brzinom zvuka. Mehanička energija koja prolazi kroz okomito na postavljenu površinu od 1 m^2 s obzirom na smjer širenja vala u trajanju od jedne sekunde, naziva se jakost ili intenzitet zvuka. Mjerna jedinica je $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$ (Aleksić, 2007). Intenzitet zvuka računa se prema sljedećim jednadžbama:

$$I = \frac{p}{v} \quad (6)$$

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 \times c} \quad (7)$$

Zvučna snaga se definira količina energija koja u jednoj sekundi prođe kroz površinu S postavljeno okomito na smjer širenja zvuka. Ako je točkasti izvor zvuka, odnosno da se zvuk širi sferno, površina S se računa prema oplošju kugle prikazano

1. UVOD

u jednadžbi 9. Snaga se računa kao umnožak intenziteta i površine nad kojom intenzitet djeluje (<https://fonet.ffzg.unizg.hr/djelatnici/bakran/akf1/Osnovni.html>, 2024). U tablici 4 su prikazani podaci zvučnih snaga nekih izvora zvuka koji se emitiraju u okolinu.

$$S = 4 \times r^2 \times \pi \text{ [m}^2\text{]} \quad (8)$$

$$P = I \times S \text{ [W]} \quad (9)$$

Tablica 4. Vrijednosti zvučne snage kod nekih izvora zvuka (Aleksić, 2007)

Izvor zvuka	Zvučna snaga, P [W]
Normalan razgovor, srednja vrijednost	$\sim 7 \times 10^{-6}$
Ljudski glas	$\sim 2 \times 10^{-3}$
Violina	$\sim 10^{-3}$
Klavir	$\sim 2 \times 10^{-1}$
Truba	$\sim 3 \times 10^{-1}$
Orgulje	1-10
Bubanj	~ 10
Veliki zvučnik, max. snaga	$> 10^2$

Može se uočiti u tablici 4 kako vrijednosti zvučne snage imaju velike omjere. Radi lakšeg očitavanja vrijednosti zvučne snage, tlaka i intenziteta, uvodi se mjerna jedinica decibel [dB]. Decibel je bezdimenzionalna, logaritamska mjera odnosa dviju veličina. Veličine se određuju za svaki parametar koji se promatra (zvučni tlak, intenzitet i snaga). Razina zvučnog tlaka koji se prikazuje u decibelima u odnosu na referentni iznos jednako je 20 μPa . To je referentni iznos zvučnog tlaka na frekvenciji od 1 Hz. Taj referentni iznos odgovara pragu čujnosti čovjeka (Petošić i sur., 2018). Kod zvučnog tlaka nije se mogao izračunati referentni iznos iz odnosa zvučnog tlaka i zvučnog intenziteta. Iz toga razloga, znanstvenici su se međunarodno dogovorili za taj referentni iznos. Kod intenziteta, bol u ljudskom uhu nastaje pri 10^{-12} W/m^2 . To je vrijednost referentnog intenziteta pri 20 μPa . Budući da zvučni intenzitet može se poistovjetiti s zvučnom snagom, referentna zvučna snaga iznosi 10^{-12} W . Razina zvučnog tlaka dobiva se sljedećom jednadžbom (10):

$$L_p = 20 \times \log \frac{p \text{ [Pa]}}{2 \times 10^{-5}} \text{ [dB]} \quad (10)$$

Gdje je:

L_p – Razina zvučnog tlaka [dB];

p – Zvučni tlak [Pa];

p_0 – nulta razina zvučnog tlaka = 20 μPa .

Razina zvučnog intenziteta dobiva se sljedećom jednadžbom (11):

$$L_I = 10 \times \log \frac{I \left[\frac{W}{m^2} \right]}{10^{-12}} \text{ [dB]} \quad (11)$$

Gdje je:

L_I – Razina zvučnog intenziteta [dB];

I – Zvučni intenzitet $\left[\frac{W}{m^2} \right]$;

I_0 – nulta razina zvučnog intenziteta = $10^{-12} \frac{W}{m^2}$.

Razina zvučne snage dobiva se sljedećom jednačinom (12):

$$L_P = 10 \times \log \frac{P \text{ [W]}}{10^{-12}} \text{ [dB]} \quad (12)$$

Gdje je:

L_P – Razina zvučne snage [dB];

P – Zvučna snaga [W];

I_0 – nulta razina zvučne snage = 10^{-12} W .

Kako bi se olakšalo očitavanje vrijednosti zvučnog tlaka, intenziteta i snage, osmislila se skala *SPL* (eng. *Sound pressure level*). U toj zvučnoj skali (tablica 5), referentna vrijednosti zvučnog tlaka, intenziteta i snage predstavljaju vrijednosti od 0 dB (Aleksić, 2007).

Tablica 5. Prikaz zvučne skale SPL za nekoliko primjera zvučnih izvora
(https://helpwiki.evergreen.edu/wiki/index.php/How_Sound_Works, 12.8.2024.)

Primjeri zvučnog izvora	SPL, dB	Zvučni tlak p , Pa	Zvučni intenzitet I , W/m ²
Zvuk aviona, udaljenost od 50 m	140	200	100
Granica boli	130	63,2	10
Granica nelagodnosti	120	20	1
Motorna pila, udaljenost od 1 m	110	6,3	0,1
Zvučnik u diskoteci, udaljenost od 1 m	100	2	0,01
Kamion, udaljenost od 10 m	90	0,63	0,001
Nogostup pored gužve	80	0,2	0,0001
Usisavač, udaljenost od 1 m	70	0,063	0,00001
Razgovor, udaljenost od 1 m	60	0,02	0,000001
Prosječna kuća	50	0,0063	0,0000001
Tiha knjižnica	40	0,002	0,00000001
Tiha soba tijekom noći	30	0,00063	0,000000001
Pozadinski zvuk u televizijskom studiju	20	0,0002	0,0000000001
Šuškanje lišća	10	0,000063	0,00000000001
Granica čujnosti	0	0,00002	0,000000000001

Pokazatelj, koji se može mjeriti, da materijal više upija zvuk nego reflektira ili obrnuto, je koeficijent apsorpcije zvuka (eng. *Sound absorption coefficient / SAC*). Dalje u tekstu se koristi izraz SAC. Definira se kao odnos apsorbirane energije u odnosu na dolaznu energiju zvučnog vala (jednadžba 13). Što je veći koeficijent, veća je apsorpcija, a manja refleksija zvuka. Koeficijent refleksije zvuka R koji pokazuje suprotnu vrijednost SAC-a te se definira kao odnos reflektirane energije u odnosu na dolaznu energiju zvučnog vala i računa se preko jednadžbe 14. Na slici 4 može se vidjeti kako zvučni val reagira kad dođe u kontakt s materijalom. Nadolazeći zvučni val u kontaktu s materijalom prijelazi u apsorbirani val, reflektirani val i transmisijski val. Koliko neki materijal upija, reflektira ili transmitira zvučni val, bitno ovisi o njegovim svojstvima (Amares i sur., 2017).

$$\alpha = \frac{E_a}{E_e} \quad (13)$$

$$R = \frac{E_r}{E_e} \quad (14)$$

Gdje je:

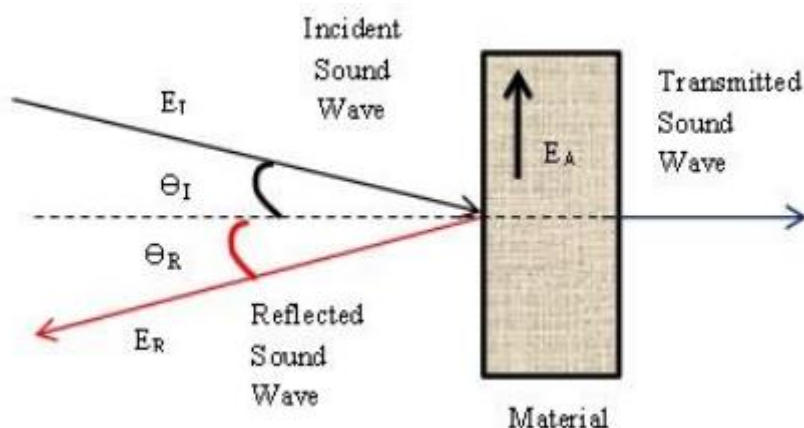
α - Koeficijent apsorpcije zvuka;

R - Koeficijent refleksije zvuka;

E_a - apsorbirana energija;

E_r - reflektirana energija;

E_e - inicirajuća (dolazna) energija.



