

Akustična svojstva namještaja za odlaganje

Bojčić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:385789>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
DIPLOMSKI STUDIJ
OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA

IVAN BOJČIĆ

AKUSTIČNA SVOJSTVA
NAMJEŠTAJA ZA ODLAGANJE

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK
DIPLOMSKI STUDIJ
OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA

AKUSTIČNA SVOJSTVA
NAMJEŠTAJA ZA ODLAGANJE

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Oblikovanje proizvoda od drva

Predmet: Konstrukcije proizvoda od drva III

Ispitno povjerenstvo: 1. (mentor) izv. prof. dr. sc. Ivica Župčić

2. (komentor) doc. dr. sc. Kristijan Radmanović

3. (član) izv. prof. dr. sc. Marin Hasan

Student: Ivan Bojčić, bacc. ing. techn. ling.

JMBAG: 0068231114

Datum odobrenja teme: 5. svibnja 2023.

Datum predaje rada: 10. lipnja 2023.

Datum obrane rada: 14. srpnja 2023.

ZAGREB, srpanj 2023.

DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov	Akustična svojstva namještaja za odlaganje
Autor	Ivan Bojčić, bacc. ing. techn. ling.
Adresa autora	Siget 14 D, 10020 Zagreb, Hrvatska
Mjesto izrade	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Šumarstva i drvne tehnologije
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	izv. prof. dr. sc. Ivica Župčić
Izradu rada pomogao	doc. dr. sc. Kristijan Radmanović
Godina objave	2023.
Obujam	49 str., 48 slika, 13 tablica i 21 navod literature
Ključne riječi	Namještaj, akustične ploče, akustika, drvo, zvuk, apsorpcija, jeka, buka, akustika drva
Sažetak	<p>Namještaj za odlaganje okružuje čovjeka u svakodnevnom životu, stoga razvoj i poznavanje akustičnih svojstava namještaja pridonosi spoznajom o akustici prostora. Akustične ploče koriste se kao dio namještaja u uredskim prostorima, knjižnicama, hotelima, predavaonicama te svugdje gdje je potrebno prigušiti neželjeni zvuk i smanjiti odjek u prostoriji. Masivno drvo i neki kompoziti na bazi drva mogu doći u obzir kao akustični materijali. U ovom radu, pomoću novog uređaja za mjerenje, eksperimentalno će se odrediti koeficijent apsorpcije zvuka za različite vrste drva i pločastih materijala te uvidjeti kakve su njihove akustične osobine. Kao apsorber zvuka koristiti će se mineralna (kamen) vuna različitih debljina. Rezultati ispitivanja pokazali su da kod ispitivanja materijala na visokim frekvencijama postoji neznatna razlika u apsorpciji zvuka, pločasti materijali postižu lošije rezultate u odnosu na masivno drvo, a uzorak jelovine dodavanjem apsorbera imao je bolje rezultate u odnosu na uzorak hrastovine i bukovine.</p>

BASIC DOCUMENTATION CARD

Title	Acoustic properties of storage furniture
Author	Ivan Bojčić, bacc. ing. techn. ling.
Adress of Author	Siget 14 D, 10020 Zagreb, Croatia
Thesis performed at	Faculty of Forestry and Wood Technology, University of Zagreb
Publication Type	Master's thesis
Supervisor	Assoc. Prof. Ivica Župčić
Preparation Assistant	Assist. Prof. Kristijan Radmanović
Publication year	2023.
Volume	49 pages, 48 figures, 13 tables and 21 references
Key words	Furniture, acoustic panels, acoustics, wood, sound, absorption, reverberation, noise, acoustics of wood
Abstract:	<p>Storage furniture surrounds people in everyday life, therefore the development and knowledge of the acoustic properties of furniture contributes to knowledge about the acoustics of the space. Acoustic panels are used as part of the furniture in office spaces, libraries, hotels, lecture halls and everywhere else where it is necessary to dampen unwanted sound and reduce echo in the room. Solid wood and some wood-based composites can be considered as acoustic materials. In this work, using a new measuring device, the sound absorption coefficient for different types of wood and panel materials will be determined experimentally, and their acoustic properties will be examined. Mineral (stone) wool of different thicknesses will be used as a sound absorber. The test results showed that when testing materials at high frequencies, there is a slight difference in sound absorption, panel materials show worse results compared to solid wood, and the fir sample with the addition of an absorber shows better results compared to the oak and beech sample.</p>

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB FŠDT 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

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

U Zagrebu, 10. lipnja 2023.

vlastoručni potpis

Ivan Bojčić

PREDGOVOR

Akustika prostora jedan je od važnijih čimbenika za ugodno boravljenje u nekoj prostoriji. Postoje različiti akustični materijali koji nam pomažu u tome, a jedan od njih su akustične ploče. Elementi namještaja mogu biti korišteni kao akustične ploče i time pridonijeti apsorpciji zvuka u prostoru.

U ovom diplomskom radu dat će se uvid o građi drva, akustici, akustičnim pločama te drvu kao akustičnom materijalu. Pomoću novog uređaja za mjerenje vršit će se ispitivanje na uzorcima masivnog drva te različitih pločastih materijala i time eksperimentalno odrediti koeficijent apsorpcije zvuka.

Ispitivanja će nam prikazati koji materijali imaju najbolje rezultate kada ih želimo koristiti kao akustične ploče u obliku pročelja namještaja ili zidnih obloga.

Ovim putem se zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Župčiću na nesebično prenesenom znanju, strpljivosti, stručnim savjetima te neprestanoj dostupnosti tokom cijelog pisanja diplomskog rada. Zahvaljujem se i komentoru doc. dr. sc. Kristijanu Radmanoviću koji mi je uvelike izlazio ususret i bio pri velikoj pomoći prilikom ispitivanja i obrade rezultata.

Također se zahvaljujem svim profesorima na Fakultetu šumarstva i drvne tehnologije na prenesenom znanju i trudu, te kolegama koje sam upoznao u toku cijelog studiranja.

Posebna hvala mojoj obitelji i zaručnici Martini na neprestanoj podršci u toku cijelog studiranja.

Ivan Bojčić

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. CILJ ISTRAŽIVANJA	2
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	3
3.1 DRVO.....	3
3.1.1 Makroskopska građa drva	3
3.1.1.1 Srčika, kora, drvo	4
3.1.1.2 God	4
3.1.1.3 Bjeljika i srž	5
3.1.1.4 Tekstura i žica drva	5
3.1.1.5 Jažice	6
3.1.2 Elementi građe drva.....	6
3.2 AKUSTIKA	10
3.2.1 Zvuk	10
3.2.2 Brzina širenja zvuka	11
3.2.3 Frekvencija i valna duljina	13
3.2.4 Zvučni tlak.....	14
3.2.5 Refleksija zvuka	14
3.2.6 Apsorpcija zvuka i koeficijent apsorpcije	15
3.2.7 Akustični otpor.....	16
3.2.8 Vrijeme odjeka	17
3.2.9 Buka	18
3.3 AKUSTIKA PROSTORA.....	19
3.3.1 Apsorpcijski materijali	19
3.3.1.1 Porozni apsorberi.....	20
3.3.1.1.1 Mineralna vuna.....	21
3.3.1.2 Membranski apsorberi.....	23
3.4 AKUSTIKA DRVA	24
3.4.1 Akustična svojstva drva	25
3.4.2 Akustične ploče	27
4. MATERIJALI I METODE	33
4.1 Materijali	33

4.2 Metode ispitivanja uzoraka	34
5. REZULTATI I RASPRAVA	37
5.1 Analiza niskih frekvencija.....	37
5.2 Analiza visokih frekvencija.....	40
5.3 Usporedba uzoraka od različitih materijala.....	43
6. ZAKLJUČAK	47
7. LITERATURA.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz drvnog valjka u tri osnovna smjera	4
Slika 2. Isječak iz četverogodišnje stabljike bijelog bora	5
Slika 3. Teksture više vrsta drva	6
Slika 4. Prostorni prikaz građe drva četinjača	7
Slika 5. Prostorni prikaz histološke građe drva listača	8
Slika 6. Vrste valova u čvrstim tijelima	11
Slika 7. Duljina zvučnog vala	14
Slika 8. Odbijanje zvučnih zraka ravnog vala od ravne plohe	14
Slika 9. Prikaz odbijanja zvučnih zraka od različitih ploha	15
Slika 10. Prikaz ponašanja različitih materijala prilikom djelovanja zvučnih valova.....	16
Slika 11. Prikaz apsorbera	20
Slika 12. Prikaz debljeg sloja poroznog apsorbera.....	21
Slika 13. Prikaz tanjeg sloja poroznog apsorbera	21
Slika 14. Kamena vuna.....	22
Slika 15. Membranski apsorber sa metalnim nosačima	23
Slika 16. Nekoliko načina titranja ploče	23
Slika 17. Mineralna vuna u prostoru zračnog jastuka	24
Slika 18. Porozni materijal točkasto postavljen na ploču.....	24
Slika 19. Akustične ploče s provrtima	28
Slika 20. Egger akustična ploča	28
Slika 21. Akustično pročelje ormara	29
Slika 22. Egger akustična ploča s provrtima	29
Slika 23. Akustične ploče s utorima	30
Slika 24. Egger akustična ploča s provrtima	30
Slika 25. Akustične zidne obloge	31
Slika 26. Vrijeme odjeka u prostoriji sa i bez akustičnih ploča	31
Slika 27. Prikaz CNC stroja	33
Slika 28. Prikaz obrađenih uzoraka prije ispitivanja	34
Slika 29. Impedancijski komplet cijevi	35
Slika 30. Program PULSE.....	36
Slika 31. Dio rezultata u tablici za male uzorke ispitivane u visoko frekventnom području...	36
Slika 32. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak bukovine pri niskim frekvencijama	37
Slika 33. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak hrastovine pri niskim frekvencijama	38
Slika 34. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak jelovine pri niskim frekvencijama	38
Slika 35. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak MDF-a pri niskim frekvencijama	39
Slika 36. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak OSB-a pri niskim frekvencijama	39
Slika 37. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak HCB pri niskim frekvencijama ..	40

Slika 38. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak bukovine pri visokim frekvencijama	41
Slika 39. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak hrastovine pri visokim frekvencijama	41
Slika 40. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak jelovine pri visokim frekvencijama	42
Slika 41. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak MDF-a pri visokim frekvencijama	42
Slika 42. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak OSB-a pri visokim frekvencijama	43
Slika 43. Usporedba uzoraka niskih frekvencija	44
Slika 44. Usporedba uzoraka visokih frekvencija	44
Slika 45. Usporedba uzoraka s apsorberom 1 pri niskim frekvencijama	45
Slika 46. Usporedba uzoraka s apsorberom 1 pri visokim frekvencijama	45
Slika 47. Usporedba uzoraka s apsorberom 2 pri niskim frekvencijama	46
Slika 48. Usporedba uzoraka s apsorberom 2 pri visokim frekvencijama	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije traheida nekih vrsta drva četinjača	9
Tablica 2. Dimenzije traheja i drvnih vlakana nekih vrsta drva listača	9
Tablica 3. Brzina zvuka u plinovima	12
Tablica 4. Brzina zvuka u materijalima.....	13
Tablica 5. Vrijednosti akustičnog otpora za neke materijale	16
Tablica 6. Vrijeme odjeka pri različitim frekvencijama	17
Tablica 7. Vrijeme odjeka za različite tipove prostorija	18
Tablica 8. Razine decibela.....	18
Tablica 9. Klase apsorpcije zvuka.....	20
Tablica 10. Brzina širenja zvuka u drvu.....	25
Tablica 11. Srednja brzina širenja zvuka u odabranim vrstama drva.....	25
Tablica 12. Vrijednosti brzine zvuka u različitim smjerovima	26
Tablica 13. Vrijednost otpora zvuka u različitim medijima.....	27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Naziv
c	brzina zvuka (m/s)
p_0	atmosferski tlak (Pa)
ρ_0	gustoći pri apsolutno suhom stanju (g/cm^3)
t	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
K	stlačivost tekućine
ρ	gustoća tekućina (g/cm^3)
E	modul elastičnosti (N/cm^2)
λ	valna duljina
f	frekvencija (Hz)
	paralelno sa smjerom žice drva
⊥	okomito na smjer žice drva
w	otpor zvuka

1. UVOD

Namještaj za odlaganje nalazi se svugdje oko nas, u različitim veličinama, oblicima i dizajnimama te je potreban u gotovo svakoj prostoriji. Tijekom vremena osim njegove osnovne namjene, dodavale su mu se i različite funkcije i dodatci s kojima si je čovjek nastojao olakšati i prilagoditi svakodnevni život. Namještaj za odlaganje je, kako mu i ime govori, namještaj namijenjen za odlaganje i pohranjivanje stvari. Osim što se prilagođava čovjekovim potrebama svaka prostorija u kojoj se namještaj nalazi je drugačija te je danas zbog sve intenzivnijeg razvoja tehnike i industrije sve teže zadovoljiti sve čovjekove zahtjeve. Jedan od problema koji se javlja u prostorijama, posebno tamo gdje su stropovi visoki, prostorije duge ili gdje boravi više ljudi, jest odjek zvuka i buka. Iako većini ljudi neprimjetno akustika prostora jedan je od važnijih čimbenika za ugodno boravljenje. Stoga su se drugom polovicom 20. stoljeća počele proizvoditi tzv. akustične ploče koje su danas sve više zastupljene, a izrađene su od materijala koji apsorbira zvuk te postiže zvučnu izolaciju unutar i između prostorija. Akustične ploče koriste se kao dio namještaja u uredskim prostorima, knjižnicama, hotelima, dvoranama, radijskim studijima, predavaonicama te svugdje gdje je potrebno prigušiti neželjeni zvuk i smanjiti odjek u prostoriji.

Akustički učinkovite površine namještaja mogu se uklopiti u cjelokupni koncept prostorne akustike korištenjem dekora i kombinacijom više materijala. Pružaju dodatne mogućnosti za uključivanje dovoljno površina koje apsorbiraju zvuk u planove kada dizajn i strukturno-fizički kriteriji čine realizaciju konvencionalnih rješenja izazovnijim (Egger acoustic katalog, 2016).

2. CILJ ISTRAŽIVANJA

Unutar ovog rada istražiti će se kako pomoću akustičnih materijala možemo apsorbirati zvuk, time smanjiti buku i odjek u prostoriji i na koji način nam u tome pomaže namještaj. Cjelovito drvo i neki kompoziti na bazi drva mogu doći u obzir kao akustični materijali zbog njihove sposobnosti da apsorbiraju značajnu količinu upadnog zvuka kako bi se smanjila razina zvučnog tlaka ili vrijeme odjeka u sobi. Pri ispitivanju koristit će se novi uređaj za mjerenje akustičnih karakteristika naziva „Impedancijski komplet cijevi“. Pomoću cijevne metode ispitat će se različite vrste cjelovitog drva i pločastih materijala koji mogu poslužiti kao primjer akustičnih ploča u obliku pročelja namještaja ili zidnih obloga u prostoriji te će se na taj način eksperimentalno odrediti koeficijent apsorpcije zvuka.

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

3.1 DRVO

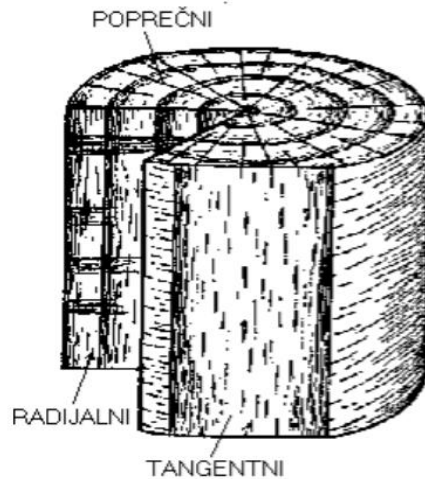
Čak i danas, drvo ostaje materijal izbora za širok raspon primjena, uključujući gradnju, sportsku opremu i glazbene instrumente. To je zbog osobitog i poželjnog spektra mehaničkih i fizikalnih svojstava drva, koji jedino u iznimnim okolnostima mogu biti jednaki umjetnim materijalima. Prednosti drva uključuju njegovu relativnu zastupljenost i lakoću oblikovanja osnovnim instrumentima. Drvo je ortotropna tvar, što znači da su njegova mehanička svojstva različita i neovisna u smjerovima triju međusobno okomitih osi: uzdužne, radijalne i tangencijalne. Ovo svojstvo razlikuje drvo od većine umjetnih materijala (Wegst, 2006).

Prema definiciji drvo je nehomogen, anizotropan, porozan, vlaknast i higroskopan materijal, a sastoji se od celuloze, lignina, drvnih polioza, i popratnih tvari kao što su smole, minerali i dr.

Za bolje razumijevanje sadržaja koji će biti u narednim poglavljima pobliže opisan, treba razlikovati pojam drvo. Drvo (genitiv. drveta) upotrebljava se za označavanje biološkoga pojma živog biljnog organizma (stabla), a drvo (genitiv. drva) za oznaku tehnološkog pojma, mrtve tvari koja potječe od živog biljnog organizma. U ovom radu riječ drvo je upotrijebljena kao tehnološki pojam.

3.1.1 Makroskopska građa drva

Makroskopska građa drva može se uočiti na svakoj njegovoj površini bez obzira na orijentaciju reza i način obrade. Budući da se stvaranjem drva u stablu oblikuje valjkasto (točnije stožasto) tijelo s centralnom uzdužnom osi simetrije, za potpuno upoznavanje građe drva potrebne su tri međusobno okomite površine tj. tri međusobno okomita presjeka (slika 1): poprečni (p), tangenti (t) i radijalni (r). Poprečni je presjek okomit na smjer protezanja uzdužne osi debla i grane. Tangenti i radijalni presjeci paralelni su sa smjerom protezanja osi, pri čemu radijalni presjek prolazi kroz centralnu uzdužnu os, a tangenti presjek dodiruje plašt valjka (stošca), odnosno plašt debla ili grane (Trajković i Šefc, 2017).



Slika 1. Shematski prikaz drvnog valjka u tri osnovna smjera (Špoljarić, 1978)

3.1.1.1 Srčika, kora, drvo

Na poprečnim i radijalnim presjecima debla mogu se vidjeti tri različita područja. To su srčika, drvo i kora (slika 2). Središnja srčika obično je jedva primjetna i ostaje iste veličine tijekom cijelog života stabla. Ovisno o starosti stabla i njegovoj brzini rasta, drveni valjak oko srčike može varirati u promjeru.

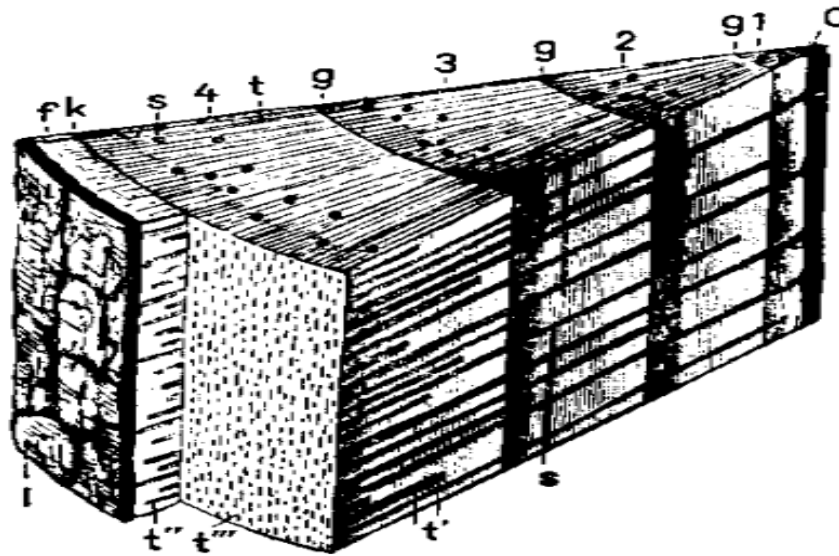
3.1.1.2 God

Najuočljivija posljedica nehomogenosti građe drva na poprečnom presjeku jest god i granica goda. God (godišnji prirast drva) je sloj drva koji se formira po čitavu stablu u toku jedne vegetacijske periode (Trajković i Šefc, 2017).

