

Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za gradbeništvo in geodezijo*



RAČUNALNIŠKI PROGRAM ZA ANALIZO AKUSTIKE
NOTRANJEGA OKOLJA
»ARTIE«

NAVODILA ZA UPORABO

ARTIE = Analysis of Reverberation Time in Indoor Environments

Avtorja:

- Nika Šubic
- Roman Kunič

Publikacija UL FGG KSKE: 01/2018, v 1.0

Ljubljana, julij 2018

RAČUNALNIŠKI PROGRAM ZA ANALIZO AKUSTIKE NOTRANJEGA OKOLJA »ARTIE«

NAVODILA ZA UPORABO

ARTIE = Analysis of Reverberation Time in Indoor Environments

Avtorja:

- Nika Šubic, mag. inž. grad.
- izr. prof. dr. Roman Kunič, univ. inž. grad.

Opozorilo / Obvestilo:

Avtorja tega računalniškega programa pozivava vse uporabnike, da nas informirate in obvestite o predlogih, zadovoljstvu ali pripombah v zvezi z delom ali rezultati računalniškega programa ARTIE (elektronska naslova: nika.subic@fgg.uni-lj.si ali roman.kunic@fgg.uni-lj.si). S tem boste tudi vi pripomogli k izboljšanju učinkovitosti programa. Za vašo pripravljenost na sodelovanje se vnaprej zahvaljujemo,

Nika Šubic in Roman Kunič

Publikacija UL FGG KSKE: 01/2018, v 1.0

Ljubljana, julij 2018

Kazalo

Kazalo.....	1
Kazalo slik.....	2
1 Uvod.....	4
2 Zvok.....	4
2.1 Zvok v prostoru.....	5
2.2 Zaznavanje zvoka.....	6
2.2.1 Slušno območje.....	6
2.2.2 Zaznana glasnost zvoka.....	7
3 Prostorska akustika.....	8
3.1 Odmevnost prostora.....	8
3.1.1 Odmevni čas.....	9
3.1.2 Optimalen odmevni čas.....	10
3.2 Zvočna absorpcija.....	11
3.2.1 Absorpcijski koeficient.....	12
3.2.2 Zvočni absorberji.....	12
3.2.2.1. Porozni absorberji.....	13
3.2.2.2. Membranski absorberji.....	14
3.2.2.3. Helmholzovi absorberji.....	14
3.2.2.4. Integrirani absorberji.....	15
3.3 Lastne frekvence prostora.....	15
3.3.1 Račun lastnih frekvenc prostora.....	16
3.3.2 Račun mejne frekvence.....	17
3.4 Račun odmevnega časa.....	17
3.5 Akustično načrtovanje prostora.....	18
4 Računalniški program ARTIE.....	20
4.1 Opis programa.....	20
4.2 Tehnične osnove in nabor podatkov.....	20
3.3.3 Optimalen odmevni čas.....	20
3.3.4 Baza absorpcijskih koeficientov α	22
4.3 Navodila za uporabo.....	22
3.3.5 Zasnova in delovanje programa.....	22
3.3.6 Odmevni čas.....	23
3.3.7 Uporabljeni materiali.....	27
3.3.8 Lastne frekvence.....	27
3.3.9 Koeficienti absorpcije.....	29
5 Literatura.....	30