Slika 4. Shematski prikaz interakcije zvuka s materijalom (Amares i sur. 2017).

Postoji puno čimbenika koji utječu na apsorpcijska svojstva materijala kao što su homogenost, elastičnost, gustoća, poroznost, debljina i tvrdoća materijala (Borković H. 2016).

Debljina materijala daje bolja apsorpcijska svojstva što je materijal deblji te kad je na manjim frekvencijama (od 100 do 2000 Hz) za razliku na većim frekvencijama (>2000 Hz). Razlog tome što je, na nižim frekvencijama, veća valna duljina zvučnog vala. Također se preporučuje da debljina materijala bude 1/10 valne duljine kako bi imao bolja apsorpcijska svojstva (Amares i sur. 2017).

Materijal će imati veći SAC što je materijal više elastičniji i manje tvrdoće. Materijali većih gustoća, u pravilu, imaju manji SAC. Što je materijal gušći, kompaktniji, tvrdi, manje elastičan, ima manji udio pora, imat će manji SAC (Borković H. 2016). Prema Nandanwar i sur. (2017.), povećanjem gustoće materijala se smanjuje SAC, ali povećanjem poroznosti za iste vrste materijala, povećava se SAC. Materijali s otvorenim porama imaju veći SAC nego materijali sa zatvorenim porama. Što je veća poroznost, stijenka materijala ima veću interakciju sa zvučnom valom. Taj val se odbija unutar stijenke pora, gdje pri svakom odbijanju dolazi do trenja, odnosno zvučna energija se pretvara u toplinsku energiju koja se upija u materijal. Kod vlaknasto / poroznih materijala većih gustoća, povećava se udio vlaknaca po površini. Zbog toga

dolazi do većeg trenja između vlakanaca i zvučnog vala, te time se povećava SAC (Tiuc i sur. 2014).

Druga veličina, koja se često mjeri uz SAC, je koeficijent prijelaznog gubitka (*eng. Sound transmission loss*). Po nekim literaturama označava se oznakama *STL* ili *TL* i gdje je mjerna jedinica decibel [dB]. Koeficijent pokazuje odnos inicirajuće zvučne energije i prijelazne zvučne energije, odnosno koliko se reducirala zvučna energija s prolaskom kroz materijal. *TL* se računa prema sljedećoj jednadžbi (15):

$$TL = 10 \times \log \frac{E_e}{E_d} \text{ [dB]} \quad (15)$$

Gdje je:

TL - Koeficijent prijelaznog gubitka, [dB];

E_e - Inicirajuća zvučna energija;

E_d - prijelazna zvučna energija.

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog rada bilo je određivanje koeficijenta apsorpcije zvuka svakog sloja zasebno u višeslojnom zidu korištenom za izradu bungalova. Obzirom na navedeno, ciljevi ovog rada su:

- Određivanje koeficijenta apsorpcije zvuka OSB ploče, sendvič ploče, furnirske ploče i staklene vune u području niskih frekvencija (od 50 Hz do 1600 Hz),
- Određivanje koeficijenta apsorpcije zvuka navedenih materijala u ovisnosti o gustoći i debljini.

Hipoteza:

- Koeficijent apsorpcije zvuka ovisan je o sastavu i građi materijala,
- Gustoća materijala ima veliki utjecaj na izmjereni koeficijent apsorpcije zvuka,
- Koeficijent apsorpcije zvuka ovisan je o frekventnom području ispitivanja.

3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1 MATERIJALI

Uzorci su uzeti iz višeslojnog zida pokusne montažne kuće *bungalov* na području Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije. Zid se sastoji od osam slojeva: dva sloja sendvič ploča, dva sloja OSB ploča, dva sloja staklene vune i dva sloja furnirskih ploča. Slojevi su zasebno glodani na CNC stroju na nominalnoj dimenziji promjera od 100 mm. Glodani su na tu dimenziju tako da uzorci se postave unutar cijevi i da nemaju nikakav zazor, odnosno razmak, između unutarnjih stijenki cijevi i uzorka.

Sve ploče, osim sendvič ploče, su komercijalnog tipa. Sendvič ploča je napravljena u sklopu projekta u tvrtki Spačva Bjelin d.o.o. Sendvič ploča je sastavljena od gornjeg sloja, srednjeg i donjeg sloja. Gornji i donji sloj su piljeni hrastovi furniri nominalne debljine od 2,9 mm. Srednji sloj je napravljen iz *armstrong* ploče. Slojevi su međusobno lijepljeni PVAC ljepljivom. Debljine uzoraka su izmjerene električnim pomičnim mjerilom u milimetrima, a mase izmjerene na industrijskoj vazi u gramima. Budući da se zna vrijednosti promjera, debljine i mase uzoraka, mogu se izračunati gustoće uzoraka prema sljedećoj jednadžbi (16):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{r^2 \times \pi \times d} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad (16)$$

Gdje je:

ρ – gustoća uzorka, $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$;

m – masa uzorka, [g];

V – volumen uzorka, $[\text{cm}^3]$;

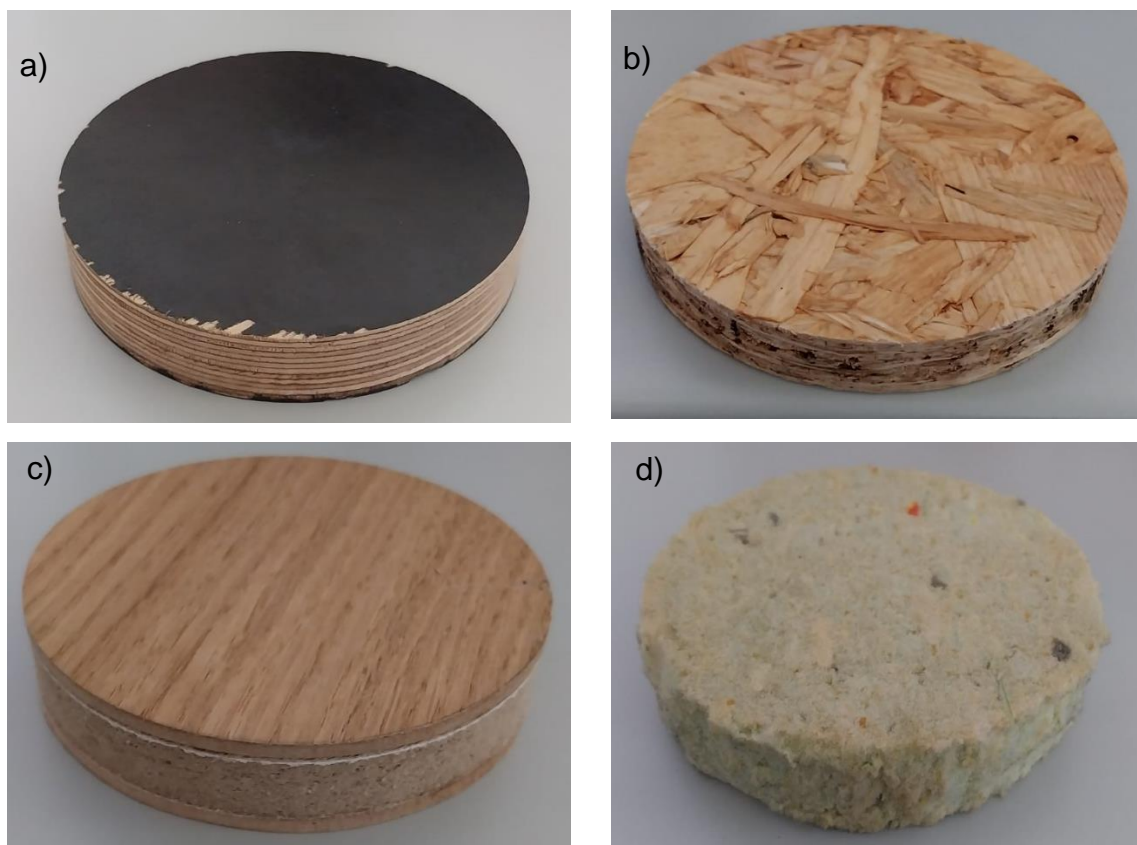
r – polumjer uzorka, [cm];