Godovi ili prsteni prirasta izgledaju kao koncentrični kružni vijenci na poprečnom presjeku debla, odnosno trupca, a svaki od njih u pravilu se sastoji od svjetlije zone ranog drva i tamnije zone kasnog drva. Rano drvo je dio goda koji se formira u proljeće i sastoji se od stanica sa širim lumenom i tankim stijenkama, te prvenstveno služi provodnoj funkciji u drvu. Dio goda formiran u jesen poznat kao "kasno drvo" sastoji se od stanica s uskim lumenom i debelim stijenkama, a njihova primarna funkcija je potporna.

Širinu goda određuju unutarnji i vanjski čimbenici koji utječu na rast drva. Klima, stanište i nasljedna svojstva također imaju značajan utjecaj. Dok spororastuće vrste imaju godove male širine čak i u optimalnim uvjetima, brzorastuće vrste imaju godove velike širine i pod relativno lošim uvjetima rasta. Na širinu goda, klima i kvaliteta staništa imaju najveći utjecaj od vanjskih čimbenika.

Granice goda i ostali dijelovi građe drva prikazani su na slici 2 gdje se vidi isječak iz četverogodišnje stabljike bijelog bora (*Pinus sylvestris* L.) sa tri osnovna presjeka.



Slika 2. Isječak iz četverogodišnje stabljike bijelog bora: (0) srčika, (1-4) godovi drva, (f) živa kora-floem, (l) mrtva kora-lub, (g) granica goda, (s) smolenica, (t) traci, (k) kambij (Špoljarić, 1978)

3.1.1.3 Bjeljika i srž

Bjeljika je dio drva koji čine vanjski godovi drva bliže kori, nastali kao posljednje razvijeni god. Bjeljika prenosi vodu u živom stablu i pohranjuje hranu u živim stanicama. Zove se tako jer je obično bijela ili svijetla. Središnji dio debla poznat je kao srž i sastoji se od dijela drva koji ima mehaničku funkciju i pohranjuje hranjive tvari, no više ne provodi vodu u živom stablu i u njemu su sve stanice umrle.

3.1.1.4 Tekstura i žica drva

Izgled drva na obrađenoj površini zove se tekstura (slika 3). Tekstura drva određena je dimenzijama, oblikom i smjerom nizanja elemenata građe drva (stanice drva) te postotnim učešćem i rasporedom pojedinih elemenata u građi drva. Nadalje, tekstura je određena ravninom rezanja drva, odnosno kutom pod kojim su presječeni elementi građe (Jambrečković i Despot, 2006).

Žica drva je smjer uzdužnih elemenata građe drva s obzirom na anatomske ili uzdužnu os piljene građe. Iako se žica drva odražava u makroskopskom izgledu svakog presjeka, najbolje se uočava na neobrađenoj površini uzdužnog presjeka (Trajković i Šefc, 2017).



Slika 3. Teksture više vrsta drva

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_%28materijal%29 (Pristupljeno 17.04.2023)

3.1.1.5 Jažice

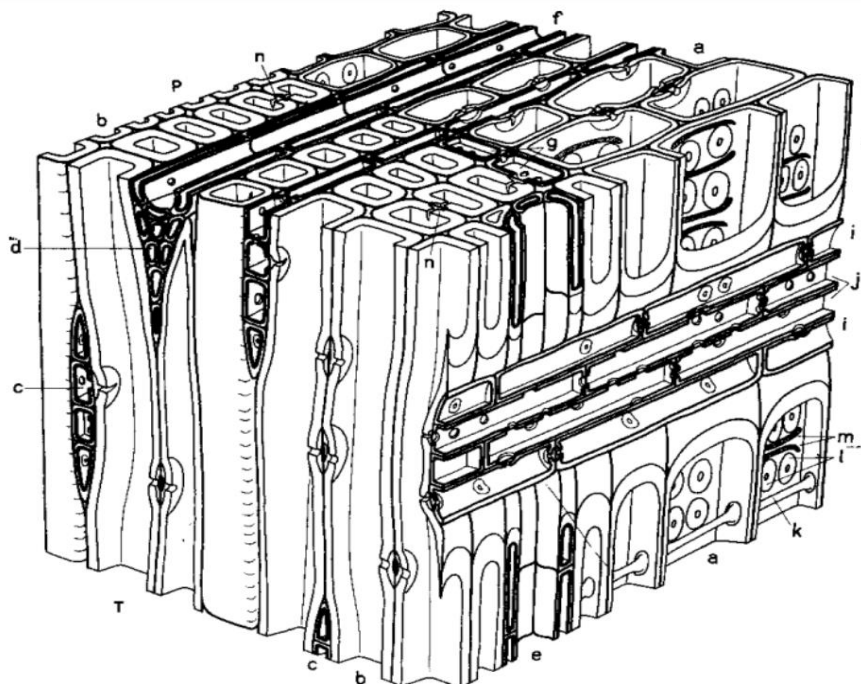
Jažice su neodebljala mjesta membrane stanice koja služe za vezu između lumena susjednih stanica. Jažice se mogu razviti samo u primarnim jažičnim poljima, a nastaju za vrijeme izgradnje sekundarnog sloja stjenke. U svakom primarnom jažičnom polju može se razviti jedna ili više jažica. Jažice su ograničene na određena područja stijenki te se razlikuju po građi, obliku, veličini, broju i rasporedu. Za svaku vrstu stanica tip jažica je konstantan i od dijagnostičkog značenja. U funkcionalnom smislu jažice su neodebljala, lakše propusna mjesta na dodirnim stijenkama susjednih stanica. Jažice služe za izmjenu i transport staničnog sadržaja, a karakteristika su svih vrsta stanica drva (Trajković i Šefc, 2017).

3.1.2 Elementi građe drva

Tehničko drvo čine četinjače (*Gymnospermae-Coniferae*), listače (*Angiospermae-Dicotyledonae*) i palme (*Angiospermae-Monocotyledonae*).

Drvo četinjača (slika 4) izgrađeno je prvenstveno od traheida u uzdužnom smjeru. Traheide su, u funkcionalnom smislu, primarno provodni element koji obavlja i mehaničku funkciju drva. Na makroskopski izgled također utječe ujednačenost strukture. Drvo četinjača ima finiju žicu, odnosno teksturu, i homogeniju strukturu od drva listača jer su vlakanca četinjača obično manjeg promjera (tablica 1). U godu drva četinjača zone ranog i kasnog drva nastaju kao rezultat varijacija u debljini stjenke i lumenu iste vrste elemenata. Svi uzdužni elementi strukture raspoređeni su u pravilne radijalne nizove s tankim i ravnim trcima koji se protežu između njih. Za razliku od mnogih listača, drvo četinjača nema traheje zbog čega su pore nevidljive golim okom.

Markantni su samo godovi s pravilnim zonama ranoga i kasnoga drva te bjeljika i srž. Drvni traci se u pravilu ne vide običnim okom. Na potpuno glatkom poprečnom presjeku pod povećalom se razabiru radijalni nizovi traheida. U drvu nekih rodova vide se pod povećalom i lumeni traheida ranoga drva (*Larix*, *Pseudotsuga*, *Sequoia*), koji mogu biti i veći od sitnih pora listača (Trajković i Šefc, 2017).



Slika 4. Prostorni prikaz građe drva četinjača, ariševina (*Larix europaea*), povećanje 720 ×

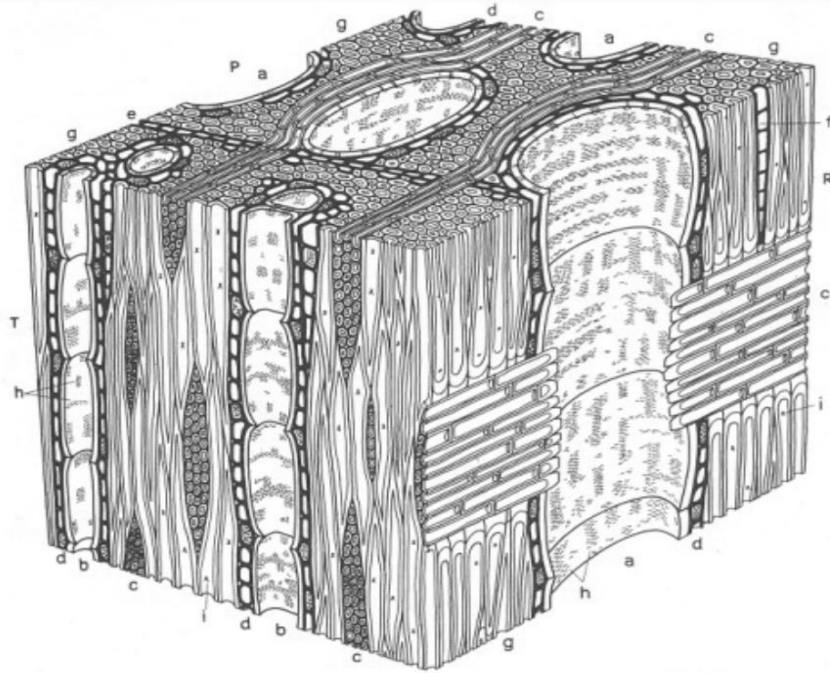
(P) poprečni presjek, (T) tangenti presjek, (R) radijalni presjek, (a) aksijalne traheide ranoga drva, (b) aksijalne traheide kasnoga drva, (c) jednorodni heterocelularni traci, (d) mnogoredni heterocelularni trak sa centralnom radijalnom smolenicom, (e) aksijalna smolenica obložena aksijalnim debelostjenim parenhimom epitela (Špoljarić, 1978)

Radijalna smolenica i radijalni debelostjeni parenhim epitela na slici 4 označen je sa slovom (f). Slovom (g) označen je aksijalni parenhim drva u oskudnom graničnom rasporedu. Rubne traheide traka sa sitnim ograđenim jažicama te parenhim traka s parovima jednostavnih ograđenih jažica označeni su slovima (i) i (j). Trabekule u radijalnom nizu i krasule slovima (k) i (m). Dvostruki niz krupnih ograđenih jažica na radijalnim stijenkama traheida ranoga drva u nasuprotnom rasporedu slovom (l), a parovi ograđenih jažica u tangentnim stijenkama traheida kasnoga drva s pukotinastim otvorima potpuno ugrađenim u debele stjenke slovom (n).

Drvo listača građeno je u uzdužnom smjeru od traheja, traheida, drvnih vlakanca i parenhima (slika 5). Makroskopski izgled drva listača također odražava svoju nehomogenost strukture s obzirom na vrstu, veličinu i raspored elemenata strukture. Drvo listača je izrazito porozno na poprečnom presjeku, a traheje koje se može vidjeti s povećalom ili bez njega, čine većinu strukture. Traheje su nizovi provodnih mrtvih elemenata drva listača. Po građi i po

načinu provođenja vode traheje se bitno razlikuju od traheida. Traheja se značajno povećava u promjeru kako drvo sazrijeva (tablica 2), što potiskuje obližnje mehaničke i akumulativne komponente iz njihovih prvobitnih položaja.

Nepravilnost u rasporedu uzdužnih elemenata građe i devijacije trakova oko traheja specifična je karakteristika drva listača. U homogenim vrstama drva s vrlo sitnim trahejama te se nepravilnosti mogu uočiti samo s povećalom ili mikroskopom (Trajković i Šefc, 2017).



Slika 5. Prostorni prikaz histološke građe drva listača, jasenovina (*Fraxinus angustifolia*), povećanje $225 \times$ (Špoljarić, 1978)

Tri osnovna smjera označena su sa slovima P (poprečni presjek), T (tangentni presjek) i R (radijalni presjek). Slovom (a) označene su krupne traheje ranog drva, a slovom (b) sitne traheje kasnog drva. Višeredni i jednoredni homocelularni lećasti traci drva označeni su slovom (c). Nizovi stanica aksijalnog parenhima u paratrahealno vazicentričnom rasporedu označeni su slovom (d), a nizovi stanica aksijalnog parenhima u apotrahealnom graničnom rasporedu i difuznom rasporedu slovima (e) i (f). Oznaka (g) odnosi se na libriformska vlakanca drva. Sitne ograđene jažice s poprečno pukotinastim otvorima prema lumenu traheja na slici su pod oznakom (h), a pod oznakom (i) pukotinaste jažice na libriformskim vlakancima drva.

U ovom radu ispitivat će se tri vrste drva, a to su hrastovina, bukovina i jelovina te se stoga za njihove vrijednosti ponajviše obraća pažnja u datim tablicama.

Tablica 1. Dimenzije traheida nekih vrsta drva četinjača (Trajković i Šefc, 2017)

VRSTA DRVA	Duljna traheida (mm)	Radijalni promjer (μm)	Debljina stanične stjenke (μm)
<i>Abies alba</i> Mill. - obična jela rano drvo kasno drvo	3,4 - 4,3 - 4,6	23 - 38 - 57 14 - 25 - 33	1,0 - 1,8 - 2,5 3,0 - 4,5 - 6,0
<i>Picea abies</i> Karst. - obična smreka rano drvo kasno drvo	1,3 - 2,8 - 4,3	18 - 36 - 50 16 - 28 - 34	1,0 - 1,7 - 2,5 4,5 - 5,0 - 5,8
<i>Pinus sylvestris</i> L. - obični bor rano drvo kasno drvo	1,8 - 3,1 - 4,5	24 - 44 - 62 23 - 30 - 41	2,5 - 3,3 - 3,7 5,5 - 6,5 - 8,3

Traheide kasnog drva u pravilu su do 10% duže od traheida ranog drva

Tablica 2. Dimenzije traheja i drvnih vlakanca nekih vrsta drva listača (Trajković i Šefc, 2017)

VRSTA DRVA	Promjer traheja (μm)	Duljina drvnih vlakanca (mm)	Promjer drvnih vlakanca (μm)	Debljina st. stjenke drvnih vlakanca (μm)
<i>Quercus robur</i> L. - hrast lužnjak rano drvo kasno drvo	150 - 270 - 350 30 - 70 - 140	0,28 - 0,88 - 1,60	10 - 17 - 28	1,5 - 2,0 - 2,7
<i>Fraxinus excelsior</i> L. - jasen rano drvo kasno drvo	60 - 120 - 350 15 - 50 - 130	0,15 - 1,60	7 - 18 - 29	0,8 - 1,8 - 2,5
<i>Robinia pseudoacacia</i> L. - bagrem rano drvo kasno drvo	130 - 180 - 220 70 - 95 - 140	0,70 - 1,00 - 1,25	6 - 9 - 13	1,7 - 2,0 - 2,5
<i>Fagus silvatica</i> L. - bukva	30 - 100	0,60 - 1,30	7 - 15 - 21	1,8 - 3,7 - 5,1

3.2 AKUSTIKA

Akustika je interdisciplinarna znanost koja se bavi proučavanjem nastajanja i širenja mehaničkih (zvučnih) valova u svim tipovima medija (plinovima, tekućinama i krutinama). Akustika proučava stvaranje, kontrolu, prijenos, prijem i efekt zvuka, a prema Jelaković (1978) dijeli se na četiri područja: fizička akustika, prostorna akustika, psiho-fizička akustika i buka.

3.2.1 Zvuk

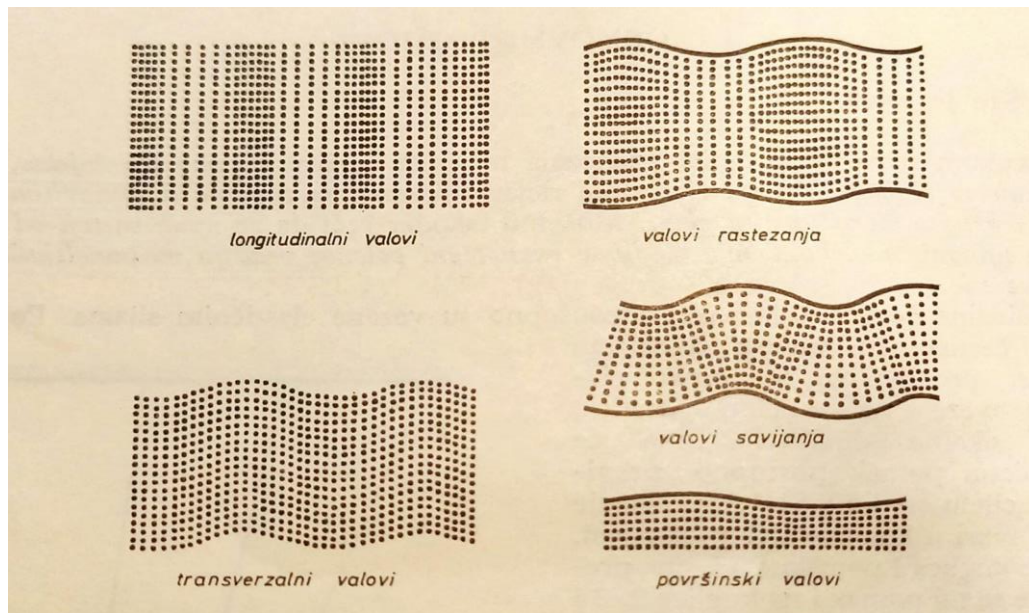
U suvremenom životu gotovo da nema trenutka u kojem zvuk možemo isključiti iz životnih funkcija. Stoga je jasna velika važnost koju zvuk ima za čovjeka. Gotovo sve pojave ili procesi u životnoj sredini stvaraju neki zvuk. Neke pojave stvaraju vrlo visoke razine zvuka, a druge jedva čujne (Koški i Perak, 2010).

Zvuk je val frekvencije od približno 20 Hz do 20 kHz na koji je osjetljivo ljudsko uho, nastaje zbog periodičnoga titranja čestica u elastičnome sredstvu (projekt STRUNA, 2013). Petošić i dr. (2018) opisuju zvuk kao ljudska percepcija nestalnih podražaja nastalih kao posljedica malih promjena razine atmosferskog tlaka ($p_{at} = 101\,325\text{ Pa} = 1\text{ bar}$) koja se širi u zraku. Također zvuk se širi u tekućinama i krutinama.

Zvuk se prenosi kroz medij kao mehaničke vibracije. Prema Jelaković (1978) razlikujemo dvije vrste mehaničkih valova: transverzalni i longitudinalni valovi.

U plinovima i tekućinama valovi zvuka su isključivo longitudinalni, odnosno šire se u istom pravcu u kojem se gibaju čestice medija pri titranju, dok u čvrstim tijelima valovi mogu biti i transverzalni, tj. čestice medija mogu titrati i okomito na pravac širenja vala. U pločama i štapovima postoje druge vrste valova, primjerice valovi savijanja i rastezanja te površinski (Rayleighovi) valovi (Petošić i dr., 2018).

Na koji način dolazi do širenja longitudinalnog, transverzalnog i drugih vrsta valova u mediju prikazano je na slici 6.