Kazalo slik

Slika 1: Odboj zvočnega valovanja od konkavne ovire povzroči dvig zvočnega tlaka v točki prostora [3].	5
Slika 2: Stojee valovanje med dvema vzporednima odbojnima površinama povzroči dvig zvočnega tlaka v več točkah prostora [1].	5
Slika 3: Primerjava vrednosti zvočnega tlaka (μPa) in ravni zvočnega tlaka (dB), ki se pojavljajo v vsakdanjem življenju [12].	6
Slika 4: Srednje frekvence terčnih in oktavnih (odebeljeno) pasov v Hz [12].	7
Slika 5: Povezava med foni in decibeli s krivuljami enake glasnosti [3].	7
Slika 6: Frekvenčne uteži tipa A, C in Z. Graf frekvenčne uteži A je obraten krivulji enake glasnosti in se uporablja ko nas zanima človeško zaznavanje ravni zvočnega tlaka [13].	8
Slika 7: Prikaz odmevnosti prostora: direktni zvočni signal (D) najhitreje pripotuje do poslušalca, prvi odboji (R_i) vplivajo na dvig zvočnega tlaka v prostoru [3].	9
Slika 8: Vpliv odmevnosti prostora na jasnost govora [3].	10
Slika 9: Namembnost prostora ima glavno vlogo pri določanju optimalnega odmevnega časa [4].	11
Slika 10: Zvočno valovanje se ob stiku s površino v prostoru: količina absorbiranega zvoka je odvisna od vrste materiala in frekvence zvoka. [5].	11
Slika 11: Delitev zvočnih absorberjev glede na vrsto delovanja na porozne, membranske, Helmholtzove in integrirane absorberje [6].	13
Slika 12: Absorpcijski koeficient kamene volne dveh različnih debelin (50 mm in 25 mm). Z večanjem debeline se izboljša materialova zmožnost absorbiranja srednjih frekvenc [10].	13
Slika 13: Membranski absorber: Frekvenčno območje zvočne absorpcije je prikazano na grafu levo, desno je razviden princip delovanja [6].	14
Slika 14: Helmholtzov absorber: Graf frekvenčnega območja efektivne zvočne absorpcije (levo), princip delovanja (desno) [6].	14
Slika 15: Integrirani absorberji: Graf frekvenčnega območja efektivne zvočne absorpcije (levo), princip delovanja (desno) [6].	15
Slika 16: Enodimenzionalno stojee valovanje. [1]	15
Slika 17: Prikaz odbojev zvoka v primeru eno-, dvo- in trodimenzionalnih oblik stojee valovanja [3].	16
Slika 18: Umestitev zvočno absorpcijskih in zvočno reflektivnih površin v prostor: a) prazen prostor, b) dodane zvočno reflektivne površine, c) dodane zvočno absorpcijske površine [7].	19
Slika 19: Optimalni odmevni čas glede na namembnost prostora [9].	21
Slika 20: Optimalen odmevni čas prostora v odvisnosti od volumna, upoštevajoč namembnost prostora [9].	21
Slika 21: Tolerančno območje odmevnega časa [9].	22
Slika 22: Zavihki programa ARTIE.	Error! Bookmark not defined.
Slika 23: Zavihek ODMEVNI ČAS: (1) Podatki o projektu, (2) podatki o prostoru, (3) površine v prostoru, (4) dodani absorpcijski materiali, (5) gumb za izpis v PDF, (6) tabelarični zapis rezultatov, (7) grafični prikaz rezultatov.	24

- Slika 24: Določanje površin v prostoru: V prvi vrstici je prikazan pravilen vnos površine v prostoru, medtem ko so ostali vnosi pomanjkljivo izpolnjeni – manjka podatek o vrsti površine (druga vrstica), površini (tretja vrstica) ali materialu (četrti vrstica). Ko je material že izbran, spreminjate vrste površine ni več mogoče in se le-ta obarva sivo (1). V primeru, da je celica z materialom prazna, je vrsta površine obarvana črno (2) in jo je možno spreminjati..... 25
- Slika 25: Zavihek UPORABLJENI MATERIALI: (1) površine v prostoru, (2) dodane absorpcijske površine, (3) absorpcija ljudi, (4) skupne vrednosti..... 27
- Slika 26: Zavihek LASTNE FREKVENCE: (1) razvrščanje lastnih frekvenc prostora glede na dane parametre, (2) izračunane Schroederjeve frekvence za različna stanja prostora, (3) lastne frekvence, ki so pod Schroederjevo frekvenco prostora so barvno označene, (4) gumb za izračun lastnih frekvenc prostora (5) graf lastnih frekvenc prostora. 28
- Slika 27: Zavihek KOEFICIENTI ABSORPCIJE: (1) ime dodanega materiala, (2) koeficienti absorpcije po oktavnih pasovih, (3) baza podatkov. 29