d – debljina uzorka, [cm].

Uzorci (slojevi) višeslojnog zida su prikazani na slici 5, a debljine, mase i gustoće uzoraka su prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Debljine, masa i gustoća uzoraka (slojeva) višeslojnog zida.

Vrsta uzorka	Debljina uzorka (mm) pri Ø100 mm	Masa uzorka (g)	Gustoća uzorka (g/cm ³)
Sendvič ploča	19,66	65,48	0,424
OSB ploča	13,96	68,48	0,624
Staklena vuna	23,18	23,52	0,129
Furnirska ploča	16,11	95,68	0,756



Slika 5. Uzorci ispitivanja: a) Furnirska ploča; b) OSB ploča; c) Sendvič ploča; d) Staklena vuna
(Foto: Lončar F., 2024)

3.2 METODE

Uzorci su ispitivani pomoću impedancijske cijevi (eng. *impedance tube*) u Laboratoriju za mehaničku obradu drva na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije u Zagrebu. Ispitivanje, unutar cijevi, se provodilo pri atmosferskom tlaku od 1013,25 hPa, temperaturi od 20,00 °C, relativnoj vlažnosti zraka od 80 %. Brzina zvuka iznosila je 343,24 m/s i gustoća zraka 1,202 kg/m³.

Ispitivanje se odvija sljedećim postupcima:

1. Kalibriranje dva mikrofona impedancijske cijevi kako ne bi došlo do krivih očitavanja.
2. Postavljanje svakog uzorka pojedinačno u cijev te pričvršćenje uzorka kako ne bi došlo do pojave zazora.
3. Puštanje zvuka iz zvučnika na uzorak gdje zvuk mora biti 10 dB glasniji nego pozadinska buka tijekom ispitivanja.
4. Ispušteni zvuk iz izvora se mjeri pomoću dva mikrofona gdje se mjere maksimalni i minimalni zvučni tlakovi.
5. Koeficijent apsorpcije zvuka i koeficijent refleksije zvuka se mjere pomoću softverskog programa i matematičkih formula.

3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

Dvije najčešće metode za ispitivanje koeficijenta apsorpcije zvuka su *standing wave ratio* koja je standardizirana prema normi ISO 10534-1 i *transfer-function* metoda koja je standardizirana prema normi ISO 10534-2 (Bhattacharya i Bihola, 2019). Za ispitivanje, u diplomskom radu, koristila se *transfer-function* metoda. Nakon mjerenja, u softverskom programu, tlak se određuje pri svakoj frekvenciji prema sljedećoj jednadžbi (17):

$$H_{12} = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} \quad (17)$$

Gdje je:

H_{12} - *transfer function* između 1. i 2. mikrofona;

p_1 – zvučni tlak izmjeren na 1. mikrofona [Pa];

p_2 – zvučni tlak izmjeren na 2. mikrofona [Pa].

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (18)$$

Gdje je:

k_0 – broj valova u zraku;

c_0 – brzina zvučnog vala u zraku cijevi, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

$$H_I = e^{-jk_0s} \quad (19)$$

$$H_R = e^{jk_0s} \quad (20)$$

Gdje je:

H_I - *transfer function* inicirajućeg vala;

H_R - *transfer function* reflektirajućeg vala;

s – udaljenost između mikrofona, [m].

Preko prijašnjih jednadžbi (9, 10, 11 i 12) može se izračunati koeficijent refleksije zvuka preko sljedeće jednadžbe (13):

$$R = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (21)$$

Gdje je:

R – Koeficijent refleksije zvuka;

x_1 – udaljenost između 1. mikrofona i uzorka, [m].

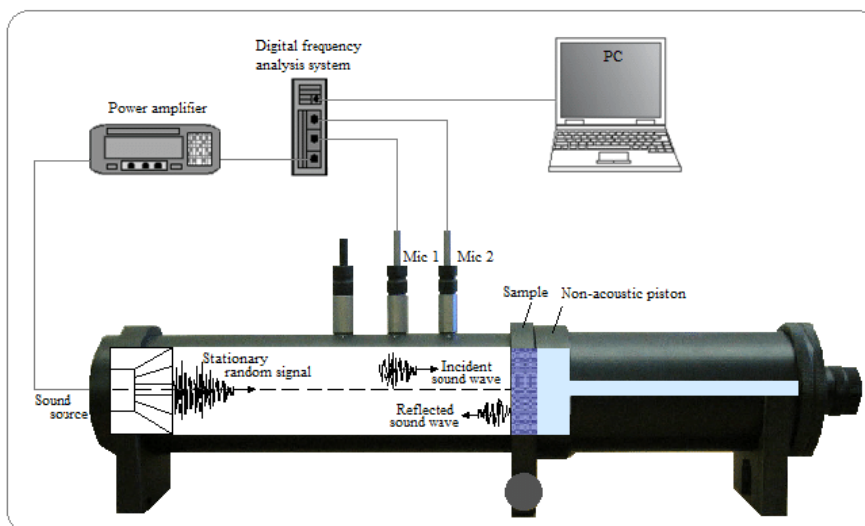
SAC se računa prema sljedećoj jednadžbi (13):

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (22)$$

Gdje je α koeficijent apsorpcije zvuka, odnosno SAC (Ružickij i dr. 2020).