Slika 6. Vrste valova u čvrstim tijelima (Jelaković, 1978)

3.2.2 Brzina širenja zvuka

Brzina zvuka u tekućinama i krutinama uglavnom ovisi o gustoći i elastičnosti, a u plinovima ponajviše o temperaturi (Gulam, 2020).

Omjer specifične topline zraka pri stalnom tlaku i stalnom volumenu određuje brzinu prijenosa zvuka u zraku koja ovisi o njegovoj gustoći ρ_0 , atmosferskom tlaku p_0 i konstanti γ . Budući da je širenje zvuka adijabatski proces, što znači da se toplina proizvedena tijekom zgušnjavanja zraka ne može odvititi zbog brzine procesa, ovdje je prisutna konstanta γ .

Slijedi formula putem koje se može izračunati kojom brzinom se širi zvuk u zraku ili plinovima:

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

c - brzina zvuka (m/s)

p_0 - atmosferski tlak (Pa)

ρ_0 - gustoći pri apsolutno suhom stanju (g/cm^3)

S porastom nadmorske visine atmosferski tlak p_0 pada, a gustoća zraka se smanjuje, odnosno njegova specifična težina ρ_0 , tako da je za zrak $\gamma=1,4$. Zbog toga promjene atmosferskog tlaka neznatno utječu na brzinu zvuka. S druge strane, na brzinu zvuka jako utječe temperatura. To se približno može izraziti formulom:

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

t - temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

331,4 - brzina zvuka u zraku pri temperaturi od 0°C (m/s)

Brzina zvuka pada ili raste za nešto više od pola metra za svaki stupanj promjene temperature. Brzina zvuka u zraku pri sobnoj temperaturi od 20°C , je 343 m/s, a pada na 319 m/s na temperaturi od -20°C .

Brzina zvuka u zraku ovisna je o postotku vlage. Prema mjerenjima u laboratorijskim uvjetima na frekvenciji od 293 Hz i 505 Hz, uz normalni tlak i temperaturu od 20°C , brzina zvuka se dodavanjem vlage smanjuje (Jelaković, 1978).

Najniža brzina zvuka u zraku je uz relativnu vlažnost od 14 %, a daljnjim povećavanjem vlažnosti brzina zvuka raste. Prema Jelaković (1978) u području relativne vlažnosti preko 30 %, porast brzine zvuka je linearan, a uz 100 %-tnu relativnu vlažnost, brzina zvuka je za 3,3 % veća nego u zraku bez vlage.

U tablici 3, dane su vrijednosti brzine zvuka za neke plinove pri temperaturi od 20°C i uz atmosferski tlak od 1 bar.

Tablica 3. Brzina zvuka u plinovima (Jelaković, 1978)

Plin	Brzina zvuka (m/s)
Vodik	1270
Helij	971
Dušik	338
Kisik	317

U tekućinama, brzina zvuka ovisi o njihovoj gustoći i stlačivosti i taj odnos se može prikazati formulom:

$$c = \sqrt{\frac{1}{K * \rho}} \quad (3)$$

gdje K označava stlačivosti tekućine, a ρ gustoću tekućine. Kako se u ovom radu neće govoriti o prolasku zvuka kroz tekućine, osim ove formule, daljnji podatci o tekućinama nisu potrebni.

Nadalje, brzina zvuka u krutim tijelima (krutinama) odnos je modula elastičnosti materijala (E) i njegove gustoće (ρ_0), stoga za izračun brzine zvuka u krutinama vrijedi formula:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (4)$$

Što se događa unutar materijala kada zvuk ulazi u njega biti će detaljnije napisano u nastavku (poglavlje 3.2.6 Apsorpcija zvuka), a ovdje će se još prikazati vrijednosti brzine zvuka u različitim krutim tijelima (tablica 4).

Tablica 4. Brzina zvuka u materijalima (Jelaković, 1978)

Materijal	Brzina zvuka (m/s)
Aluminij	5105
Željezo	5000
Staklo	3490
Drvo-jelovina	3320
Srebro	2700
Olovo	1300
Pluto	500
Guma	40-150

3.2.3 Frekvencija i valna duljina

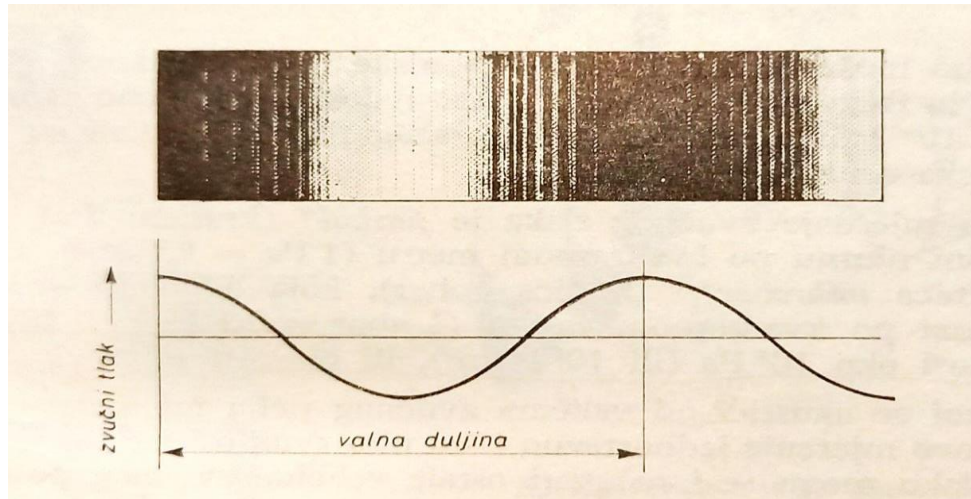
Frekvencija je broj titraja u sekundi i izražena je u hercima (Hz). Raspon frekvencija koje ljudsko uho može detektirati je od 16 Hz do 20 kHz. Uho ne može percipirati tonove na frekvencijama ispod 16 Hz, već umjesto toga osjeća vibracije i taj se spektar frekvencija naziva infrazvukom, a ultrazvuk se odnosi na one frekvencije veće od 20 kHz.

Ultrazvuk se bazira na tome da se zvuk od izvora širi kroz homogene materijale i da se odbija na granici materijala različitih akustičkih osobina, odnosno od nehomogenosti u materijalu. Ako u materijalu postoji greška iza nje će, ovisno o vrsti greške, ultrazvučni valovi oslabiti ili se neće pojaviti (Bojčić, 2021).

Valna duljina je razmak između dva susjedna mjesta najveće koncentracije ili razrijeđenosti u mediju kroz koji putuje zvučni val. Valnih duljina na putu kojim zvuk prijeđe u sekundi ima točno onoliko koliko ima frekvencija (slika 7). Dakle, korištenjem sljedećeg izračuna, valna duljina (λ) može se odrediti odnosom između brzine širenja zvuka (c) i frekvencije (f):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

Odnos valnih duljina prema frekvencijama vrlo je visok u akustičnom području. Valna duljina na najvišoj čujnoj frekvenciji od 20000 Hz je nešto manja od 2 centimetra, dok je valna duljina na frekvenciji od 16 Hz nešto veća od 20 m.



Slika 7. Duljina zvučnog vala (Jelaković, 1978)

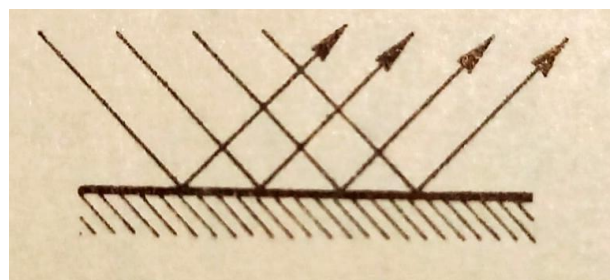
3.2.4 Zvučni tlak

Kako se zvučni val širi, zvučni tlak reproducira atmosferski tlak, uzrokujući porast ukupnog tlaka iznad atmosferskog tlaka u jednoj poluperiodi i pad ispod njega u sljedećoj poluperiodi. Pascal (Pa) je mjerna jedinica za zvučni tlak. Tlak zvuka se smanjuje kako se udaljenost od izvora zvuka povećava i obratno.

Prema Jelaković (1978) u praktičnoj se akustici od veličina zvučnog polja mjeri samo zvučni tlak, zato što je njegovo mjerenje jednostavno i što uho zvuk osjeća kao promjene tlaka.

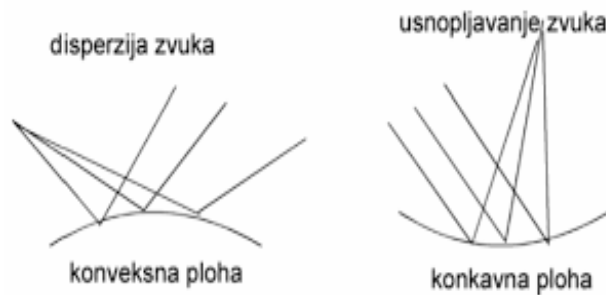
3.2.5 Refleksija zvuka

Refleksija zvuka je pojava koja prati širenje zvuka. Refleksija se pojavljuje ako zvučni val nailazi na prepreku pa se dio zvučne energije apsorbira u njoj, a dio se reflektira. U užem smislu, refleksija je pojava odbijanja zvuka od prepreke. Ako se zvuk odbija od ravno čvrste plohe tada je, prema zakonima refleksije, kut upada jednak kutu refleksije (slika 8).



Slika 8. Odbijanje zvučnih zraka ravnog vala od ravne plohe (Jelaković, 1978)

Ako je ploha konveksna, zvučne zrake se od nje raspršuju (disperziraju) u različitim smjerovima te ovdje ne vrijedi zrcalna refleksija. Kod konkavne površine zvučne zrake se, nakon odbijanja od površine, sužavaju odnosno koncentriraju prema jednoj točki (slika 9). Pri udaru zvučnih zraka u materijal mora biti ispunjen uvjet da je duljina zvučnog vala mnogo manja od dimenzija plohe od koje se val reflektira.



Slika 9. Prikaz odbijanja zvučnih zraka od različitih ploha

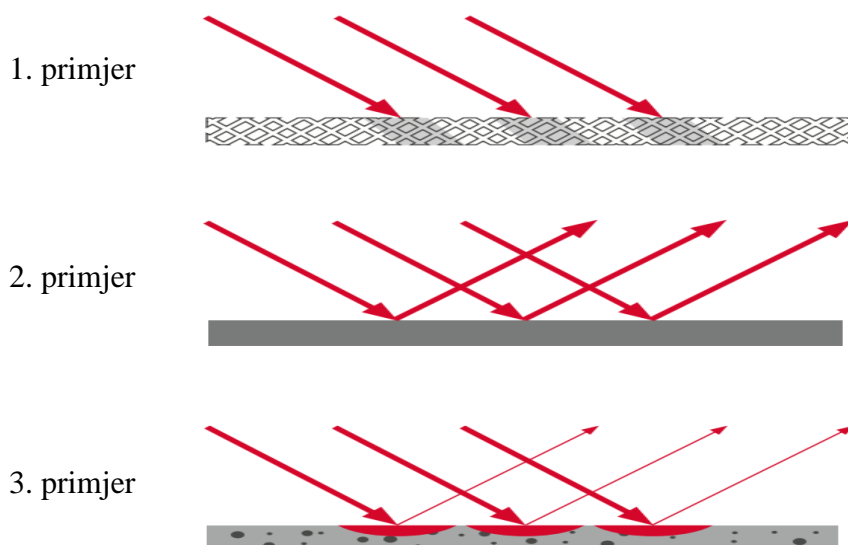
Izvor: <https://www.fpz.unizg.hr/ztos/PRSUS/Informacija.pdf> (Pristupljeno 11.03.2023)

3.2.6 Apsorpcija zvuka i koeficijent apsorpcije

Apsorpcija zvuka je proces oslabljivanja zvuka prilikom njegova prolaska kroz neku sredinu ili pri prijelazu preko neke površine. Zvučna se energija pri tome najvećim dijelom pretvara u toplinu. O procesu apsorpcije u apsorpcijskim materijalima i konstrukcijama govorit će se u poglavlju 3.3.1. Apsorpcijski materijali.

S obzirom na ukupnu snagu zvučnog vala, koeficijent apsorpcije (HRN EN ISO 11654:1998), također poznat kao zvukoupojnost, pokazuje koliko se zvučne energije apsorbira u materijalu na koji zvučni val nailazi, odnosno koeficijent apsorpcije je sposobnost materijala da transformira zvučni val u druge oblike energije (toplinska ili kinetička) te on ponajviše ovisi o frekvenciji. Mjerenje zvučne apsorpcije u odječnoj prostoriji izvodi se prema normi HRN EN ISO 354:2004. Na temelju prolaska zvučne energije kroz krute tvari (krutine) objasniti će se što se događa unutar materijala na koji nailazi zvučni val.

Kad zvučni valovi udare o plohu nekog predmeta, jedan se dio energije, kao što je već rečeno, reflektira i apsorbira, a ostatak se prenese kroz tijelo na drugu stranu (Jelaković 1978).



Slika 10. Prikaz ponašanja različitih materijala prilikom djelovanja zvučnih valova (Egger acoustic katalog, 2016)

(1. primjer) zvuk kompletno apsorbiran i bez refleksije - koeficijent apsorpcije $\alpha = 1$, (2. primjer) zvuk kompletno reflektiran - koeficijent apsorpcije $\alpha = 0$, (3. primjer) djelomična apsorpcija - koeficijent apsorpcije između 0 i 1.

3.2.7 Akustični otpor

Koliko se energije od neke površine odbije (reflektira), a koliko propusti (apsorbira), ovisi o akustičnom otporu materijala. Što je veća razlika u akustičnom otporu ili koliko se malo zvučne energije prenosi s jednog materijala na drugi, to su veće razlike u tvrdoći i gustoći materijala.

U tablici 5 su dane vrijednosti akustičnog otpora za neke materijale. Treba napomenuti da ovi podatci vrijede za prolazak zvuka samo longitudinalnim valovima.

Tablica 5. Vrijednosti akustičnog otpora za neke materijale (Jelaković, 1978)

Materijal	k	R (dB)
Čelik	0,000 04	88
Opeka	0,000 26	76
Hrastovina	0,000 60	64
Pluto	0,013 57	37
Guma	0,132 43	80
Zrak	1	/

Vrijednosti za faktor k vrijede za prijelaz zvuka iz zraka u tvar ili obrnuto. Kada zvuk izađe iz tvari u zrak, ponovno se smanjuje u intenzitetu. Pod broj decibela (dB) u tablici izražava se zvučno prigušenje R za oba prijelaza zvuka.

3.2.8 Vrijeme odjeka

Jeka ili odjek je zadržavanje zvuka nakon prestanka rada zvučnoga izvora koje nastaje nizom odbijanja od okolnih ploha (projekt STRUNA, 2013)

Na razumljivost u prostoriji izravno utječe vrijeme odjeka. Općenito govoreći, kako se vrijeme odjeka povećava, sposobnost prostorije da bude razumljiva opada. To, međutim, ne znači da je najkraće vrijeme odjeka ujedno i najbolje. Vrlo loša razumljivost obično je znak da je vrijeme odjeka prekomjerno.

Ako npr. govor u sobi zvuči zamućeno i ako se osobe vrlo teško međusobno razumiju, može se pretpostaviti da je vrijeme odjeka predugo. Akustički "suho" u ovom kontekstu znači da se zvuk apsorbira neprirodno brzo. Ako se to događa samo na visokim frekvencijama, soba zvuči "šuplje" ili "buja", dok na niskim frekvencijama zvuči "prodorno" i "oštro" (tablica 6).

Tablica 6. Vrijeme odjeka pri različitim frekvencijama (Egger acoustic katalog, 2016)

Događaj	Vrijeme odjeka pri niskim tonovima	Vrijeme odjeka pri visokim tonovima	Subjektivni dojam
Govor	Predugo Predugo Prekratko Prekratko	Predugo Prekratko Predugo Prekratko	zamagljen, teško razumljiv šuplje, ali lako razumljivo prodorni, oštri zvukovi, teško razumljivi suho, ali lako razumljivo
Glazba	Predugo Predugo Prekratko Prekratko	Predugo Prekratko Predugo Prekratko	zamagljen, "valovit" neprirodno šuplje, moguće bujanje drečeci do prodora suha, isprana

Vrijeme odjeka ovisi uglavnom o tri čimbenika: volumenu prostorije, površinama te namještaju i priboru u sobi.

U pravilu vrijedi sljedeće: 1. Veća prostorija znači duže vrijeme odjeka;

2. Veća apsorpcija u prostoriji znači kraće vrijeme odjeka.

Prostorija obično postaje jače odjekujuća s povećanjem visine. Apsorbirajuće površine kao npr. tepisi, zavjese i stropovi koji apsorbiraju zvuk, ali i namještaj ili osobe prisutne u prostoriji, smanjuju vrijeme odjeka.

U tablici 7 navest će se četiri različite prostorije te prosječno vrijeme odjeka u istim nakon što su pravilno obloženi akustičnim materijalima.

Tablica 7. Vrijeme odjeka za različite vrste prostorija (Egger acoustic katalog, 2016)

Tip prostorije	Vrijeme odjeka (primjer)
Crkva	cca. 4-8 s
Učionica srednje veličine	0,6 s
Ured – ovisno o veličini	0,5-0,8 s
Koncertna dvorana za klasičnu glazbu	cca. 1,5 s

3.2.9 Buka

Buka obuhvaća sve zvukove koji se zbog svoje glasnoće i strukture smatraju štetnim, iritantnim ili stresnim za čovjeka i okoliš (Egger acoustic katalog, 2016).

U užem smislu te riječi, buka je svaki neželjeni zvuk. Percepcija buke ovisi o stanju, preferenciji i raspoloženju osobe, doživljava li zvukove kao buku ili ne. Doživljaj buke je individualan i subjektivan (Petošić i dr. 2018). Percepcija zvukova kao buke i način na koji buka utječe na ljude ovisi o fizički mjerljivim veličinama kao što je razina zvučnog tlaka, visina tona, tonalitet i impulzivnost.

Isto vrijedi i za aktivnosti koje zahtijevaju visoku razinu koncentracije. Određeni zvukovi neće se doživljavati kao dosadni čak i pri velikim glasnoćama; zvukovi koje osoba ne voli, dosadna joj je čak i pri niskoj glasnoći (npr. određene vrste glazbe). Kako se osjećamo u određeno vrijeme također utječe na osjetljivost doživljaja buke. Ako je neka aktivnost poremećena ili ometena jednim ili više zvukova, to se naziva zagađenje bukom. Obično se zvukovi koji ne sadrže nikakvu smislenu formu nazivaju pozadinska buka (npr. promet). Razina buke mjeri se u decibelima, a označava se sa dB (Egger acoustic katalog, 2016)

U tablici 8 dane su razine decibela i njihovi primjeri. Razina zvuka od 0 decibela postavljena je kao prag percepcije zvučnog tlaka prosječnog ljudskog slušnog sustava. Dugotrajna izloženost neprekinutom bukom od 80 dB i više, ili kratka izloženost buci od 120 do 140 dB, uzrokuje trajno oštećenje sluha.