1 Uvod

Načrtovanje in gradnja trajnostnih objektov, ki omogočajo človeku varno in udobno bivanje je kompleksen proces, ki zahteva veliko znanja in razumevanju raznih inženirskih panog. Eden izmed pomembnih vidikov, ki vplivajo na kvaliteto bivalnega prostora je tudi prostorska akustika. Neustrezna zvočna klima ima lahko velik vpliv na zdravje in počutje uporabnikov prostora, zato je načrtovanje akustičnega okolja izrednega pomena. V ta namen smo razvili program *ARTIE (Analysis of Reverberation Time in Indoor Environments)*, ki omogoča izračun odmevnega časa prostora v frekvenčnem območju od 125 Hz do 4000 Hz ter ga primerja s priporočenimi vrednostmi, glede na namembnost prostora. Poleg tega program omogoča tudi račun lastnih resonančnih frekvenc prostora, ki so posebej pomembne ko obravnavamo nizkofrekvenčni odziv prostora.

Z izdelavo programa smo želeli akustiko približati inženirjem gradbeništva, arhitektom in drugim inženirjem, ki lahko preko programa spoznajo principe prostorske akustike in pridobijo potrebno znanje na tem področju.

Z računalniškim programom ARTIE je omogočeno projektiranje akustike prostorov v procesu načrtovanja, kot tudi preračunavanje in analizo akustičnih prenov obstoječih prostorov.

2 Zvok

Zvok je fizikalno definiran kot valovanje, ki se širi po nekem mediju – običajno zraku. Nastane ob vibraciji zvočnega telesa (npr. strune na kitari ali zvočnika) in se širi po zraku v obliki longitudinalnega valovanja. Zvočne spremenljivke, kot so zvočni tlak, hitrost in pomik delcev, enostavno opišemo z ravnim valom. [1]

Glede na kompleksnost zvočnega valovanja poznamo tri vrste zvokov:

- ton,
- zven in
- šum.

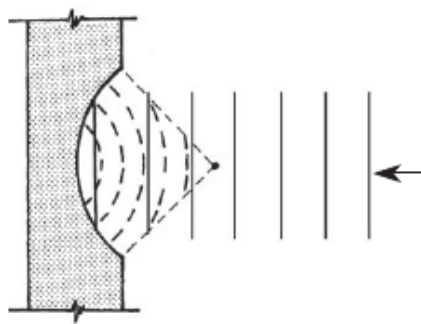
Ton je osnovna oblika zvočnega valovanja in jo opišemo z enostavno sinusno krivuljo, ki ima določeno valovno dolžino, frekvenco, amplitudo in fazo. Zven in šum sta kompleksnejši obliki zvočnega valovanja, kjer prvi predstavlja periodično obliko zvoka, drugi pa neperiodično. Obe vrsti kompleksnih zvokov je možno razstaviti na več osnovnih oblik – tonov. [1]

2.1 Zvok v prostoru

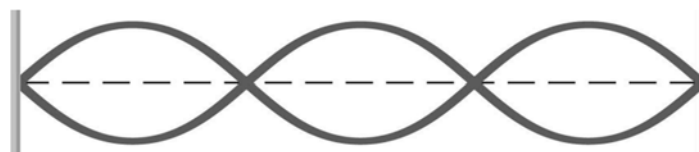
Idealiziran način širjenja zvoka na prostem je opisan s pojmom *difuzno zvočno polje* in v realnem prostoru ne obstaja, vendar pogosto služi kot teoretični približek dejanskega stanja. V primeru difuznega zvočnega polja se zvok enakomerno širi v vse smeri z enako verjetnostjo in je »gostota« zvočne energije enakomerna. V primeru zvočnega polja direktno ob izvoru zvoka ali ob oviri takšen opis zvočnega polja ni primeren, saj je »gostota« zvočne energije tam večja. [3]

V zaprtem prostoru je tako potrebno upoštevati vpliv mejnih površin, pohištva in drugih predmetov v prostoru, saj ob interakciji zvočnih valov z mejnimi površinami nastanejo različni zvočni pojavi kot npr. odboj, lom, uklon ali absorpcija zvoka, ki izrazito vplivajo na zvočno polje prostora.