3.3 Impedancijska cijev (eng. *Impedance tube*)

Kako bi se uspješno ispitali SAC, aparatura impedancijske cijevi se mora sastojati od sljedećih komponenti i uređaja: dvije šuplje cijevi promjera 30 i 100 mm, dvije cijevi za postavljanje uzoraka promjera 30 i 100 mm, zvučnik (izvor zvuka), tri mikrofona, amplifikator (pojačivač), uređaj za analizu signala i laptop na kojem se nalazi program za ispitivanje i kalibriranje uređaja. Na slici 6 je shematski prikaz aparature impedancijske cijevi i njenih komponenti. Na kraju cijevi nalazi klizni klip koji ima dvije svrha: namjestiti zazor između uzorka i kraja cijevi te da se upije sav dolazeći zvuk. U slučaju kod cijevi promjera od 30 mm, udaljenost između uzorka i najbližeg mikrofona mora biti 25 mm dok udaljenost između dva mikrofona je 20 mm. U slučaju kod cijevi promjera od 100 mm, udaljenost između uzorka i najbližeg mikrofona te udaljenost između dva mikrofona mora biti 100 mm. Cijev je najbitniji dio aparature. Cijev, koja je napravljena od nehrđajućeg čelika, mora biti glatka, homogena i imati neporozne stijenke. Jedine rupe koje smije imati su rupe za mikrofone. Te rupe su izbušene s preciznošću od $\pm 0,2$ mm. Debljina stijenke cijevi je 5 mm, što je minimalno dopuštena debljina da tijekom ispitivanja ne dođe do vibracije od zvuka i rezonance u cijelom spektru frekvencija što aparatura može mjeriti (Bhattacharya i Bihola, 2019). Za ispitivanje SAC-a, u diplomskom radu, koristila se impedancijska cijev Tip 4206 promjera cijevi od 100 mm te ispitivanje se provodilo u rasponu od 50 do 1600 Hz (<https://www.bksv.com/media/doc/Bp1039.pdf>, 2019).

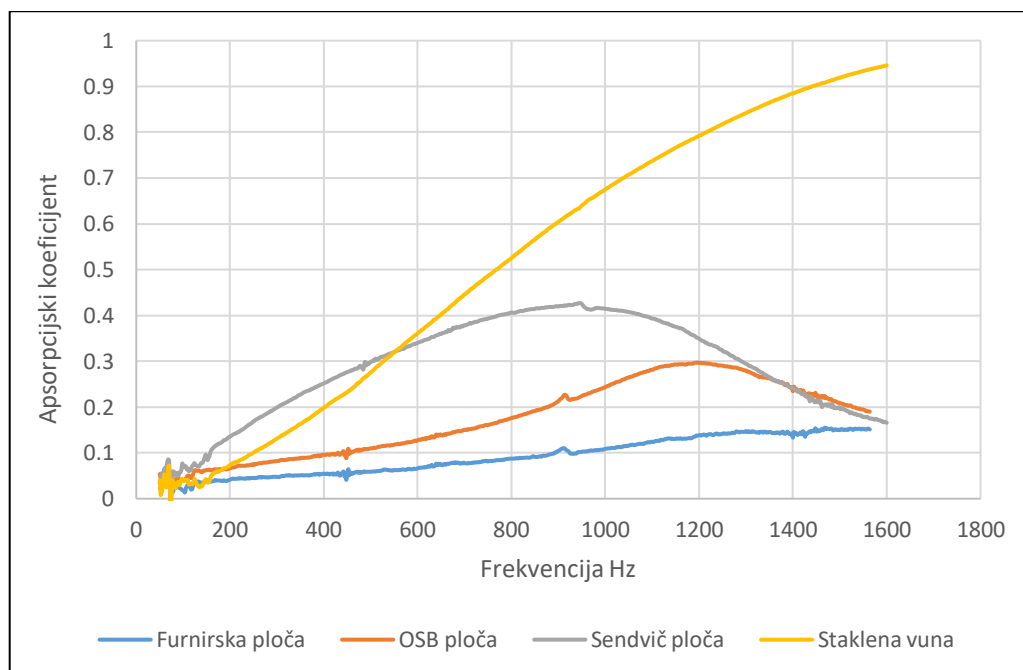


Slika 6. Prikaz aparature impedancijske cijevi i njenih segmenata (Çelikel i Babaarslan, 2017)

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Rezultati istraživanja su prikazani na slikama 7, 8, 9, 10, 11, 12 i 13 te tablici 7. Na slici 7 se može uočiti da porastom frekvencije vrijednosti SAC-a raste kod svih uzoraka. Kod OSB i sendvič ploče se vrijednosti SAC-a smanjuju kad dosegnu svoju maksimalnu vrijednost (eng. *peak*) i to se događa pri većim frekvencijama. Staklena vuna i furnirska ploča nemaju peak vrijednost, odnosno njihova maksimalne vrijednosti su pri zadnjoj izmjerenoj frekvenciji od 1600 Hz. Pri nižim frekvencijama (do 500 Hz) najveću SAC ima sendvič ploča u iznosu oko 0,32, a najmanju furnirska ploča oko 0,06. Nakon 500 Hz, vrijednost SAC-a staklene vune eksplicitno raste i pri većim frekvencijama doseže vrijednosti oko 0,9. Furnirska ploča ima najmanji porast vrijednosti SAC-a dok staklena vuna ima najveći porast.

Prema Smardzewski i dr. (2015.), gdje se ispitalo SAC 17 različitih kompozita na bazi drva, furnirska ploča od topolovine, debljine 18,4 mm, i OSB ploča, debljine 17,5 mm, pokazivali su sličan trend vrijednosti kao i u rezultatima diplomskog rada. Furnirska ploča je imala niže vrijednosti nego OSB ploča u svim frekvencijama, te obje ploče su imali SAC manji od 0,2 što se poklapa s rezultatima.



Slika 7. Vrijednosti apsorpcijskih koeficijenata uzoraka višeslojnog zida pri rasponu od 50 do 1600 Hz.

Prema Scoczynski Ribeiro i dr. (2019.), gdje se ispitalo SAC uzoraka MDF, OSB i WWCB ploča različitih debljina, vrijednosti SAC-a OSB ploče debljina 12 mm i gustoće približno 0,52 g/cm³ se poklapaju s rezultatima diplomskog rada. Jedino što se može uočiti da vrijednosti imaju veći skok od 800 Hz nadalje, za razliku od našeg istraživanja, gdje je porast postepen. Također između 1200 i 1600 Hz pada vrijednost

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

dok, kod istraživanja Scoczynski Ribeiro i dr. (2019.), eksplicitno raste. Vrijednosti ostaju ispod 0,3 kod oba istraživanja što govori da se poklapaju rezultati.

Prema Adams T. (2016.), izmjerene vrijednosti SAC-a staklenih vuna dimenzija debljine 25 mm i gustoća 25, 48 i 96 kg/m³ se poklapaju s rezultatima diplomskog rada. Autor tvrdi da ne postoji nekakve velike razlike u vrijednostima SAC-a kod većinu staklenih vuna različitih gustoća dostupnih na tržištu.

Na slici 8, 9 i 10 mogu se prikazati rezultati u odnosu na gustoću pri rasponu frekvencija od 50 – 1600 Hz. Prema Ameres i dr. (2017.), gustoća znatno utječe na apsorpcijska svojstva materijala, bilo bi jako interesantno prikazati rezultate preko gustoće. Na grafovima (slika 8) se može uočiti kako uzorak većih gustoća, u ovom slučaju furnirska ploča ima najmanji SAC u odnosu na ostale uzorke pri svim frekvencijama. Najveći iznos SAC-a u rasponu od 50 – 500 Hz ima sendvič ploča, a u rasponu od 500 – 600 Hz ima staklena vuna.

Na grafovima (slika 9) se može uočiti da razmak SAC-a staklene vune raste za razliku od ostalih uzoraka. SAC, u rasponu frekvencija od 600 do 1000 Hz, staklene vune se povećala od 0,40 do 0,64, sendvič ploče od 0,36 do 0,41, OSB ploče od 0,13 do 0,21 i furnirska ploče od 0,69 do 0,10.

Na grafovima (slika 10) može se uočiti da SAC staklene vune se povećala od 0,70 do 0,93. Kod OSB i sendvič ploče se dogodilo *peak* vrijednosti. Kod OSB ploče, SAC se povećao od 0,25 do 0,29, zatim se smanjio na 0,20. Kod sendvič ploče, SAC se smanjio od 0,41 do 0,18. Kod furnirske ploče, SAC se povećao od 0,11 do 0,15.