Tablica 8. Razine decibela (Egger acoustic katalog, 2016)

Primjer	Decibel (dB)
Zrakoplovni motor	140
Rok koncert / pneumatska bušilica	120
Velika automobilska gužva	100
Glasni razgovori	80
Tihi razgovor	60
Šaptanje	40
Otkucavanje kazaljke na satu	20
Disanje	10
Savršena tišina	0

3.3 AKUSTIKA PROSTORA

Akustična načela postaju sve značajnija u izgradnji predavaonica, uredskih prostora, bolnica, hotela itd. Upotreba suvremenih građevinskih materijala koji više apsorbiraju zvuk od tradicionalnih je jedan od uzroka tome. Zbog toga je jeka često prevelika, što pojačava buku i druge smetnje. Cilj izgradnje akustike je uspostaviti pogodno okruženje za sluh u cijelom prostoru. Govornik i publika trebali bi biti zadovoljni rezultatom.

Jelaković (1978) navodi kako sljedeći preduvjeti moraju biti zadovoljeni kako bi prostorija imala izvrsnu akustiku:

- 1) u prostoriji ne smije biti buke, niti unutarnje niti vanjske;
- 2) zvuk u prostoriji mora biti dovoljno glasan na svim mjestima;
- 3) u prostoriji ne smije biti jek;
- 4) glasnoća zvuka mora biti približno posvuda jednaka, što znači da na mjestima udaljenijim od izvora zvuka, izvornom zvuku treba dodati reflektirani zvuk od prikladno postavljenih ploha u prostoriji;
- 5) u prostoriji ne smiju nastati neželjene rezonancije;
- 6) odjek mora biti dovoljno malen da bi se izbjegla preklapanja uzastopnih zvukova u govoru i glazbi, zbog toga direktan zvuk mora biti u određenom odnosu prema reflektiranom.

Idealna duljina odjeka ne ovisi samo o dimenzijama prostorije, već i o namjenama koje će služiti, prema teoretskoj analizi i mjerenjima obavljenim u ugrađenim prostorijama. Oblik prostorije je ključan jer utječe na to kako se zvuk raspršuje. Kao rezultat toga, dolazimo do glasnoće, oblika i jek kao tri ključna elementa koji utječu na akustiku prostorije.

3.3.1 Apsorpcijski materijali

Zvuk apsorbiraju sve površine, materijali i namještaj u prostoru. Kada govorimo o apsorpcijskim konstrukcijama ili materijalima, govori se o onima čija je primarna funkcija stvoriti kontroliranu apsorpciju kroz svoja akustična svojstva.

Prema Šimetin (1987) svrha takvih akustičkih materijala i elemenata u praksi je da: (1) skrate vrijeme odjeka, (2) otklone pojavu jek i (3) priguše buku.

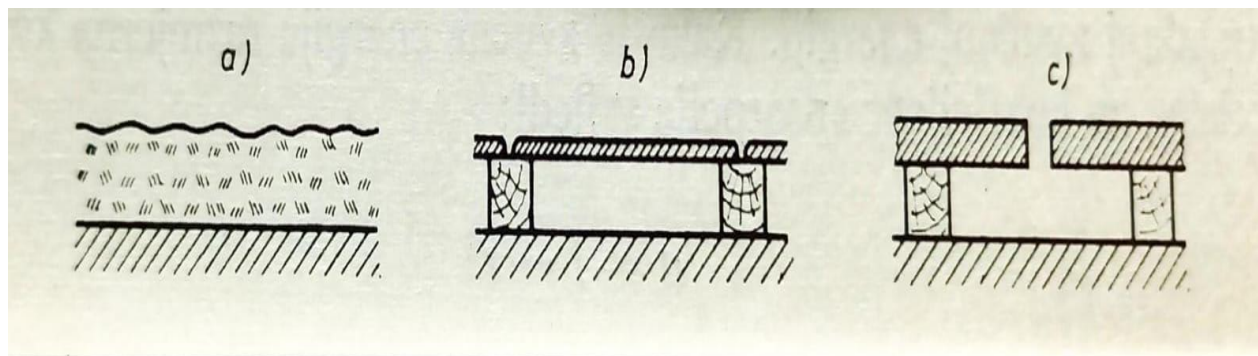
Materijal može apsorbirati zvuk na takav način da ga prvo transformira u drugu vrstu energije, a zatim u toplinu. Dio energije zvučnog vala reflektira se kada se sudari s nekom površinom, dok se preostala energija apsorbira i propusti. Amplituda tlaka reflektiranog vala podijeljena s amplitudom tlaka upadnog vala poznata je kao koeficijent refleksije (r). Omjer apsorbirane i upadne zvučne energije definira se kao koeficijent apsorpcije (α).

Nadalje, apsorpcijski materijali mogu se podijeliti u različite klase apsorpcije zvuka (tablica 9). Vrijednosti veće od 0,90, pod oznakom koeficijenta apsorpcije, pripadaju klasi apsorbera zvuka A, a vrijednosti koeficijenta između 0,15 i 0,25 pripadaju klasi E. Veći koeficijent apsorpcije znači da se više zvučne energije apsorbira u materijalu.

Tablica 9. Klase apsorpcije zvuka (Egger acoustic katalog, 2016)

Klasa apsorpcije zvuka	Koeficijent apsorpcije (α)
A	0,90-1,00
B	0,80-0,85
C	0,60-0,75
D	0,30-0,55
E	0,15-0,25
Nije klasificirano	0,00-0,10

Akustičke osobine apsorpcijskih materijala mogu se opisati i akustičkom impedancijom. No matematička obrada problema u akustici prostorija uz pomoć akustičke impedancije vrlo je složena pa za normalnu praksu nije prihvatljiva. U praktičnoj graditeljskoj akustici susreću se tri vrste apsorpcijskih materijala i elemenata (slika 11): a) porozni b) membranski c) rezonatorski (Jelaković, 1978).



Slika 11. Prikaz apsorbera (Jelaković, 1978)

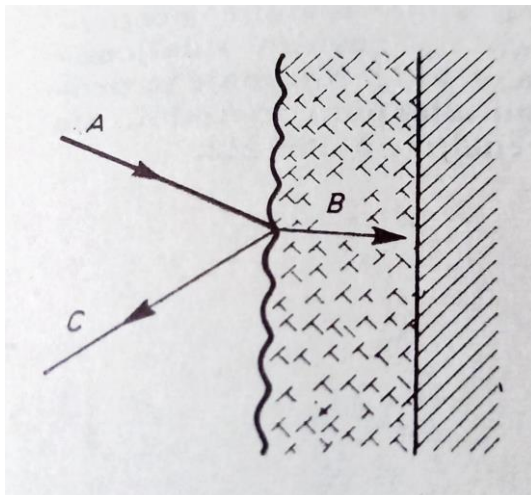
3.3.1.1 Porozni apsorberi

Tekstil od vune, pamuka i svile, kao i predmeti od biljnih vlakana kao i mineralna vuna, strugotine od drva, staklena vuna, itd. uobičajeni su primjeri poroznih apsorpcijskih materijala. U njima se zvuk apsorbira na način da uzrokuje vibriranje zraka unutar pora. To uzrokuje trenje između zraka i stijenki pora pa se zvučna energija "poništi", odnosno pretvori u toplinu. Prijenos topline između stijenki materijala i zagrijanog komprimiranog ili ohlađenog razrijeđenog zraka uzrokuje njegovo nestajanje u porama.

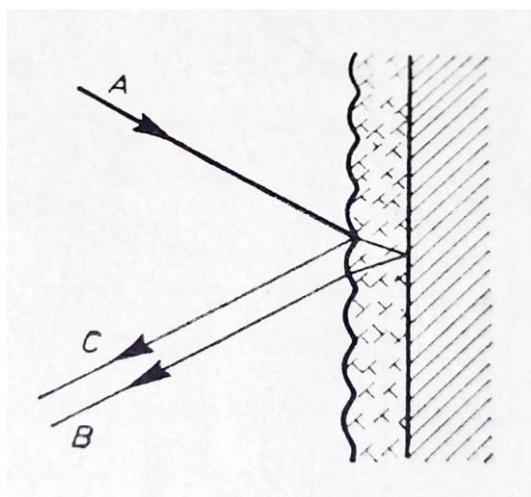
Jelaković (1978) navodi kako koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisi o:

1. debljini sloja;
2. frekvenciji;
3. otporu strujanju;
4. poroznosti;
5. faktoru strukture.

Cjelokupna zvučna energija koja prožima deblji porozni sloj (slika 12) apsorbira se i transformira u toplinu. Koeficijent apsorpcije je smanjen ako je sloj tanak (slika 13) jer se dio zvučne energije koja putuje kroz sloj reflektira od tvrde stijene.



Slika 12. Prikaz debljeg sloja poroznog apsorbera (Jelaković, 1978)



Slika 13. Prikaz tanjeg sloja poroznog apsorbera (Jelaković, 1978)

3.3.1.1.1 Mineralna vuna

Mineralna vuna je dobar toplinski izolator s koeficijentom toplinske vodljivosti k između 0,035 i 0,045 W/mK, što je uvrštava među najbolje toplinske izolatore. To je izolacijski materijal mineralnog porijekla za toplinsku, zvučnu i protupožarnu izolaciju u građevinarstvu, industriji i brodogradnji. Mineralna vuna ima visoku otpornost na požar, paropropusna je i djelomično voodotporna. Otporna je na starenje i raspadanje, te na mikroorganizme i kukce. Koristi se u svim vanjskim konstrukcijama za toplinsku zaštitu, te u pregradnim zidovima za zvučnu zaštitu. Jedino mjesto gdje se ne preporuča je za izolaciju podrumskih zidova pod zemljom (Wikipedija, prema: priručnik Energetska učinkovitost u zgradarstvu 2007, HEP toplinarstvo d.o.o.)

Gustoća ove vune se kreće između 40-50 i 200-300 kg/m³, a ovisi o stupnju zbijenosti. Priprema se (pakira) u rastresitom stanju, u užetima, u vidu filca, jastuka (u rolama, na mekoj podlozi ili jednostavno proširenih na pergamentu) i u obliku polutvrdih ploča uz dodatak veziva, fenolnih smola. Ove su ploče zbog tih smola otporne samo do temperatura od 250 °C. Inače neobrađena vuna podnosi temperature do 800 °C. Mineralna je vuna, u bilo kojem vidu, premekana za direktnu podlogu hidroizolaciji. Ako se ugrađuje u vertikalnom položaju, mora se osigurati pridržavanje (osim za ploče) (Wikipedija, prema: članak Svrha i vrste toplinske izolacije 2011, Poticanje energetske efikasnosti u Hrvatskoj)

Mineralna vuna se dijeli na kamenu i staklenu vunu. Razlika je u sirovini od koje se dobiva. Vlakna staklene vune su elastičnija i za oko 10 puta duža od kamene vune. U akustici, kao porozni apsorber zvuka, najčešće se koristi kamena vuna (slika 14) te će se za nju dati karakteristike:

- a) kratka vlakna;
- b) veće gustoće proizvoda od 30 do 200 kg/ m³;
- c) visoka čvrstoća na tlak;
- d) koeficijent toplinske vodljivosti k u granicama od 0,035 do 0,039 W/mK;
- e) odlično upija zvučnu energiju;
- f) negoriv materijal, klasa negorivosti A1;
- g) maksimalna radna temperatura 750 °C;
- h) veća otpornost na požar;
- i) visoka temperatura taljenja, preko 1000 °C;
- j) niža elastičnost materijala;
- k) niska zatezna čvrstoća;
- l) veoma otporna na mehanička oštećenja prilikom rukovanja (Wikipedija, prema: članak Svojstva kamene vune 2011, Rockwool).



Slika 14. Kamena vuna

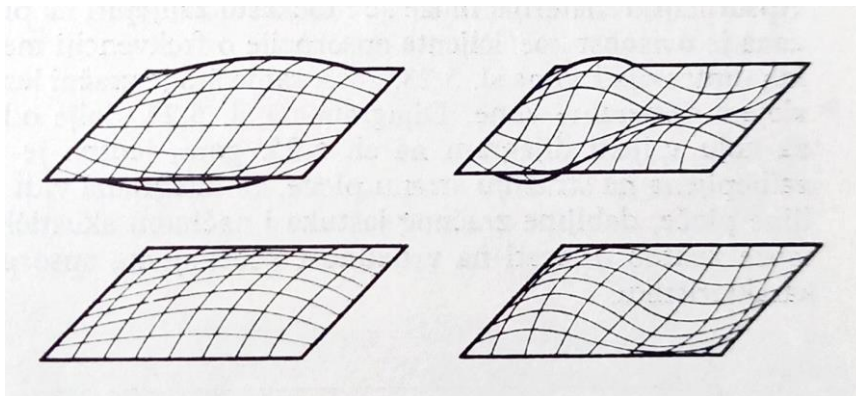
Izvor: <https://krov.rs/koja-je-razlika-između-kamene-i-staklene-vune/> (Preuzeto 20.04.2023)

3.3.1.2 Membranski apsorberi

Princip izvođenja membranskih apsorbera kroz godine je ostao isti, jedino se izbor materijala proširio. Najprije se na zid postavi rešetka od drvenih letvi ili metalnih nosača (slika 15), a na iste se pričvrsti tanka ploča. Apsorpcija nastaje tako da zvučni val udari u dio ploče koji pokriva pojedino polje rešetke i na taj način, pod djelovanjem zvučnih valova, ploča titra, te se tako „troši“ energija zvuka. Na koje sve načine ploča može titrati prikazano je na slici 16.



Slika 15. Membranski apsorber sa metalnim nosačima (Egger acoustic katalog 2016)



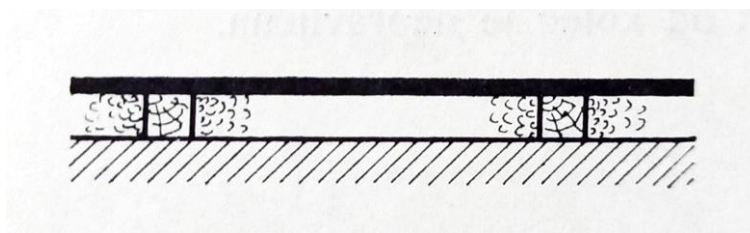
Slika 16. Nekoliko načina titranja ploče (Jelaković, 1978)

Osim spomenutog načina izvođenja, koeficijent apsorpcije može se povećati ukoliko se u prostor zračnog jastuka stavi neki porozni materijal, poput mineralne vune (slika 17).



Slika 17. Mineralna vuna u prostoru zračnog jastuka (Egger acoustic katalog, 2016)

Pri tome nije nužno da taj isti materijal ispuni cijeli prostor, već može biti postavljen samo uz okvir ili se točkasto zalijepiti na ploču (slika 18) (Jelaković, 1978).



Slika 18. Porozni materijal točkasto postavljen na ploču (Jelaković, 1978)

Dakle, vrijednost koeficijenta apsorpcije membranskog apsorbera uvelike ovisi o načinu izvođenja, odnosno debljini ploče, debljini zračnog jastuka, te akustičkoj obradi prostora iza ploče.

3.4 AKUSTIKA DRVA

Masivno drvo i neki kompoziti na bazi drva mogu doći u obzir kao akustični materijali zbog njihove sposobnosti da apsorbiraju značajnu količinu upadnog zvuka kako bi se smanjila razina zvučnog tlaka ili vrijeme odjeka u sobi.

Kako će se u ovom radu ispitivati masivno drvo hrastovine, bukovine i jelovine, u nastavku će se predložiti akustična svojstva istih te ostale potrebne vrijednosti u svrhu boljeg razumijevanja.

3.4.1 Akustična svojstva drva

Drvo je nezamjenjiv materijal za izradu glazbenih instrumenata i prilikom postizanja akustičkih efekata. U koncertnim dvoranama i drugim prostorijama gdje je potrebno postići ugodnu akustiku prostora, drvene zidne obloge osiguravaju dobra akustička svojstva. Drvom i drvnim pločama postiže se dobra izolacija od zvuka. Brzina širenja zvuka, u ovom slučaju u drvu, određuje se prema formuli:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (m/s) \quad (6)$$

gdje je E modul elastičnosti drva čija je mjerna jedinica N/mm², a ρ₀ oznaka za gustoću drva u apsolutno suhom stanju (g/cm³).

Nadalje, valovi zvuka u drvu se šire 10 do 15 puta brže nego u zraku. Brzina širenja zvuka u smjeru vlaknaca za izabrane vrste drva prikazana je u tablici 10:

Tablica 10. Brzina širenja zvuka u drvu (Sinković i Sedlar)

Vrsta drva	Srednja gustoća drva (g/ cm ³)	Brzina zvuka u smjeru vlaknaca (m/s)
Bukovina	0,70	3412
Hrastovina	0,65	3381-4310
Jelovina	0,40	5256

Brzina širenja zvuka ovisi o modulu elastičnosti i volumnoj masi drva (gustoći). Što je veći modul elastičnosti to je brzina zvuka veća, a što je veća gustoća drva brzina zvuka je manja.

Kako bi se prikazali točniji rezultati, u tablici 11 dane su vrijednosti izračuna srednje brzine širenja zvuka na temelju gustoće i modula elastičnosti.

Tablica 11. Srednja brzina širenja zvuka u odabranim vrstama drva (Sinković i Sedlar)

Vrsta drva	Gustoća drva (kg/m ³)	Modul elastičnosti u smjeru vlaknaca (N/cm ²)	Modul elastičnosti okomito na vlaknaca (N/cm ²)	Brzina zvuka u smjeru vlaknaca (m/s)	Brzina zvuka okomito na vlaknaca (m/s)	Odnos brzine zvuka u smjeru i okomito na vlaknaca
Bukovina	730	160 000	15000	4669	1430	3,27
Hrastovina	690	130 000	10000	4300	1193	3,60
Jelovina	450	110 000	4900	4895	1033	4,74

Odnos brzine zvuka u smjeru i okomito na žicu drva izračunava se prema formuli:

$$\frac{c_{\parallel}}{c_{\perp}} = \sqrt{\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}} \quad (7)$$

c - brzina zvuka (m/s)

E - modul elastičnosti (N/cm²)

\parallel - paralelno sa smjerom žice drva

\perp - okomito na smjer žice drva

Vlaga utječe negativno na brzinu zvuka jer se njezinim povećanjem smanjuje modul elastičnosti, a povećava gustoća. Ukoliko raste gustoća, u određenom odnosu raste i modul elastičnosti.

Brzina zvuka ovisi o smjeru rasprostiranja. U nastavku su dane vrijednosti brzine zvuka za bukovinu i smrekovinu* u longitudinalnom, radijalnom i tangენტnom smjeru (tablica 12).

Tablica 12. Vrijednosti brzine zvuka u različitim smjerovima (Sinković i Sedlar)

Vrsta drva	Brzina zvuka (m/s)			Relativna brzina zvuka		
	long	rad	Tan	long	rad	tan
Bukovina	4929	1996	1455	100	40	30
Smrekovina	4780	1681	1455	100	35	27

*U drvnoj tehnologiji, za smrekovinu i jelovinu vrijede isti parametri radi velike sličnosti u fizikalno-mehaničkim svojstvima

gdje je najveća je brzina zvuka u smjeru vlakana (longitudinalno) znatno manja u radijalnom smjeru, a najmanja u tangencijalnom smjeru.

Brzina zvuka ovisi i o pravilnosti građe drva. Veća pravilnost građe, znači veća brzina zvuka i suprotno, manja pravilnost građe smanjuje brzinu zvuka unutar drva. Smola i masne tvari u drvu smanjuju brzinu zvuka, jer ne titraju jednako kao drvo.

U poglavlju 3.2.7 pisalo se o akustičnom otporu. Otpor zvuka nekog elastičnog medija može se izračunati prema formuli:

$$w = \rho_0 * c \quad (8)$$

gdje je (w) otpor zvuka, (ρ_0) gustoća, a (c) brzina zvuka. Radi usporedbe, u tablici 13 dane su vrijednosti otpora zvuka u različitim medijima.

Tablica 13. Vrijednost otpora zvuka u različitim medijima (Sinković i Sedlar)

Materijal	Čelik	Željezo	Jelovina	Bukovina	Voda	Zrak
Otpor zvuka (N/cm ³)	395	258	20	22	14	0,004

Prigušenje zvuka nastaje djelomično zbog unutarnjeg trenja, a djelomično zbog radijacije zvuka. Drvo, ovisno o vrsti i debljini, ima relativno veliku sposobnost prigušenja zvuka uslijed unutarnjeg trenja, te isto tako veliku sposobnost prigušenja zvuka uslijed prijenosa energije.

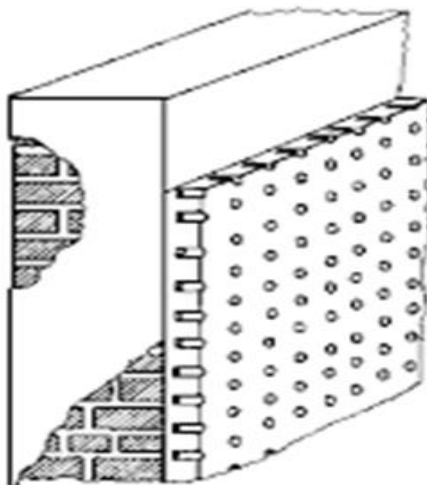
Drvo kao izolacijski materijal apsorbira zvuk i smanjuje refleksiju. Zbog toga se često upotrebljava za izolaciju prostorija u obliku opločenja zidova građenih od betona ili opeke.

3.4.2 Akustične ploče

Akustički učinkovite površine namještaja mogu se uklopiti u cjelokupni koncept prostorne akustike korištenjem dekora i kombinacijom više materijala. Akustički učinkovite komponente namještaja pružaju dodatne mogućnosti za uključivanje dovoljno površina koje apsorbiraju zvuk u planove kada dizajn i strukturno-fizički kriteriji čine realizaciju konvencionalnih rješenja izazovnijim (Egger acoustic katalog, 2016).

Postoji mnogo osnovnih ploča, površina i perforacija koje se mogu iskoristiti za zamjenu trenutnih vrata i ploča s akustički učinkovitim namještajem. Primjer takvih akustičnih ploča danas su sve više prepoznatljive kao potrebne.

Jelaković (1978) navodi kako su akustične ploče najrašireniji akustični materijal te se primjenjuju svugdje gdje je potrebno prigušiti buku i smanjiti odjek. Jedan od klasičnih primjera akustičnih ploča možemo vidjeti na slici 19. Takve ploče imaju provrte promjera 4 mm sa razmakom između njih oko 15 mm, tako da na kvadratni metar dolazi više od 4000 rupa. Izrađuju se i s utorima (slika 23). Razlika između tih ploča je u primjeni i materijalu. Akustične ploče s provrtima imaju unutarnju ispunu od ploča od usitnjenog drva ili papirnog saća radi čega se ove ploče i mogu upotrebljavati na stropovima i kao prednje strane namještaja radi svoje male mase (gustoće). Ploče s utorima izrađuju se od ploča vlaknatica (MDF-a), a primjenjuju se isključivo na bočnim zidovima.



Slika 19. Akustične ploče s provrtima (Jelaković, 1978)

Treba napomenuti kako površinska obrada ima vrlo važnu ulogu, naime ukoliko površinski zaštitni sloj bude od uljanih boja, to će utjecati vrlo nepovoljno jer uljana boja stvara homogen sloj, time začepljuje pore i onemogućuje prolazak zvuka, odnosno apsorpciju mehaničkih valova u i kroz materijal te se zvuk reflektira od površine i povećava se odjek.

Slijedi presjek akustične ploče s provrtima (slika 20). Prednja strana akustične ploče je od dekorativnog laminata iza kojeg se nalazi akustična membrana. Središnja ispuna akustične ploče sastoji se od ploče od usitnjenog drva debljine 18 mm na kojoj su izbušeni provrti. Nakon toga ponovno se stavlja akustična membrana, a sa stražnje strane nalazi se akustična podloga od laminata. Ove ploče najčešće se primjenjuju na zidovima i stropovima.



Slika 20. Egger akustična ploča (Egger acoustic katalog, 2016)

1. Dekorativni laminat, 2. Akustična membrana, 3. Ploča iverica s provrtima, 4. Akustična membrana, 5. Akustična podloga od laminata s provrtima

Slika 21 prikazuje primjer uredskog namještaja gdje se pomoću akustičnih pročelja uspješno apsorbirao zvuk u prostoriji te postigla ugodna prostorna akustika. Rupe su promjera 0,5 mm, a na kvadratnom metru ima više od 300 000 rupa.



Slika 21. Akustično pročelje ormara (Egger acoustic katalog, 2016)

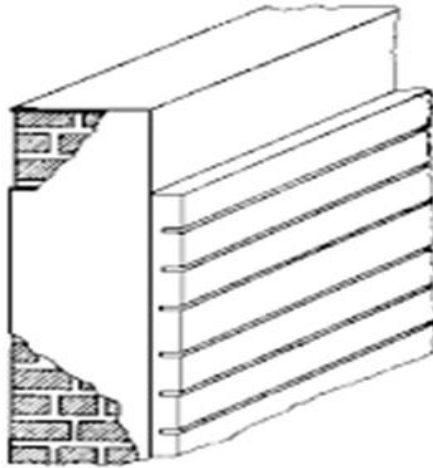
Detalniji presjek akustičnog pročelja ormara prikazat će se na slici 22.



Slika 22. Egger akustična ploča s provrtima (Egger acoustic katalog, 2016)

1. Dekorativna ploča iverica s provrtima, 2. Akustična membrana

Akustične ploče s utorima (slika 23) izrađene su od ploča vlaknatica (MDF), a primjenjuju se isključivo na bočnim zidovima u obliku zidnih obloga radi njihove mase. Na prednjoj strani urezani su utori dubine 2 mm, te izbušeni provrti. Utori služe za ulazak zvuka u ploču, dok se u provrtima zvuk „gubi“ i „raspršuje“, a akustična membrana apsorbira ostatak zvuka (slika 24).



Slika 23. Akustične ploče s utorima (Jelaković, 1978)

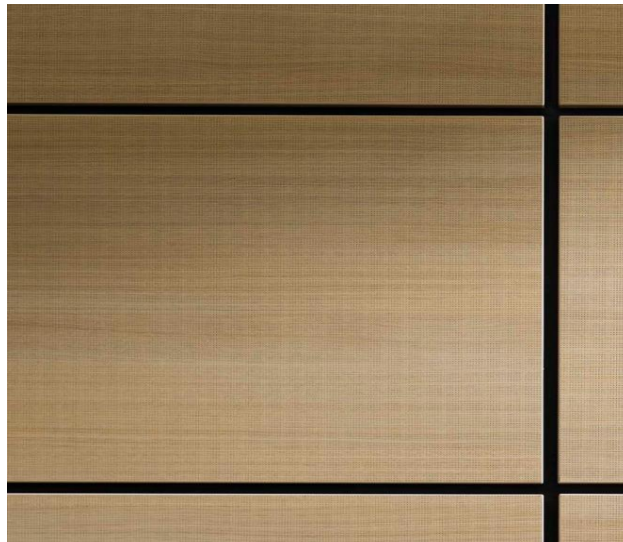


Slika 24. Egger akustična ploča s provrtima (Egger acoustic katalog, 2016)

1. Dekorativni MDF s utorima, 2. Akustična membrana

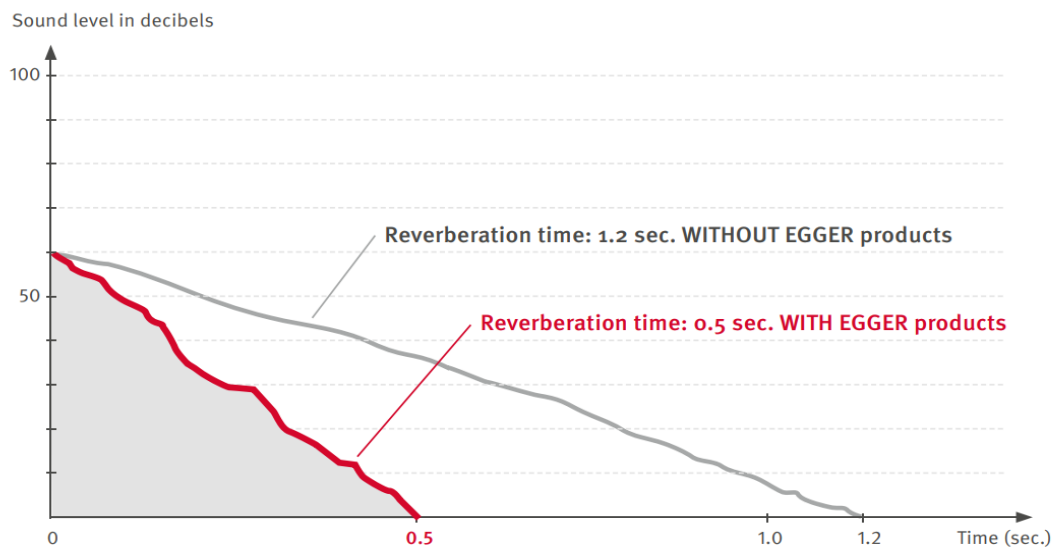
Akustične ploče prikladne su isključivo za unutarnju uporabu. Unutarnje primjene definirane su prema sadržaju vlage u materijalu koji odgovara, a temperatura od 20 °C i relativna vlažnost okoline koja prelazi 65 % tijekom samo nekoliko tjedana u godini.

Prije ugradnje akustičnih elemenata važno je osigurati da je struktura osušena, tj. visoka vlažnost uzrokovana ugradnjom betonskog poda ili žbukanjem mora biti svedena na minimum. Perforacije ili prorezi mogu značajno povećati površinu ploče, tako da promjena u relativnoj vlazi i klima mogu rezultirati promjenama dimenzija ili savijanje. Slika 25 prikazuje primjer akustičnih zidnih obloga.



Slika 25. Akustične zidne obloge (Egger acoustic katalog, 2016)

Na slici 26 prikazano je smanjenje vremena odjeka pomoću akustičnih ploča pravilno postavljenih unutar uredske prostorije prema normi (HRN DIN 18041:2012). Siva crta u dijagramu pokazuje da vrijeme odjeka u uredskoj prostoriji bez akustičnih ploča iznosi 1,2 sekunde, a crvena crta prikazuje vrijeme odjeka sa akustičnim pločama, koje iznosi 0,5 sekundi.



Slika 26. Vrijeme odjeka u prostoriji sa i bez akustičnih ploča (Egger acoustic katalog 2016)

Time (sec.) – vrijeme (sek.)

Sound level in decibels – glasnoća zvuka u decibelima

Reverberation time: 1,2 sec WITHOUT EGGER products – vrijeme odjeka: 1,2 sek. BEZ EGGER proizvoda

Reverberation time: 0,5 sec WITH EGGER products – vrijeme odjeka: 1,2 sek. SA EGGER proizvodom

Iz slike je vidljivo kako je vrijeme odjeka u uredskom prostoru smanjeno za 0,7 sekundi, time iznosi 0,5 sekundi što se po tablici 7, iz poglavlja 3.2.8 Vrijeme odjeka, svrstava u donju granicu vremena odjeka za uredske prostore.

4. MATERIJALI I METODE

Drvni materijali koji će se koristiti u ovom ispitivanju su uzorci od hrastovine, bukovine i jelovine. Osim njih, ispitivat će se i uzorci od ploča vlaknatica (Medium Density Fiberboard), ploča s orijentiranim iverjem (Oriented strand board) te saćaste ploče obložene tankim pločama iverice (Honeycomb board). Masivno drvo je korišteno sa komercijalnog skladišta pa nije poznato porijeklo sirovine, dok su pločasti materijali proizvodi poduzeća Egger Austrija.

Uzorci su glodani na CNC stroju proizvođača Homag (slika 27), za svaku vrstu u dvije različite dimenzije promjera 100 i 30 mm. Debljina uzoraka od cjelovitog drva bila je ista, dok se kod drvnih kompozita debljina uzorka razlikuje. Uz to, kao apsorber, koristila se mineralna (kamena) vuna koja je također pripremljena na dvije dimenzije promjera kao i drvni uzorci. Debljina kamene vune bila je 20 i 50 mm. Nakon što su uzorci pripremljeni slijedi ispitivanje pomoću kojeg će se odrediti koeficijent apsorpcije zvuka.



Slika 27. Prikaz CNC stroja

4.1 Materijali

Prilikom ispitivanja niskih frekvencija ispitivat će se uzorci promjera 100 mm. Za ispitivanje visokih frekvencija ispituju se uzorci promjera 30 mm. Svi uzorci su kondicionirani u laboratorijskim uvjetima ($T = 23 \pm 2$ °C, $\varphi = 55 \pm 5\%$) preko 90 dana. Ti uzorci (slika 28) korišteni su kao akustična pročelja namještaja ili zidnih obloga, a iza njih bit će apsorberi od kamene vune i na taj način dobivena je simulacija akustičnih ploča. Uzorak saćaste ploče od 30 mm za visoke frekvencije neće biti ispitan radi nedovoljne čvrstoće uzorka te puknuća istog prilikom CNC obrade.

Drvni materijali koji se koriste prilikom ovog ispitivanja su masivno drvo bukovine i jelovine te dužinsko-širinski slijepjeni elementi hrastovine. Karakteristike navedenog materijala prikazane su u tablicama 10 i 11. Debljina uzorka je 20 mm, promjer 100 mm i 30

mm. Ispitivat će se i pločasti materijali, a njihove karakteristike dane su u nastavku. Debljina tih uzoraka je različita i za ploču vlaknaticu iznosi 19 mm, ploču s orijentiranim iverjem 27 mm, a saćastu ploču obloženu ivericom 38 mm.

Ploče vlaknatice (MDF) - su ploče od drvenih ili drugih lignoceluloznih vlakana koje su proizvedene isprepletanjem vlakana u traku (tepih) i ugušćene valjcima ili pločastim prešama. Vezivna sredstva i drugi dodaci mogu se dodavati tijekom proizvodnje radi poboljšavanja nekih karakteristika. MDF ploče vlaknatice imaju gustoću $>450 \text{ kg/m}^3$, a tijekom proizvodnog ciklusa imale su sadržaj vode uvijek ispod 20 %. Pripadaju kategoriji ploča S2S (ploče s oba glatka lica) (Jambreković, 2004).

Ploča s orijentiranim iverjem (OSB) - troslojna je ploča iverica proizvedena iz orijentiranog strand iverja kod koje su vlakanca iverja vanjskih slojeva usmjerena po duljini OSB ploče, a vlakanca iverja srednjega sloja po širini ploče, odnosno približno okomito (kao listovi furnira kod troslojnih furnirskih ploča) (Jambreković, 2004).

Saćasta ploča obložena ivericom (Honeycomb board) - vanjski slojevi se sastoje od ploče iverice debljine 8 mm. Heksagonalna saćasta jezgra lijepi se pomoću poliuretanskog ljepila bez formaldehida, a izrađena je od 100 % recikliranog papira. Debljina ploča je 38 mm, a gustoća 330 kg/m^3 . Imaju malu težinu, no veliku krutost na savijanje te temperaturnu otpornost do $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (Egger katalog: lake saćaste ploče)



Slika 28. Prikaz obrađenih uzoraka prije ispitivanja

4.2 Metode ispitivanja uzoraka

Prilikom ispitivanja koeficijenta apsorpcije cijevnom metodom dolazilo je do odstupanja vrijednosti rezultata. To se prepisuje nedovoljnom prijanjanju uzorka u cijevi prilikom ispitivanja. Obzirom da su apsorberi kamene vune elastični, greška koja je također mogla nastati prilikom guranja poluge u cijev je nepoznata udaljenost uzorka sa apsorberom od mikrofona, stoga se pretpostavlja odstupanje od $\pm 5 \text{ mm}$. Treba još uzeti u obzir ručno

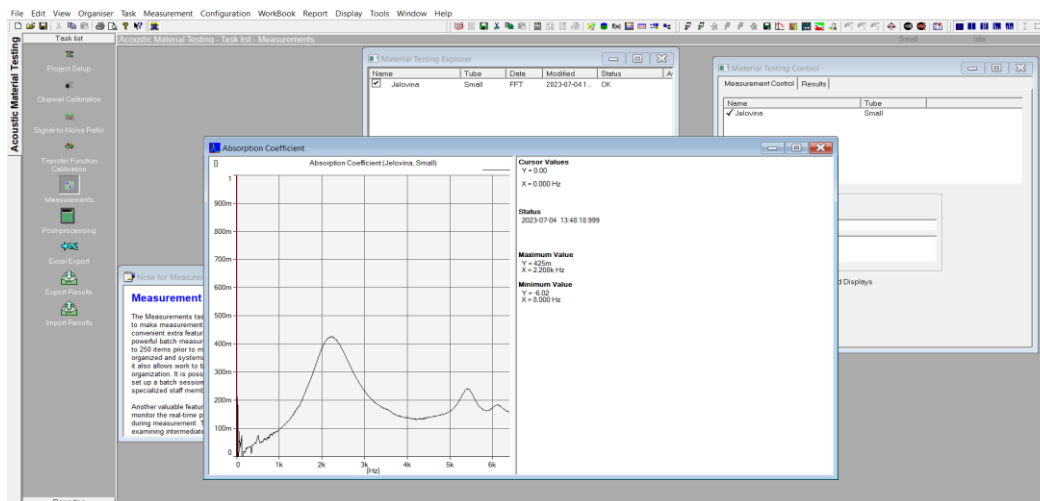
brušenje uzoraka nakon CNC obrade radi kojeg mogu nastati greške kod namještanja uzoraka u cijevi i time odstupanja od stvarnih rezultata. Uspoređujući rezultate treba napomenuti kako su uzorci od pločastih materijala različitih debljina (OSB=27 mm, HCB=38 mm, MDF=19 mm) u odnosu na uzorke od cjelovitog drva (20 mm) što može utjecati na zaključak ispitivanja.

Oprema od proizvođača Brüel & Kjær se sastoji od kompleta cijevi koje su opremljene mikrofonima i izvorima zvuka (slika 29). Pomoću ove opreme moguće je izvesti brza ispitivanja materijala u istim laboratorijskim uvjetima. Za izvođenje mjerenja uzorci se umeću u cijev. Zvučnik u cijevi zatim emitira precizno kvantificirani zvuk, a mikrofoni mjere razinu zvučnog tlaka na određenim mjestima cijelom dužinom cijevi. Pomoću softvera PULSE izračunavaju se akustična svojstva materijala na temelju funkcija frekvencijskog odziva izmjerenih između različitih mjernih mjesta. Pomoću ove opreme određuje se koeficijent apsorpcije zvuka i površinska impedancija, te izvođenje mjerenja i izračuna u skladu s ISO 10534-2, ASTM E1050 – 12 i gubitak prijenosa ASTM E2611 – 17 (Impedancijski komplet cijevi). Ova metoda je vrlo prikladna u teorijskom radu i pri ispitivanju novih materijala.



Slika 29. Impedancijski komplet cijevi

Uzorci su se postavili u cijev za ispitivanje. Prvo su se zasebno ispitivali drveni uzorci, a nakon njih im je dodan apsorber od kamene vune debljine 20 mm i 50 mm. Za svaku vrstu drva i kompozita na bazi drva ispitan je po jedan uzorak za visoke frekvencije (promjer 30 mm) i niske frekvencije (promjer 100 mm) s različitim debljinama apsorbera. Pomoću programa PULSE obrađeni su rezultati (slika 30).