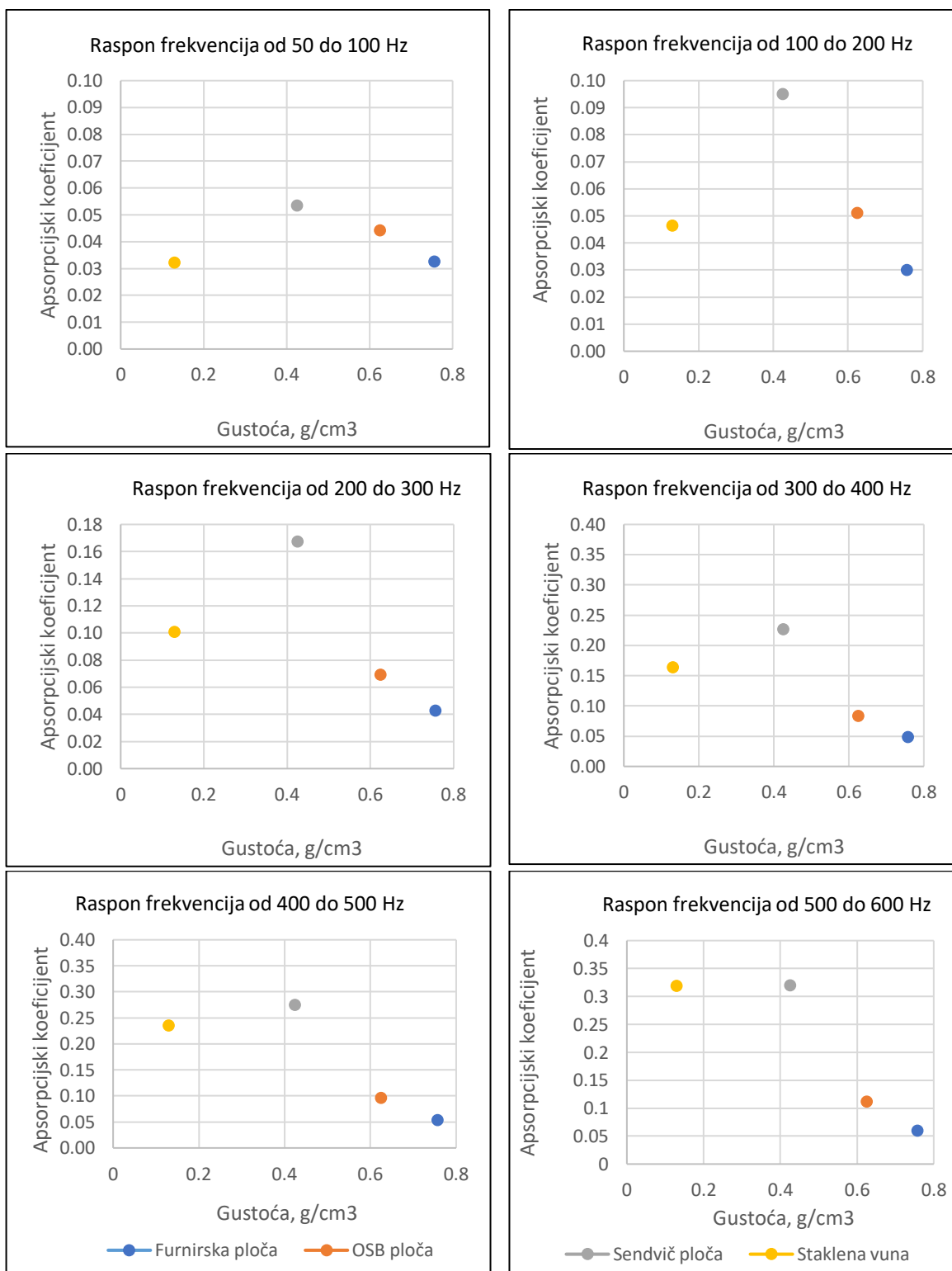
Rezultati se mogu prikazati, uz gustoću, preko odnosa debljine uzoraka. U teoriji, prema Ameres i sur. (2017.), što je deblji materijal veći je SAC., međutim, na grafovima, prikazani na slikama 11, 12 i 13, može se uočiti da OSB ploča, koja ima najmanju debljinu, ima veći SAC nego furnirska ploča, koja je deblja od nje. Ovo govori, iako debljina ima utjecaj na apsorpciju zvuka u materijalu, gustoća ima dominantniji utjecaj na rezultate.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM

Tablica 7. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka pri rasponu frekvencija od 50 do 1600 Hz

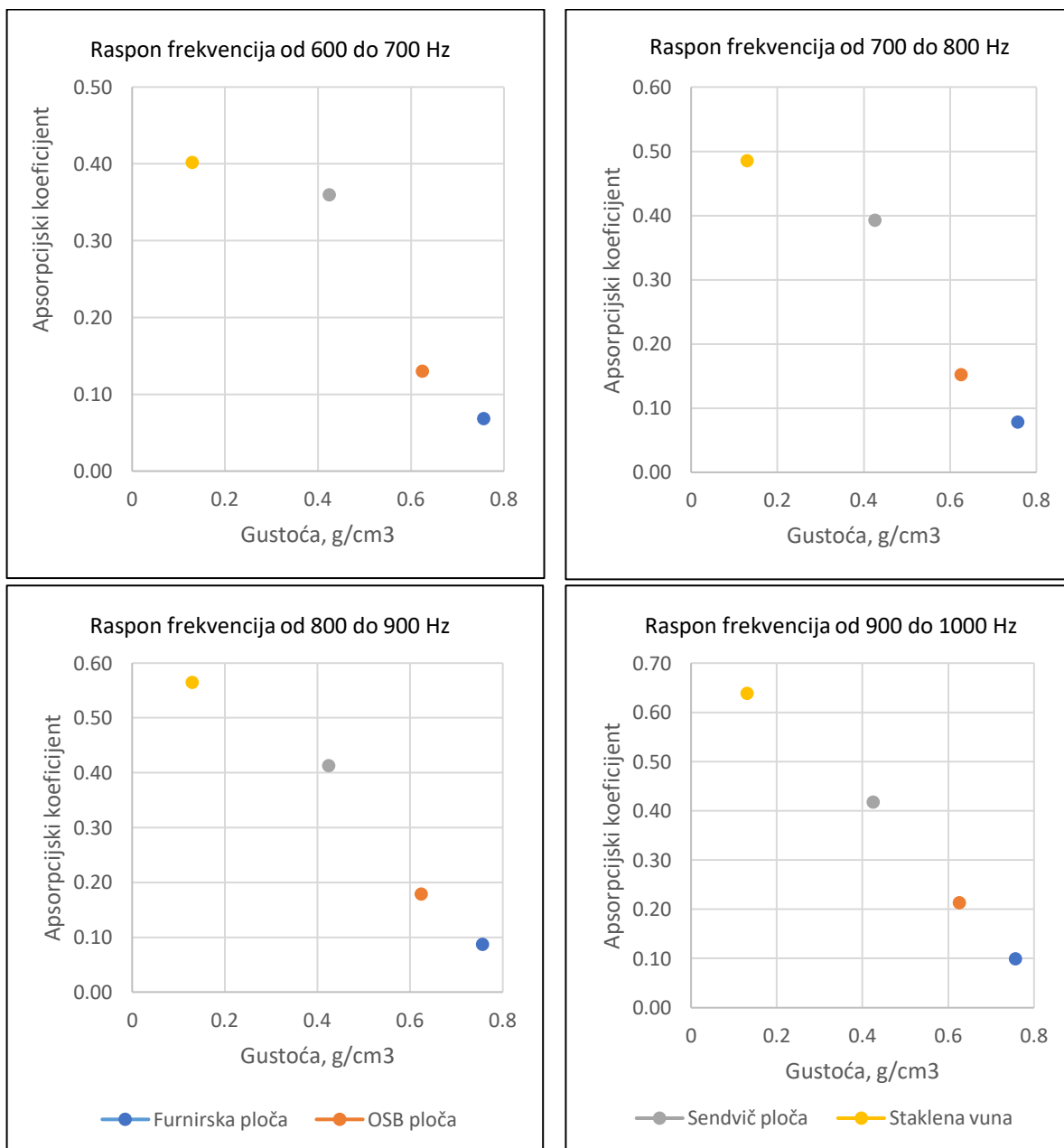
Raspon frekvencija, Hz	Furnirska ploča	OSB ploča	Sendvič ploča	Staklena vuna
50-100	0,03	0,04	0,05	0,03
100-200	0,03	0,05	0,10	0,05
200-300	0,04	0,07	0,17	0,10
300-400	0,05	0,08	0,23	0,16
400-500	0,05	0,10	0,28	0,24
500-600	0,06	0,11	0,32	0,32
600-700	0,07	0,13	0,36	0,40
700-800	0,08	0,15	0,39	0,49
800-900	0,09	0,18	0,41	0,57
900-1000	0,10	0,21	0,42	0,64
1000-1100	0,11	0,25	0,41	0,71
1100-1200	0,13	0,28	0,37	0,77
1200-1300	0,14	0,29	0,32	0,82
1300-1400	0,15	0,27	0,27	0,86
1400-1500	0,14	0,24	0,22	0,90
1500-1600	0,15	0,21	0,18	0,93
Gustoća, g/cm ³	0,756	0,624	0,424	0,129
Debljina, mm	16,11	13,96	19,66	23,18

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



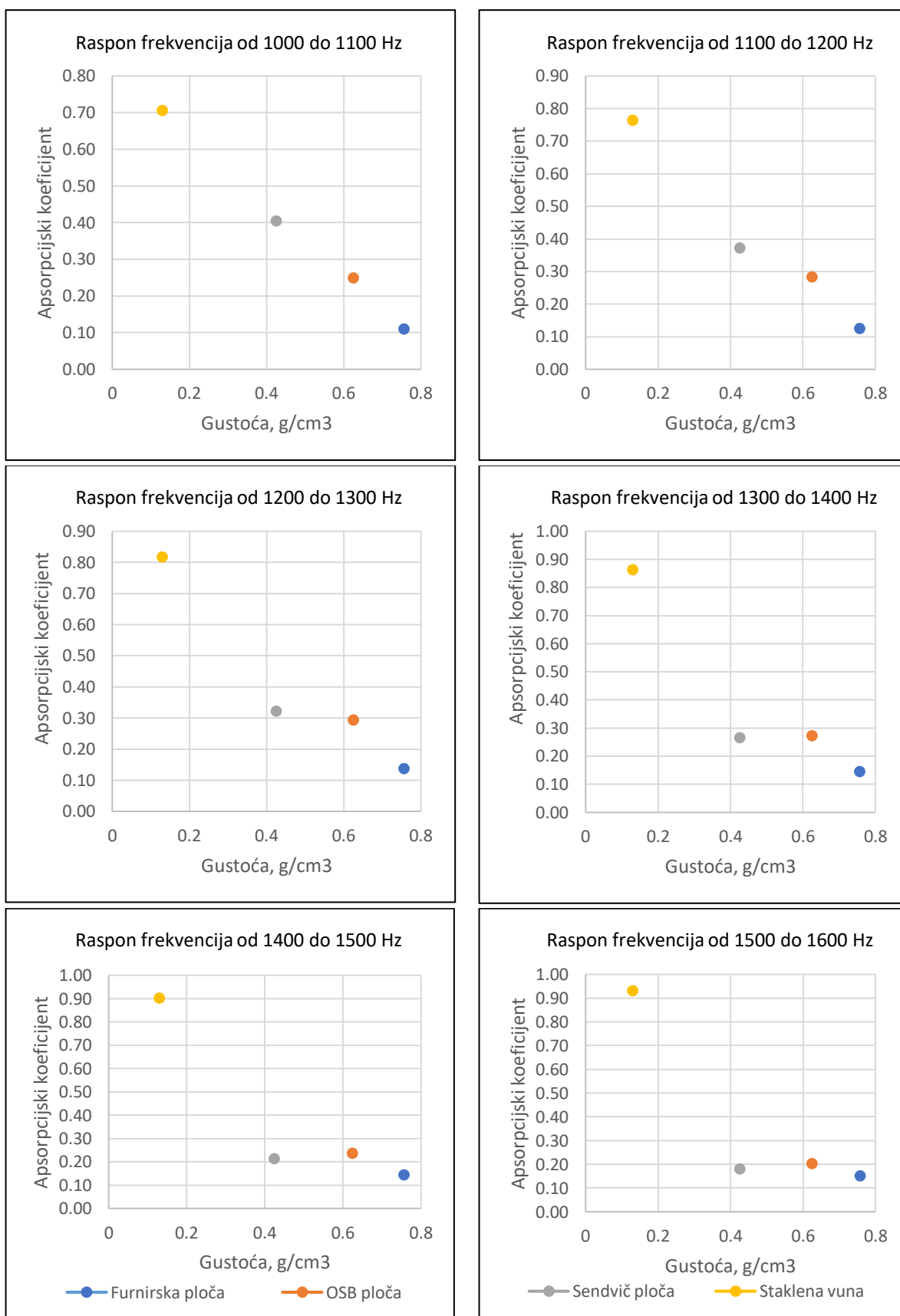
Slika 8. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri nižim rasponima frekvencija od 50 do 600 Hz.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