Slika 30. Program PULSE

Obradeni rezultati iz programa PULSE izvedeni su u obliku tablice u programu MS Excel (slika 31). Grafovi su izrađeni tako da su se označili stupci s rezultatima mjerenja za uzorak od jedne vrste drva, ili pločastog materijala, ispitan bez apsorbera i sa apsorberom jedan i dva, u odnosu na frekventna područja. Os x označavala je frekvenciju u hercima (Hz), a os y koeficijent apsorpcije α . Rezultati su prikazani u obliku 2D linijskih grafova.

	bukovina		hrastovina		Jelovina		MDF		OSB		OSB		OSB		OSB	
Name:	bukovina	bu+izolacija	bu+izolacija	hrastovina	hr+izolacija	Jelovina	Jelovina	Je+izolacija	Je+izolacija	MDF	MDF+izolaci	MDF+izolaci	MDF+izolaci	OSB	OSB+izolaci	OSB+izolaci
TubeType:	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small	Small
Date:	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00	45111.00
Time:	0.64	0.64	0.63	0.64	0.63	0.62	0.58	0.58	0.58	0.64	0.64	0.60	0.64	0.63	0.59	
f (HZ)	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part	Real Part
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	-0.12	0.68	-4.66	-4.60	-1.30	-1.42	-6.02	-4.79	0.89	-2.03	-25.10	-0.33	-0.20	-0.15	0.17	
16.00	0.00	0.51	-0.08	-0.08	0.21	-0.35	0.21	0.45	-0.02	0.09	-0.65	0.44	0.22	0.31	-0.81	
24.00	0.13	0.19	0.03	0.07	0.17	0.05	0.16	0.28	0.21	0.17	0.20	0.38	0.34	0.26	-0.08	
32.00	0.10	0.15	0.09	0.20	0.02	0.10	0.04	0.20	0.13	0.14	0.10	0.18	0.23	0.07	0.20	
40.00	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	-0.10	-0.06	-0.01	0.03	0.00	0.06	0.02	0.09	-0.01	0.09	
48.00	0.05	0.06	0.05	-0.02	0.01	0.02	0.09	-0.02	0.10	0.07	0.11	0.07	0.08	0.09	0.06	
56.00	0.01	0.03	0.08	0.00	-0.01	0.06	0.06	-0.03	0.08	0.02	0.08	0.04	0.08	0.07	0.09	
64.00	-0.03	0.00	0.08	0.04	0.00	0.09	0.05	-0.01	0.09	-0.01	0.06	0.04	0.08	0.07	0.12	
72.00	0.02	0.06	0.10	0.04	0.05	0.15	0.05	0.06	0.12	0.00	0.07	0.04	0.07	0.10	0.13	
80.00	0.01	0.06	0.12	0.02	0.07	0.14	0.03	0.07	0.14	0.01	0.10	0.05	0.05	0.13	0.17	
88.00	0.04	0.06	0.15	0.02	0.09	0.14	0.05	0.07	0.16	0.03	0.13	0.06	0.05	0.12	0.22	
96.00	0.05	0.08	0.16	0.02	0.09	0.14	0.04	0.07	0.18	0.04	0.12	0.07	0.06	0.13	0.24	
104.00	0.05	0.10	0.17	0.03	0.11	0.17	0.06	0.10	0.23	0.07	0.15	0.10	0.08	0.15	0.27	
112.00	0.05	0.11	0.20	0.04	0.13	0.20	0.07	0.12	0.26	0.08	0.17	0.13	0.10	0.19	0.31	
120.00	0.04	0.08	0.20	0.04	0.12	0.22	0.04	0.12	0.26	0.02	0.13	0.11	0.08	0.20	0.29	
128.00	-0.04	0.03	0.13	-0.02	0.06	0.13	-0.07	0.04	0.21	-0.04	0.04	0.02	-0.03	0.12	0.24	
136.00	-0.03	0.04	0.09	-0.04	0.06	0.09	-0.10	0.01	0.25	-0.02	0.01	-0.04	-0.02	0.12	0.25	
144.00	-0.02	0.06	0.14	-0.02	0.08	0.13	-0.01	0.05	0.30	0.00	0.09	0.02	0.01	0.16	0.29	
152.00	-0.02	0.08	0.18	-0.02	0.12	0.19	0.02	0.10	0.33	0.01	0.10	0.05	0.03	0.21	0.34	
160.00	0.00	0.10	0.20	-0.01	0.14	0.20	0.01	0.10	0.36	0.01	0.09	0.05	0.03	0.23	0.36	
168.00	0.01	0.13	0.21	0.00	0.16	0.21	0.02	0.12	0.39	0.03	0.09	0.05	0.04	0.26	0.36	
176.00	0.02	0.15	0.22	0.01	0.18	0.22	0.02	0.14	0.42	0.03	0.10	0.06	0.05	0.29	0.38	
184.00	0.01	0.16	0.24	0.01	0.20	0.23	0.01	0.16	0.44	0.03	0.11	0.06	0.05	0.32	0.39	
192.00	0.01	0.18	0.25	0.01	0.22	0.24	0.01	0.17	0.46	0.04	0.11	0.05	0.05	0.34	0.40	

Slika 31. Dio rezultata u tablici za male uzorke ispitivane u visoko frekventnom području

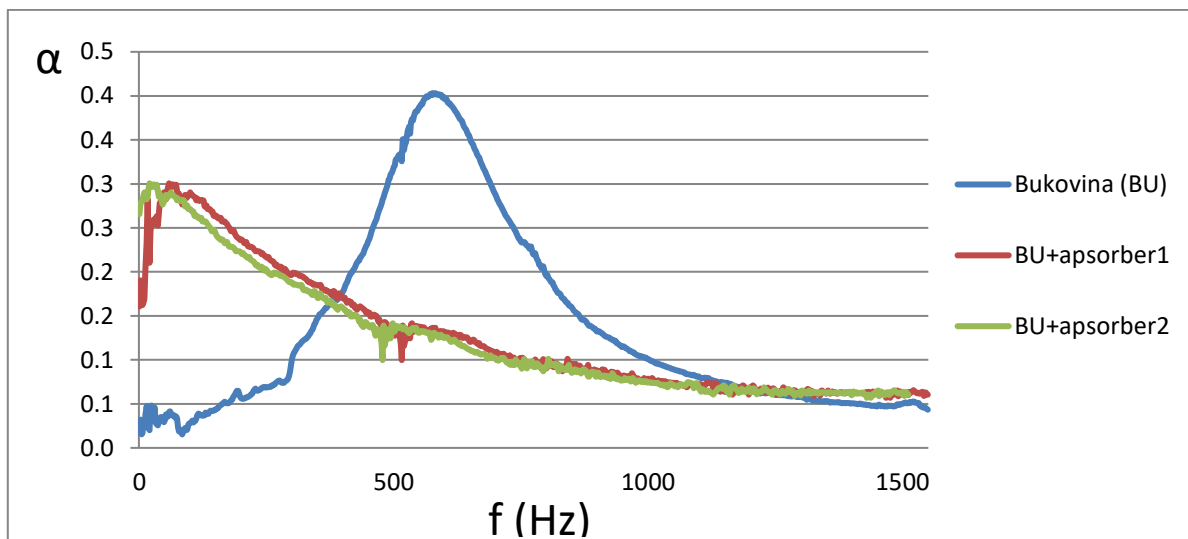
5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1 Analiza niskih frekvencija

Slijedi usporedba dobivenih rezultata pomoću grafova za uzorke ispitivane pri niskim frekvencijama.

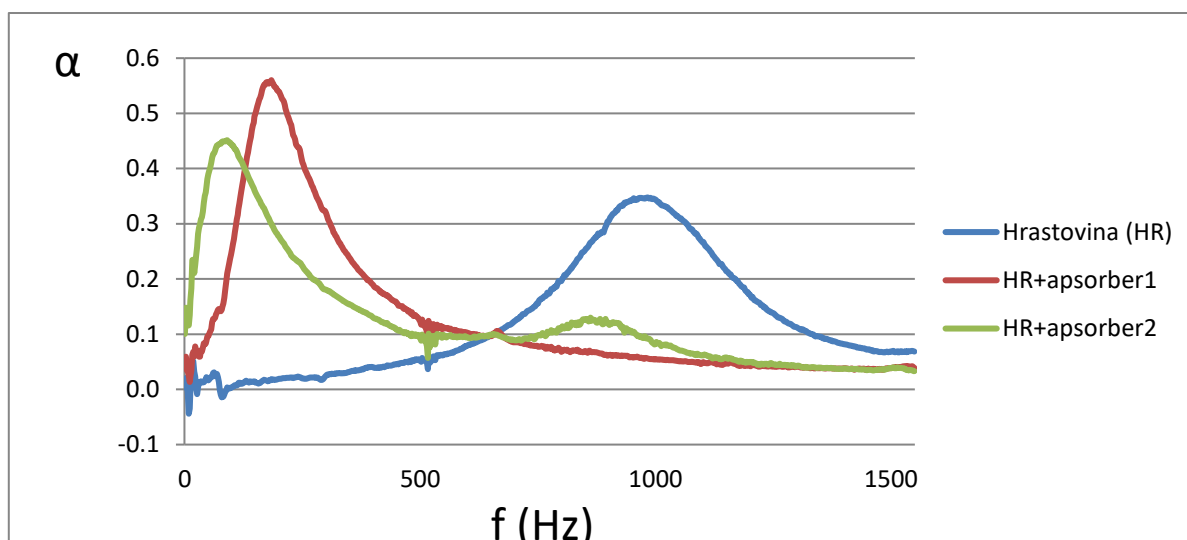
Legenda: α = koeficijent apsorpcije, f = frekvencija, apsorber 1 = kamena vuna 20 mm debljine, apsorber 2 = kamena vuna 50 mm debljine

Iz grafa (slika 32) se uviđa kako u frekventnom području od 560 Hz koeficijent apsorpcije bukovine iznosi 0,4. U frekventnom području od 10 odnosno 31 Hz koeficijent apsorpcije bukovine ispitane sa apsorberom 1 i 2 iznosi 0,29.



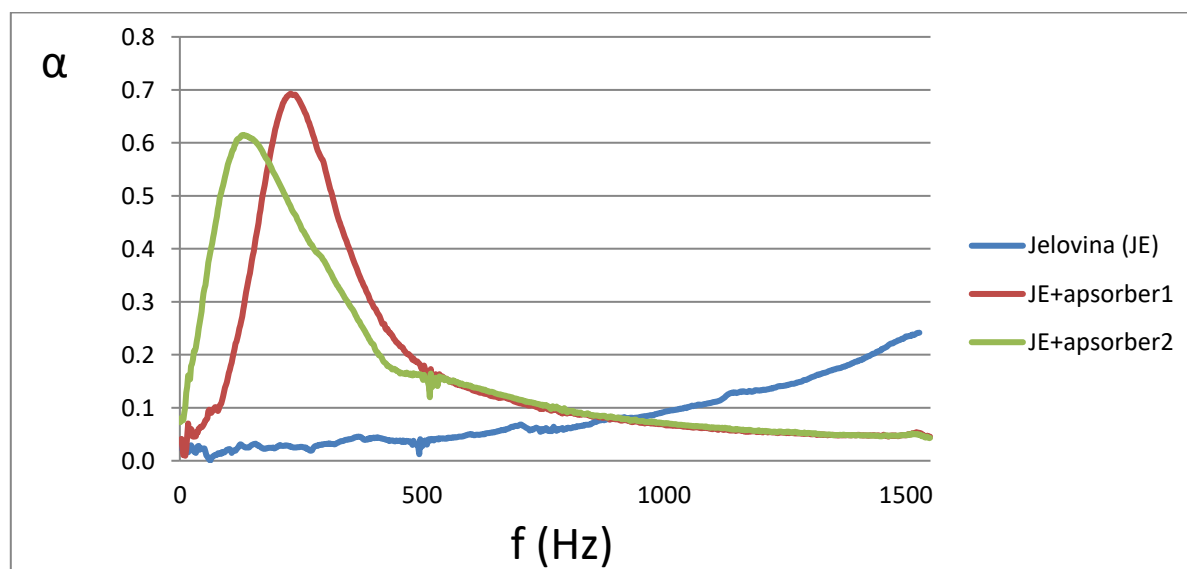
Slika 32. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak bukovine pri niskim frekvencijama

Porastom frekvencije koeficijent apsorpcije hrastovine (slika 33) kontinuirano raste, a u frekventnom području od 956 Hz iznosi 0,34. Iz ispitivanja uzorka hrastovine sa apsorberom 1 i 2 uviđa se kako je zvukoupjnost uzorka najveća te u frekventnom području od 164 Hz koeficijent apsorpcije hrastovine ispitane sa apsorberom 1 iznosi 0,54, a u području od 64 Hz ispitane sa apsorberom 2 iznosi 0,43.



Slika 33. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak hrastovine pri niskim frekvencijama

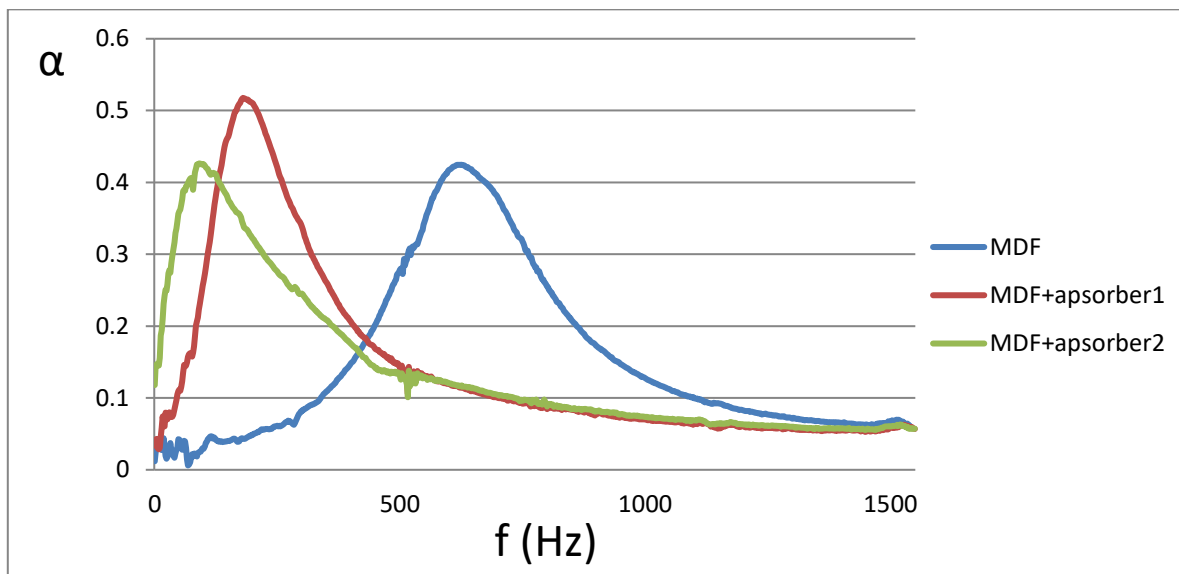
Uzorak jelovine pri niskim frekvencijama (slika 34) ima linearan rast što znači da prelaskom na više frekvencije raste i koeficijent apsorpcije. Najviši koeficijent apsorpcije za jelovinu pri niskim frekvencijama iznosi 0,23 u frekventnom području od 1512 Hz. U frekventnom području od 216 Hz koeficijent apsorpcije jelovine ispitane sa apsorberom 1 iznosi 0,68, dok u frekventnom području od 126 Hz koeficijent apsorpcije jelovine ispitane sa apsorberom 2 iznosi 0,61.



Slika 34. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak jelovine pri niskim frekvencijama

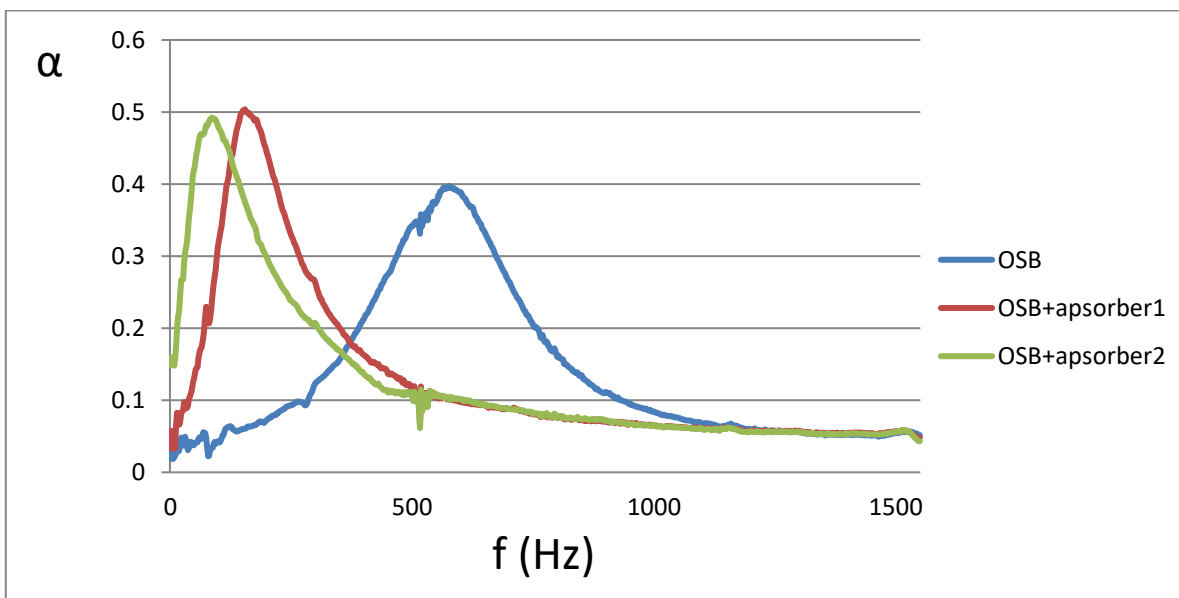
Iz slike 35, u frekventnom području od 606 Hz, proizlazi kako je koeficijent apsorpcije MDF-a 0,42. U frekventnom području od 180 Hz koeficijent apsorpcije MDF-a ispitane sa

apsorberom 1 iznosi 0,52, a u frekventnom području od 90 Hz koeficijent apsorpcije MDF-a ispitan sa apsorberom 2 iznosi 0,42.