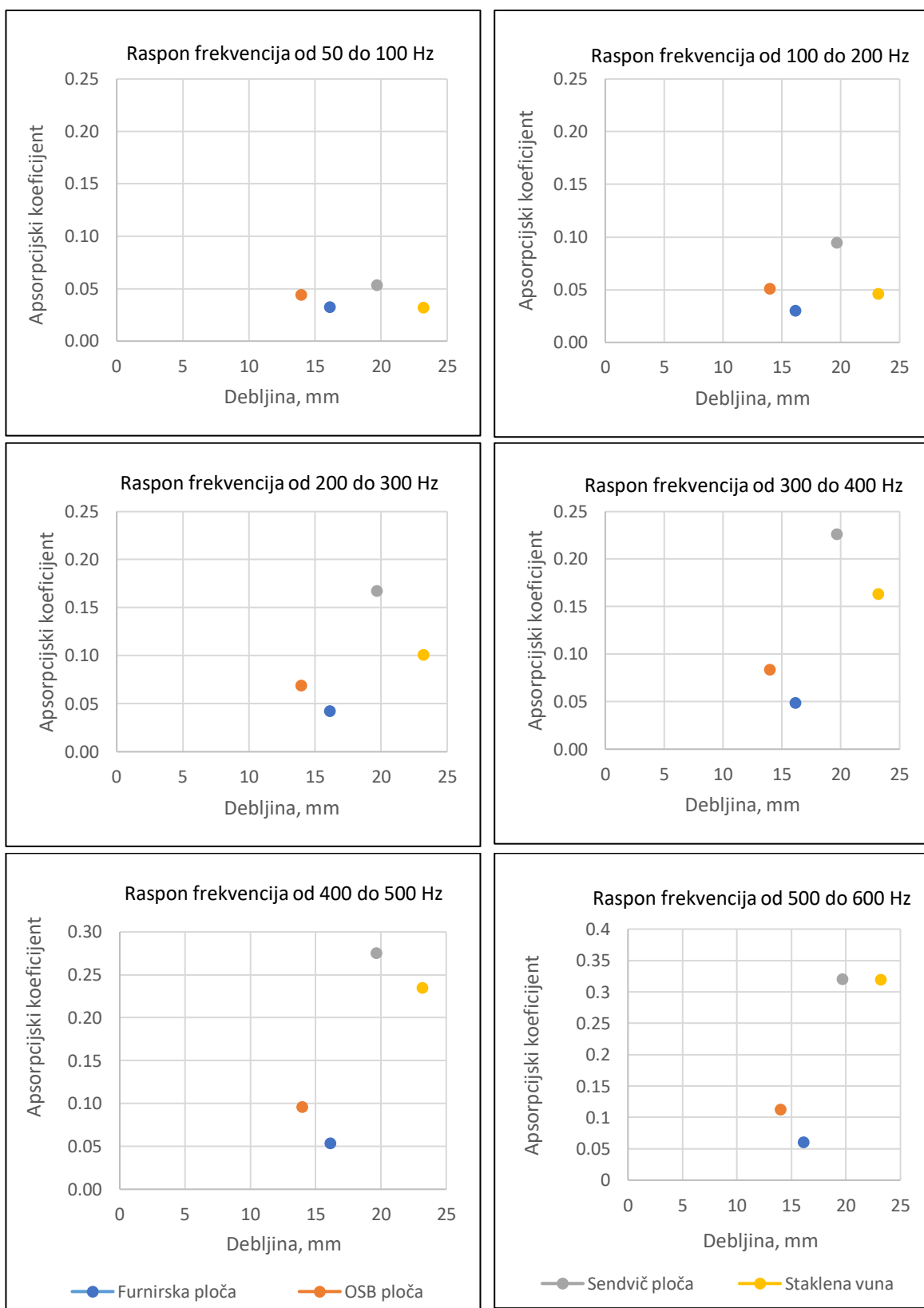
Slika 9. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri srednjim rasponima frekvencija od 600 do 1000 Hz.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



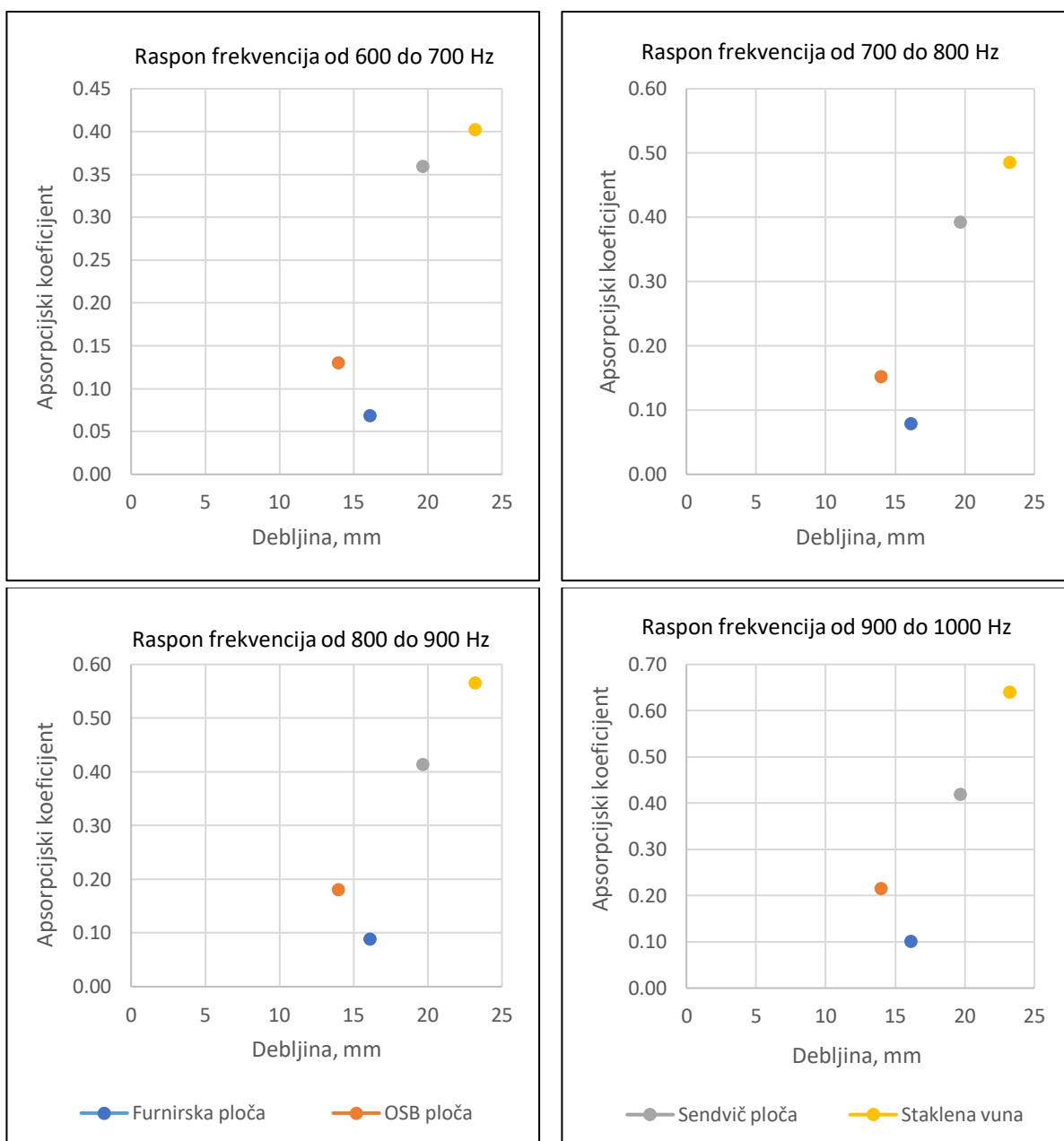
Slika 10. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na gustoći pri većim rasponima frekvencija od 1000 do 1600 Hz.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



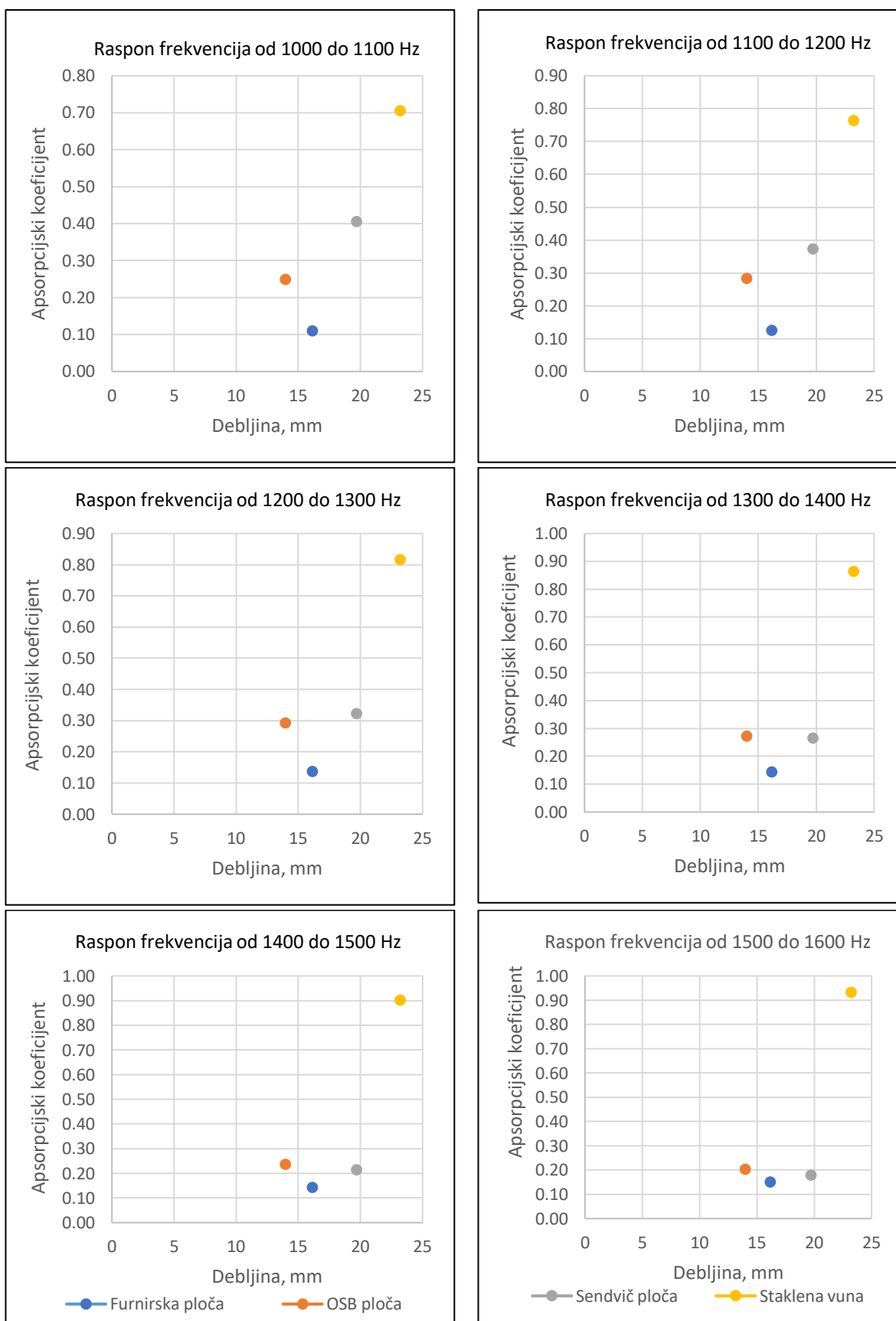
Slika 11. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri nižim rasponima frekvencija od 50 do 600 Hz.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 12. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri srednjim rasponima frekvencija od 600 do 1000 Hz.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA S RASPRAVOM



Slika 13. Srednje vrijednosti SAC-a uzoraka u odnosu na debljine pri većim rasponima frekvencija od 1000 do 1600 Hz.

5. ZAKLJUČAK

Smisao ovog diplomskog rada je bilo da se odredi koeficijent apsorpcije zvuka uzoraka višeslojnog zida *bungalov* kuće pomoću metode impedancijske cijevi. Iz ispitivanja se moglo sljedeće zaključiti:

1. SAC kod sendvič ploče je najveći pri nižim frekvencijama (do 500 Hz), a od 500 do 1600 Hz staklena vuna ima najveći SAC.
2. Sendvič i OSB su postigle maksimalne vrijednosti SAC-a (*peak*), koja su nakon toga počele padati. Kod staklene vune i furnirske ploče, vrijednosti SAC-a su se samo povećavale.
3. Najniži SAC na svim frekvencijama ima furnirska ploča.
4. Gustoća iznimno utječe na vrijednost SAC-a, pri čemu povećanje gustoće rezultira nižim izmjerenim vrijednostima SAC na svim mjernim frekvencijama.
5. OSB ploča, koja ima najmanju debljinu, ima veći SAC nego furnirska ploča, koja ima veću debljinu od nje.

LITERATURA

1. Adams T., 2016: Sound Materials: A Compendium of Sound Absorbing Materials for Architecture. Frame publishers, Amsterdam, str. 33.
2. Aleksić, Z., 2007: AKUSTIKA PROSTORIJA, Univerzitet Novi Sad, Prirodni matematički fakultet, Novi Sad, 2 – 21 str.
3. Amares S., Sujatmika E., Hong T. W., Durairaj R., Hamid H. S. H. B., 2017: A Review: Characteristics of Noise Absorption Material. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 908 (2017) 012005. doi :10.1088/1742-6596/908/1/012005
4. Bhattacharya S. S., Bihola D. V., 2019: Design and Construction of Impedance Tube for Sound Absorption Coefficients Measurements. International Journal of Advance Research in Science and Engineering.9:93-104.
https://ijarse.com/images/fullpdf/1569408734_P812.pdf
5. Borković H., 2016: Utjecaj građevnih materijala na akustičku kvalitetu. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, 13-16 str.
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:340112>
6. Çelikel D. C., Babaarslan O., 2017: Effect of Bicomponent Fibers on Sound Absorption Properties of Multilayer Nonwovens. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 12, Issue 4 – 2017, 15-25. <http://www.jeffjournal.org>
7. Nandanwar A., Kiran M. C., Varadarajulu K. Ch., 2017: Influence of Density on Sound Absorption Coefficient of Fibre Bord. Open Journal of Acoustics, 2017, 7, 1-9. <http://www.scirp.org/journal/oja>
8. Petošić A., Grubeša S., Suhanek M., 2018: Osnove akustike, buka okoliša i zvučna izolacija te mjere za zaštitu od buke u otvorenom i zatvorenom prostoru, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 5 – 35 str.
9. Ružickij R., Astrauskas T., Valtere S., Grubliauskas R., 2020: Sound Absorption Properties Evaluation and Analysis of Recycled Tyre Textile Fibre Waste. Environmental and Climate Technologies 2020, vol. 24, no. 3, 318–328.
<https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0106>
10. Scoczynski Ribeiro R., Avelar Gomes M. H., Amaralia R. S. D., Terashima F. J. H., Santana L. H., Catai R. E., Matoski A., 2019: Sound Absorption of Brazilian wooden panels and their use as Building Components. PROCEEDINGS of the 23rd International Congress on Acoustics, 2019, Auchen, Njemačka, 2959-2966.
https://www.researchgate.net/profile/Luis-Santana-5/publication/336914169_Sound_Absorption_of_Brazilian_wooden_panels_and_their_use_as_Building_Components/links/5dba360da6fdcc2128f0d00c/Sound-Absorption-of-Brazilian-wooden-panels-and-their-use-as-Building-Components.pdf
11. Smardzewski J., Kamisiński T., Dziurka D., Mirski R., Majewski A., Flach A., Pilch A., 2015: Sound absorption of wood-based materials. Holzforschung 2015,1-9.
https://www.researchgate.net/profile/Jerzy-Smardzewski/publication/270895491_Sound_absorption_of_wood-based_materials/links/57a8fbe908aed1b226244c48/Sound-absorption-of-wood-based-materials.pdf

12. Šaš E., 2007: Zaštita od komunalne buke. Prirodni matematički fakultet Univerzitet Novi Sad, Novi Sad, str. 9.
13. Tiuc A. E., Vasile O., Uscă A. D., Gabor T., Vermeşan H., 2014: The Analysis of Factors That Influence the Sound Absorption Coefficient of Porous Materials. RJA V vol XI issue 2/2014. 105-108 str.
https://www.researchgate.net/publication/283269461_The_Analysis_of_Factors_That_Influence_the_Sound_Absorption_Coefficient_of_Porous_Materials