Slika 35. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak MDF-a pri niskim frekvencijama

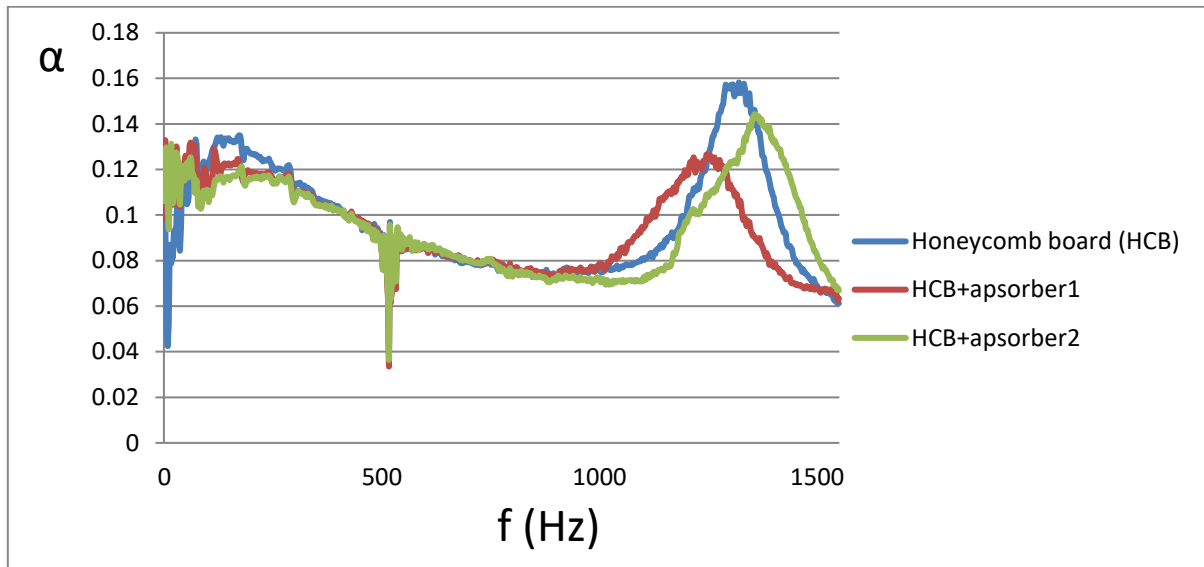
Iz grafa (slika 36) se očituje nagli porast koeficijenta apsorpcije pri povećanju frekvencije, posebno kod ispitivanja sa apsorberima 1 i 2 gdje se vidi kako u frekventnom području od 148 Hz koeficijent apsorpcije OSB-a ispitan sa apsorberom 1 iznosi 0,5, dok kod frekvencija od 76 Hz koeficijent apsorpcije uzorka ispitanog sa apsorberom 2 iznosi 0,48. U frekventnom području od 564 Hz koeficijent apsorpcije OSB-a iznosi 0,39.



Slika 36. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak OSB-a pri niskim frekvencijama

Iz grafa (slika 37) vidljivo je kako porastom frekvencije dolazi do kontinuiranog pada koeficijenta apsorpcije kod sva tri ispitivana uzorka. Nakon 1000 Hz dolazi do naglog porasta gdje su vrijednosti koeficijenta apsorpcije najveće te u frekventnom području od 1300 Hz

koeficijent apsorpcije sačaste ploče iznosi 0,15. Pri 1208 Hz uzorak sačaste ploče sa apsorberom 1 daje najmanju vrijednost koeficijenta apsorpcije od 0,12, dok kod uzorka sa apsorberom 2 na 1346 Hz se dobiva vrijednost od 0,14.

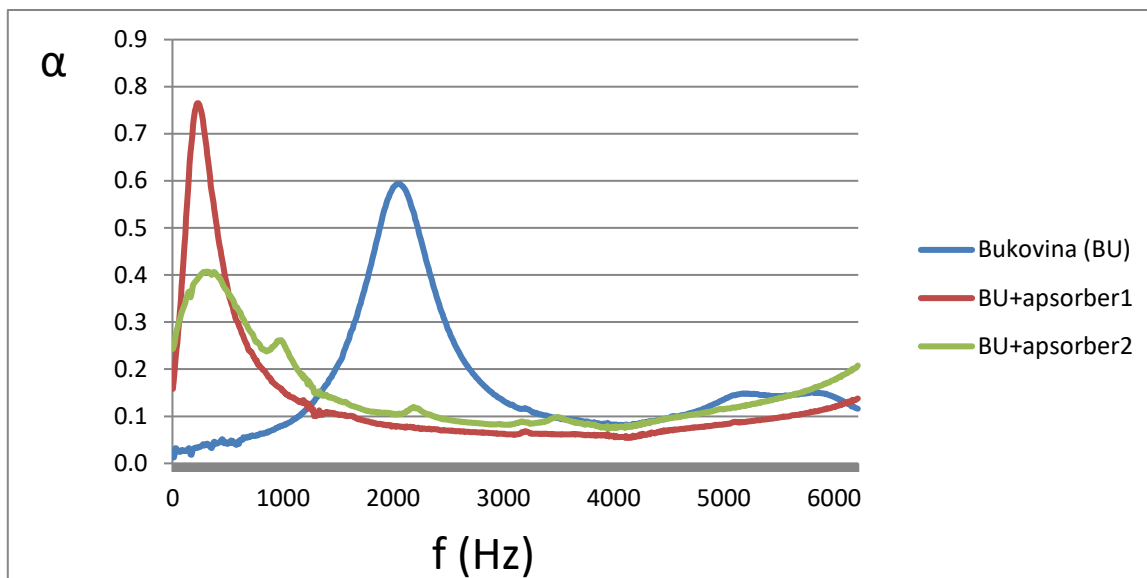


Slika 37. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak HCB pri niskim frekvencijama

5.2 Analiza visokih frekvencija

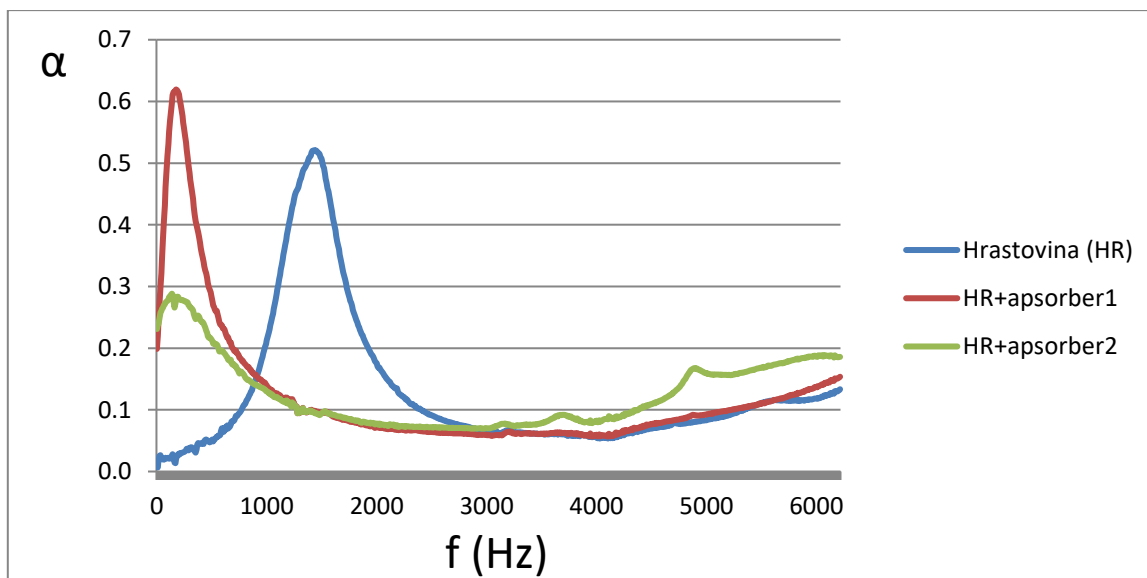
U ovom poglavlju uspoređuju se dobiveni rezultati pomoću grafova za uzorke ispitivane pri visokim frekvencijama.

Iz grafa (slika 38) se vidi kako uzorak ispitivan sa apsorberom 1 ima najveći koeficijent apsorpcije u području od 200 Hz te iznosi 0,76. Uzorak bukovine daje rezultate u obliku Gaussove krivulje te na frekvenciji od 2000 Hz koeficijent apsorpcije iznosi 0,59. Za uzorak ispitivan sa apsorberom 2 najveću zvukoupjnost postiže u frekvencijskom području od 200-300 Hz te iznosi 0,40.



Slika 38. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak bukovine pri visokim frekvencijama

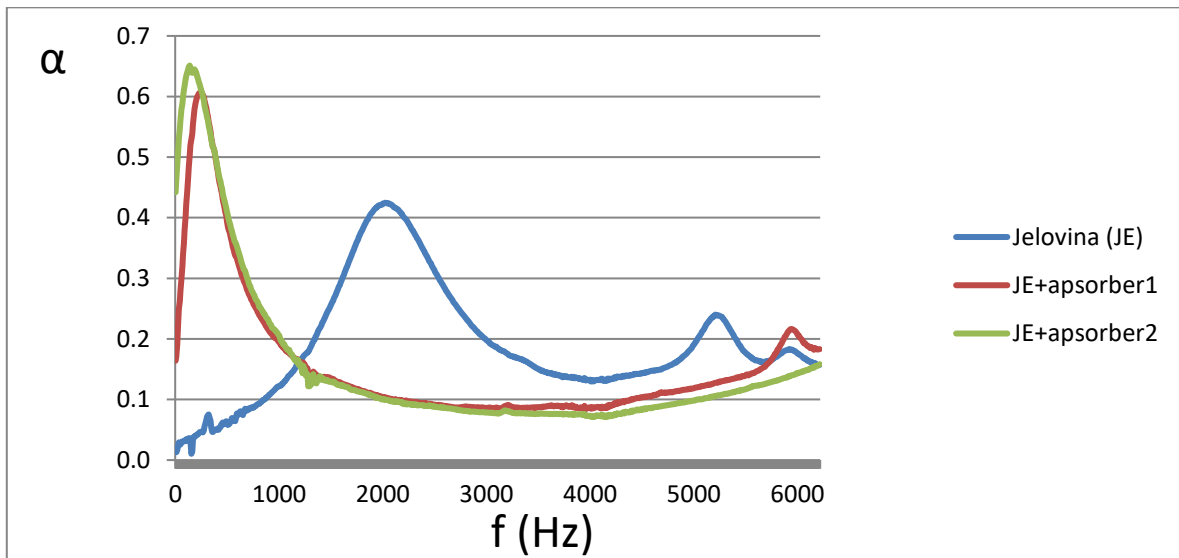
Opis grafa (slika 39) je sličan kao i pri ispitivanju bukovine, s time da je za uzorak hrastovine najveći koeficijent apsorpcije s apsorberom 1 na frekvencijskom području od 144 Hz i iznosi 0,62. Ispitivanja s apsorberom 2 postižu najmanje vrijednosti koeficijenta apsorpcije te iznosi 0,28 u području od 88 Hz, dok uzorak hrastovine bez apsorbera postiže zvukopojnost 0,52 u frekventnom području od 1400 Hz.



Slika 39. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak hrastovine pri visokim frekvencijama

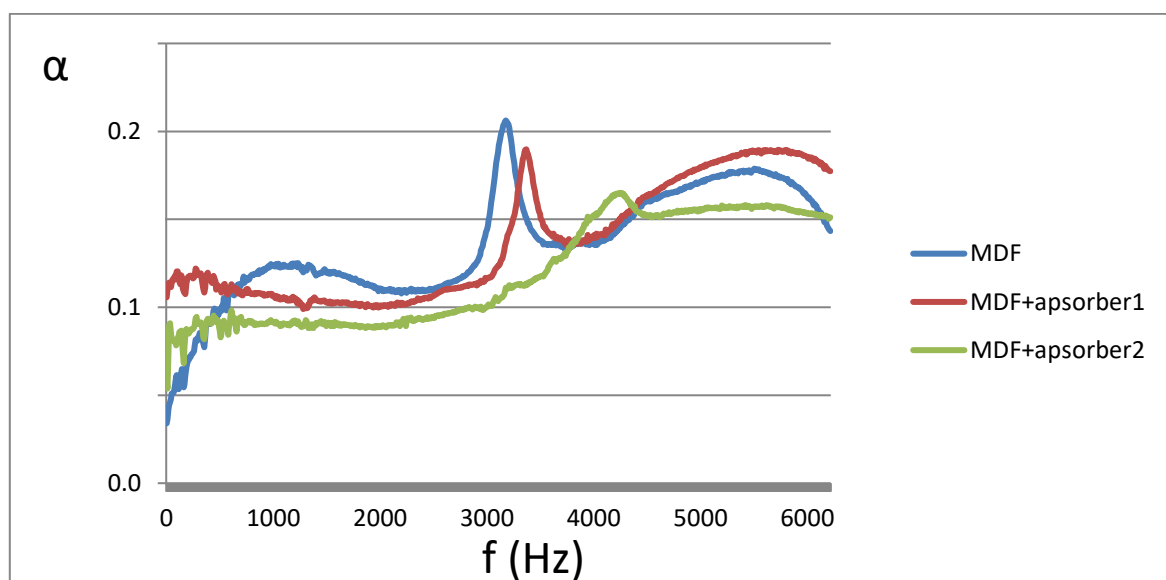
Najveća zvukopojnost pri ispitivanju jelovine pri visokim frekvencijama (slika 40) je sa apsorberima 1 i 2, gdje se za apsorber 2 zabilježava vrijednost od 0,65 pri frekvenciji od

104 Hz, a za apsorber 1 iznosi 0,62 pri frekvenciji od 224 Hz. Koeficijent apsorpcije uzorka jelovine bez apsorbera iznosi 0,42 u frekvencijskom području od 2000 Hz.



Slika 40. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak jelovine pri visokim frekvencijama

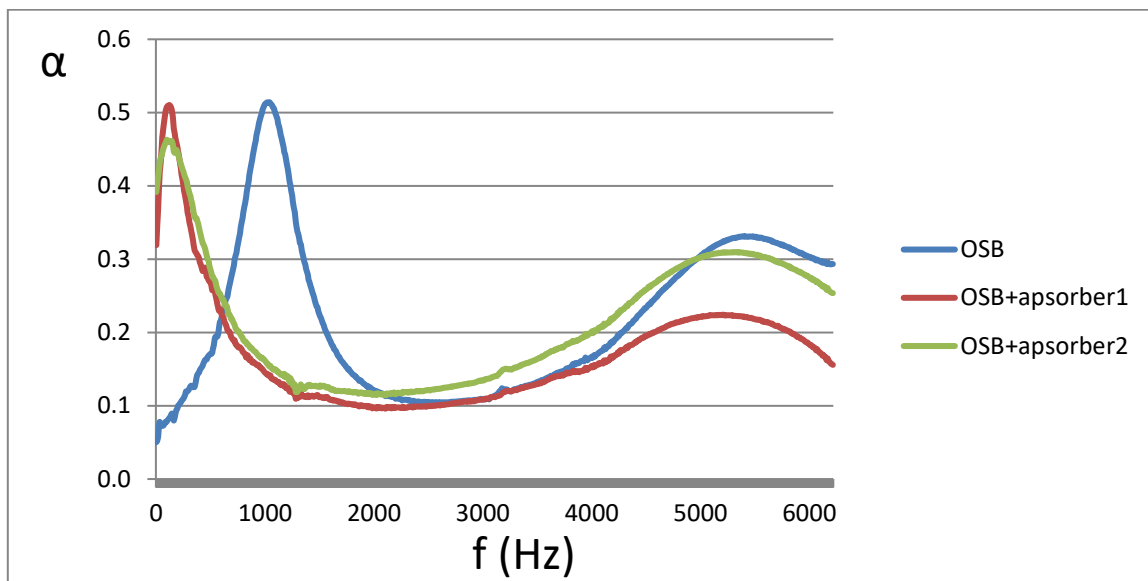
Pri ispitivanju ploče vlaknatice (slika 41) iz grafa je vidljiva diskontinuiranost zvukopojnosti uzorka pri različitim frekvencijama. MDF kao materijal postiže jedne od najmanjih vrijednosti koeficijenta apsorpcije stoga on u frekvencijskom području od 3150 Hz iznosi 0,21. Pri ispitivanju sa apsorberom 1 koeficijent apsorpcije iznosi 0,18 u frekvencijskom području od 3344 Hz. Sa apsorberom 2 zabilježavaju se najmanje vrijednosti i pri frekvenciji od 4200 Hz koeficijent apsorpcije iznosi 0,16.



Slika 41. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak MDF-a pri visokim frekvencijama

Graf (slika 42) prikazuje rezultate ispitivanja u obliku Gaussove krivulje kod sva tri ispitivanja uzorka. Kod uzorka OSB-a na frekvenciji od 1000 Hz te uzorka OSB-a sa

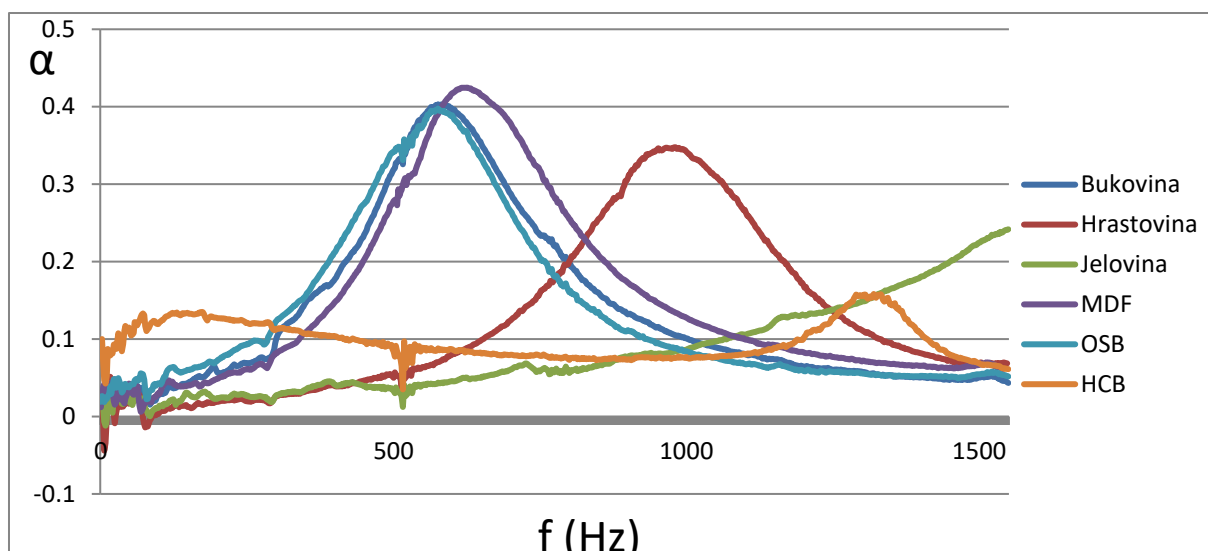
apsorberom 1 na frekvenciji od 100 Hz vrijednost koeficijenta apsorpcije iznosi 0,51. Nakon toga se uočava nagli pad te opet kontinuirani rast zvukoupojnosti. Za uzorak ispitan sa apsorberom 2 pri frekvenciji od 100 Hz koeficijent apsorpcije iznosi 0,46.



Slika 42. Grafički prikaz koeficijenta apsorpcije za uzorak OSB-a pri visokim frekvencijama

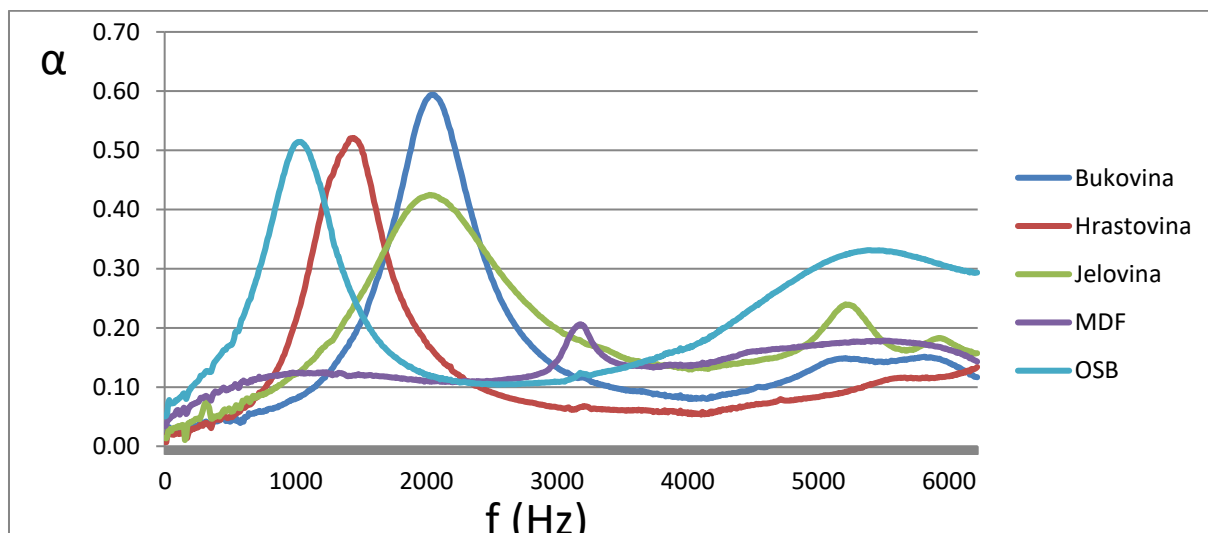
5.3 Usporedba uzoraka od različitih materijala

Iz grafa usporedbe uzoraka niskih frekvencija (slika 43) u frekventnom području od 600 Hz, najveće koeficijente apsorpcije postižu MDF (0,42), bukovina (0,40) te OSB (0,39). Uzorak hrastovine najveću zvukoupojnost ima na oko 1000 Hz i iznosi 0,35. Uzorak jelovine pri niskim frekvencijama ima neprestani linearni rast što znači da prelaskom na više frekvencije raste i koeficijent apsorpcije. Očekivano, uzorak sačaste ploče postiže najlošije rezultate zvukoupojnosti (0,15).



Slika 43. Usporedba uzoraka niskih frekvencija

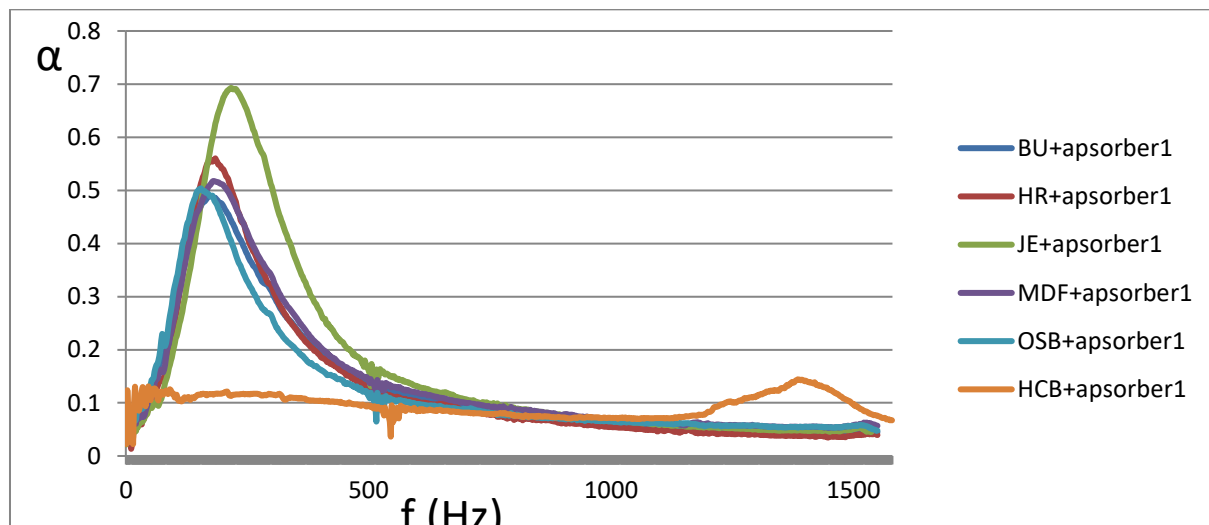
Kod ispitivanja uzoraka na visokim frekvencijama (slika 44) svi uzorci imaju normalnu raspodjelu koeficijenta apsorpcije u različitim frekventnim područjima, tako je za bukovinu izmjerena vrijednost α od 0,59. Uzorak hrastovine i OSB imaju gotovo identične rezultate ($\alpha=0,52$). Jelovina, čiji koeficijent apsorpcije pri niskim frekvencijama kontinuirano raste, sada postiže vrijednost u frekventnom području od 2000 Hz koji iznosi 0,42. Najlošiji koeficijent apsorpcije pri usporedbi uzoraka u visokom frekventnom području postiže MDF čiji α iznosi 0,21.



Slika 44. Usporedba uzoraka visokih frekvencija

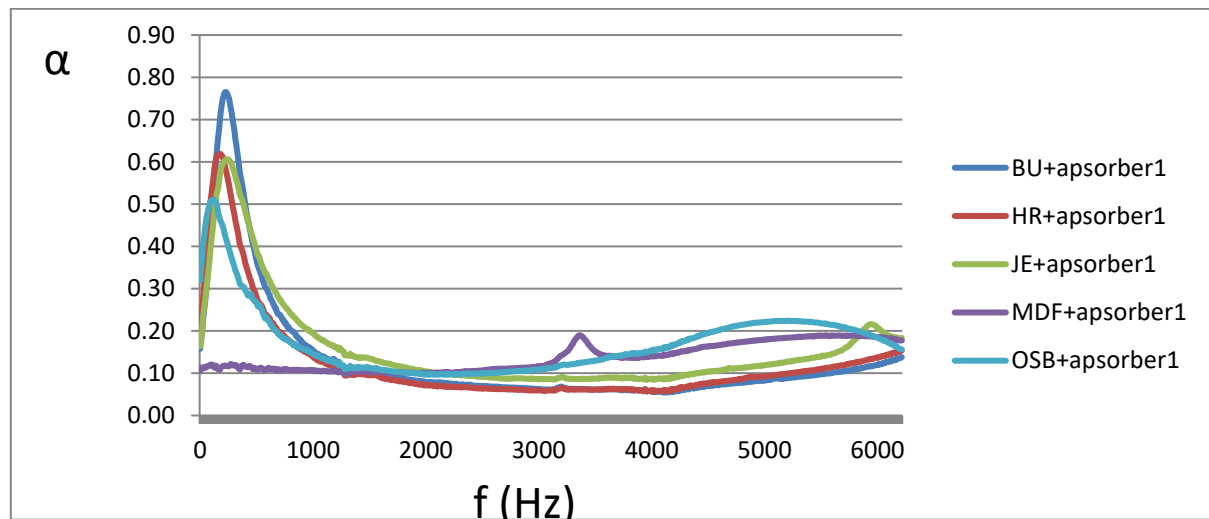
Uzorci od masivnog drva ispitani sa apsorberom kamene vune debljine 20 mm (apsorber 1) pri niskim frekvencijama (slika 45), svi osim saćaste ploče postižu maksimalni koeficijent apsorpcije u rasponu od 150-200 Hz. Uzorak jelovine sa apsorberom 1 postiže

najbolje rezultate ($\alpha=0,69$), a za ostale uzorke koeficijentu apsorpcije sa apsorberom 1 iznose od 0,50 do 0,55.



Slika 45. Usporedba uzoraka s apsorberom 1 pri niskim frekvencijama

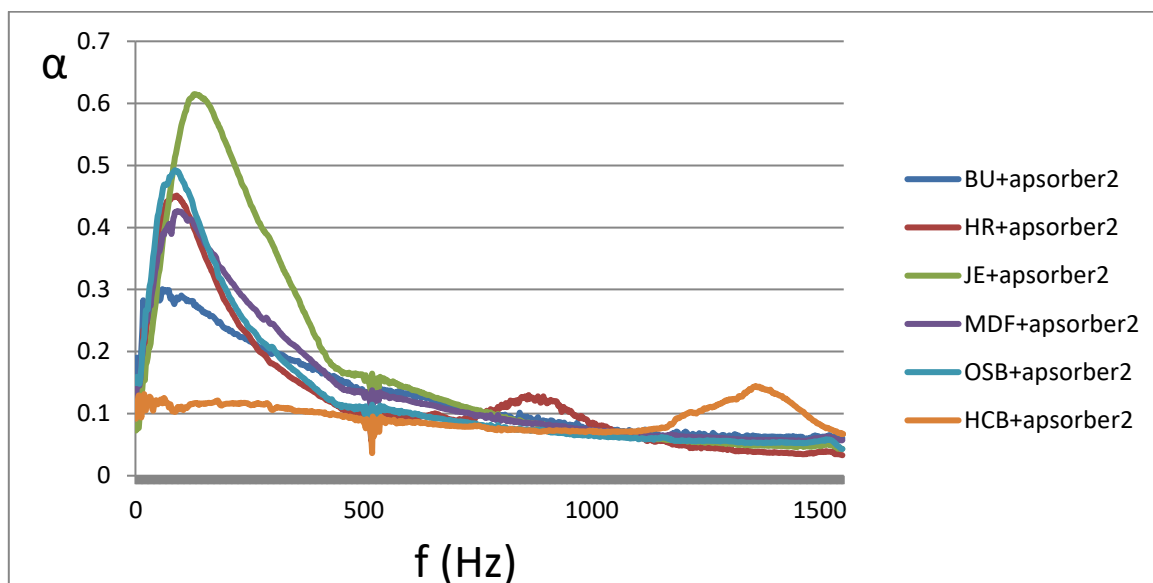
Najveći koeficijent apsorpcije kod uzoraka ispitanih s apsorberom 1 pri visokim frekvencijama (slika 46) postiže bukovina ($\alpha=0,76$) u frekvencijskom području od 200 Hz. Ostali uzorci u sličnom frekvencijskom rasponu postižu maksimalne koeficijente apsorpcije koji se kreću od 0,50 (OSB+apsorber 1) do 0,61 (hrastovina+apsorber 1). MDF sa apsorberom 1 u frekvencijskom području od 3300 Hz ima najmanju vrijednost koeficijenta apsorpcije ($\alpha=0,19$).



Slika 46. Usporedba uzoraka s apsorberom 1 pri visokim frekvencijama

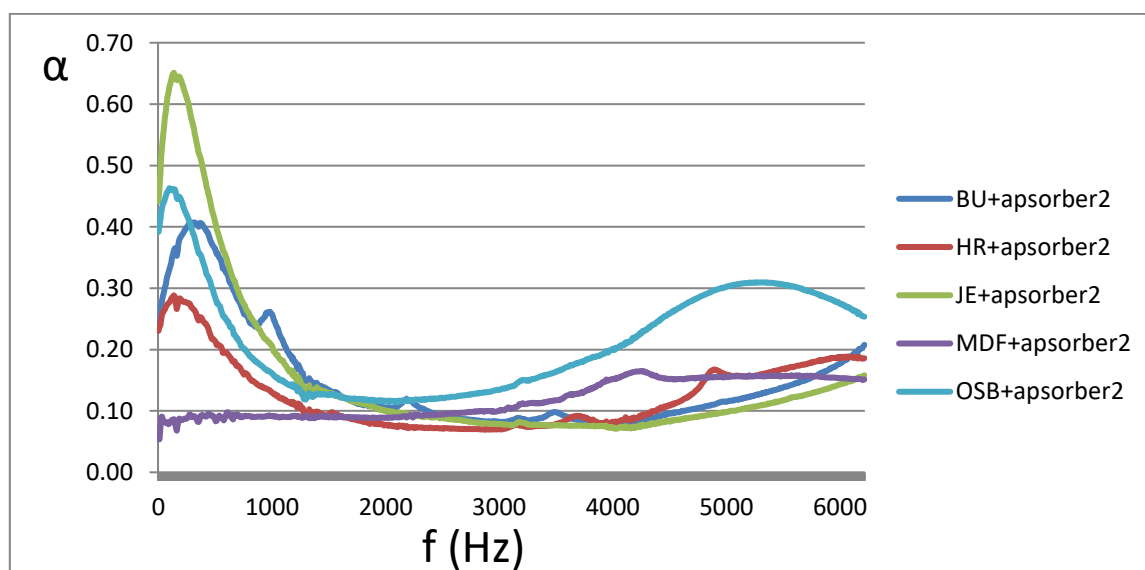
Iz slike 47, očitavanjem vrijednosti koeficijenta apsorpcije dobivenim iz grafa usporedbe uzoraka s apsorberom 2 pri niskim frekvencijama proizlazi kako svi uzorci imaju

najveću zvukoupojnost u frekvencijskom području od 50 do 150 Hz. Time, jelovina postiže najveću vrijednost $\alpha=0,61$, hrastovina 0,43, bukovina 0,29, MDF 0,42 i OSB 0,49. Najmanju vrijednost koeficijenta apsorpcije postiže se kod HCB i iznosi 0,13.



Slika 47. Usporedba uzoraka s apsorberom 2 pri niskim frekvencijama

Iz grafa usporedbe uzoraka sa apsorberom 2 pri visokim frekvencijama (slika 48) najveće vrijednosti koeficijenta apsorpcije zabilježene su u frekvencijskom rasponu do 300 Hz. Za jelovinu, dodavanjem apsorbera 2, koeficijent apsorpcije iznosi 0,65, za OSB 0,45, a bukovinu 0,41. Niže vrijednosti koeficijenta apsorpcije sa apsorberom 2 zabilježava uzorak hrastovine ($\alpha=0,28$) i MDF-a ($\alpha=0,16$).



Slika 48. Usporedba uzoraka s apsorberom 2 pri visokim frekvencijama

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem koeficijenta apsorpcije pomoću cijevne metode proizlaze sljedeći zaključci:

- dodavanjem apsorbera kamene vune debljine 20 mm i 50 mm, uzorak jelovine postiže najveće razlike u promjeni akustičnih svojstava. To znači da uzorak bez apsorbera ima nizak stupanj apsorpcije zvuka prilikom ispitivanja, dok dodavanjem apsorbera njegova akustična svojstva se znatno poboljšavaju, odnosno raste koeficijent apsorpcije (zvukoupojnost).
- uzorci od masivnog drva pri visokim frekvencijama, dodavanjem apsorbera 1, postižu najveće rezultate koeficijenta apsorpcije.
- najveći postignuti koeficijent apsorpcije ($\alpha=0,76$) ima uzorak bukovine sa apsorberom kamene vune 20 mm (apsorber 1) pri visokim frekvencijama u frekventnom području od 200 Hz.
- najniži koeficijent apsorpcije ($\alpha=0,12$) i najmanje promjene nastale dodavanjem apsorbera 1 i 2 ima uzorak od saćaste ploče obložene ivericom (HCB) pri niskim frekvencijama.
- uzorak MDF-a, sa i bez apsorbera 1 i 2, kao akustični materijal ima najlošije rezultate pri visokim frekvencijama.
- dodavanjem debljeg apsorbera (apsorber 2) uzorak hrastovine i bukovine pri visokim frekvencijama postižu niže vrijednosti koeficijenta apsorpcije ($\alpha=0,28$).
- dodavanjem apsorbera, OSB pri visokim i niskim frekvencijama ima minimalne promjene vrijednosti koeficijenta apsorpcije.
- najveći koeficijent apsorpcije dobiven dodavanjem apsorbera 2 pri visokim i niskim frekvencijama postiže uzorak jelovine.
- uzorak MDF-a pri ispitivanju niskih frekvencija, u frekventnom području od 600 Hz, ima najveći koeficijent apsorpcije od svih uzoraka ($\alpha=0,42$)

Temeljem rezultata ispitivanja zaključuje se da kod ispitivanja materijala na visokim frekvencijama postoji neznatna razlika u apsorpciji zvuka. Pločasti materijali postižu lošije rezultate u odnosu na masivno drvo. Uzorak jelovine dodavanjem apsorbera imao je bolje rezultate u odnosu na uzorak hrastovine i bukovine. Kod ispitivanih materijala od masivnog drva, kao najbolji apsorber zvuka za namještaj preporučuje se jelovina dok za zidnu oblogu jelovina u kombinaciji sa apsorberom kamene vune debljine 50 mm. Od pločastih materijala kao najbolji apsorber zvuka pri niskim frekvencijama za namještaj i zidnu oblogu je ploča vlaknatica (MDF), dok kod visokih frekvencija ploča s orijentiranim iverjem (OSB).

7. LITERATURA

1. Bojčić, I., 2021: Utjecaj stupnja razgradnje drva gljivama bijele truleži na brzinu širenja ultrazvuka kroz drvo. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
2. Gulam, N., 2020: Prostorna akustika i projekt tonskog studija. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Akademija dramske umjetnosti, Zagreb.
<https://repozitorij.adu.unizg.hr/islandora/object/adu%3A464> (pristupljeno 28.02.2023).
3. Jambreković, V., 2004: Drvne ploče i emisija formaldehida. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb.
4. Jambreković, V., Despot, R., 2006: Osnovna izobrazba o drvu - prvi stupanj. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb.
5. Jelaković, T., 1978: Zvuk, sluh, arhitektonska akustika. Školska knjiga, Zagreb.
6. 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, Skripta Fakulteta elektronike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Skripta_-_Osnove_akustike2018.pdf (pristupljeno 27.02.2023).
7. Pračević, M., Cvetković, D., Mihajlov, D., 2018: Buka u životnoj sredini II dio.
<https://www.znrfak.ni.ac.rs/serbian/009-NAUKA/IZDAVASTVO-UDZBENICI/Momir%20Prascevic/Buka%20u%20zivotnoj%20sredini%20II%20izdanje.pdf> (pristupljeno 03.03.2023).
8. Sinković, T., Sedlar, T.,: Interna skripta sa predavanja: Tehnička svojstva drva 1. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb.
9. Špoljarić, Z., 1978: Anatomija drva. Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb.
10. Šimetin, V., 1983: Građevinska fizika. Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb.
11. Timell, T., E., Wimmer, R., 2006: Acoustic of wood. Voichita bucur, Francuska.
12. Trajković, J., Šefc, B., 2017: Anatomija drva. Skripta za studente sveučilišnog preddiplomskog studija Drvne tehnologije Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
13. Wegst, K., G., Ulrike, 2006: Wood for sound. 1439-1448 str.
<https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.3732/ajb.93.10.1439> (pristupljeno 07.03.2023).

14. Egger katalog, 2016: Egger acoustic solutions <http://www.totalpanelproducts.co.uk/pdf/EGGER-AkustikLoesungen.pdf> (pristupljeno 16.01.2023).
15. Egger katalog: lake sačaste ploče <https://www.egger.com/hr/interior/product-detail/LIGHTWEIGHTBOARD?country=HR> (pristupljeno 16.06.2023).
16. HRN EN ISO 11654:1998 Akustika - Apsorberi zvuka za upotrebu u zgradama.
17. HRN EN ISO 354:2004 Akustika - Mjerenje zvučne apsorpcije u odječnoj prostoriji.
18. HRN DIN 18041:2012 Akustička kvaliteta malih do srednje velikih prostorija.
19. Impedancijski komplet cijevi <https://scientificservices.eu/item/impedance-tube-kit/5810> (pristupljeno 14.05.2023).
20. Projekt STRUNA: Jeka <http://struna.ihjj.hr/search-do/?q=JEKA&naziv=1&polje=0#container> (pristupljeno 23.03.2023). Zvuk <http://struna.ihjj.hr/naziv/zvuk/8034/#naziv> (pristupljeno 25.05.2023).
21. Wikipedija: Mineralna vuna https://hr.wikipedia.org/wiki/Mineralna_vuna (pristupljeno 10.04.2023).