V primeru velike količine odbojev zvočnega valovanja od mejnih površine lahko raven zvočnega tlaka v prostoru poraste, pozni odboji pa izrazito vplivajo tudi na razumljivost govora znotraj prostora (poglavje 3.1.1). Poleg tega, se ob specifičnih oblikah mejnih ploskev pojavijo točkovne ojačitve zvočnega tlaka (Slika 1), kot v primeru vzporednih odbojnih površin, ko se pojavi stoječe valovanje (Slika 2).



Slika 1: Odboj zvočnega valovanja od konkavne ovire povzroči dvig zvočnega tlaka v točki prostora [3].



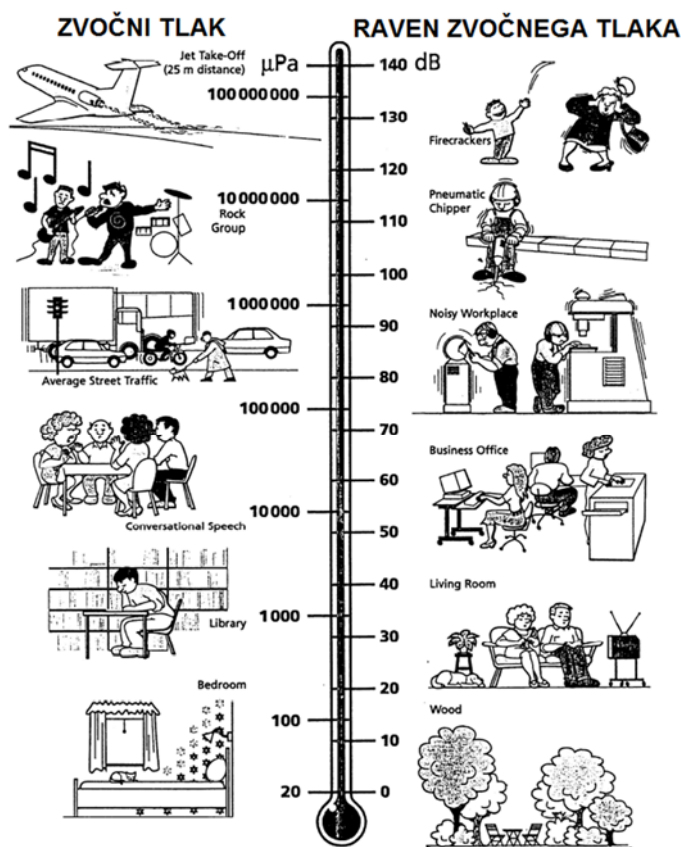
Slika 2: Stoječe valovanje med dvema vzporednima odbojnima površinama povzroči dvig zvočnega tlaka v več točkah prostora [1].

V zaprtem prostoru je zato potrebno upoštevati tako direktno komponento zvoka, kot tudi zgodnje odboje in odmevni zvok, saj so vse komponente praviloma prisotne in glede na razmerje med njimi vplivajo na akustično zaznavanje prostora. Zgodnji odboji človeku pomagajo pri zaznavi prostora, njegove velikosti in oddaljenosti od izvora zvoka ter ojačajo direktni zvok. Odmevni zvok do sprejemnika pripotuje z večjim zamikom in lahko oteži razumevanje direktnega zvoka (poglavje 3.1.1).

2.2 Zaznavanje zvoka

2.2.1 Slušno območje

Poleg fizikalne definicije lahko zvok obravnavamo tudi z vidika človeške zaznave. V tem primeru, je zvok dražljaj, ki vzbudi človeški slušni mehanizem, ki zazna nihanje zvočnega tlaka v izredno velikem razponu od $2 \cdot 10^{-6}$ Pa do 200 Pa. Izkaže pa se, da je človeško zaznavanje *glasnosti zvoka* bolje opisati z akustično količino imenovano *raven zvočnega tlaka (SPL)*, ki je izražena v logaritemski skali z enoto *decibel (dB)*. Tako opišemo človeško slušno območje z lestvico od 0 dB do 120 dB (Slika 3).



Slika 3: Primerjava vrednosti zvočnega tlaka (μPa) in ravni zvočnega tlaka (dB), ki se pojavljajo v vsakdanjem življenju [12].

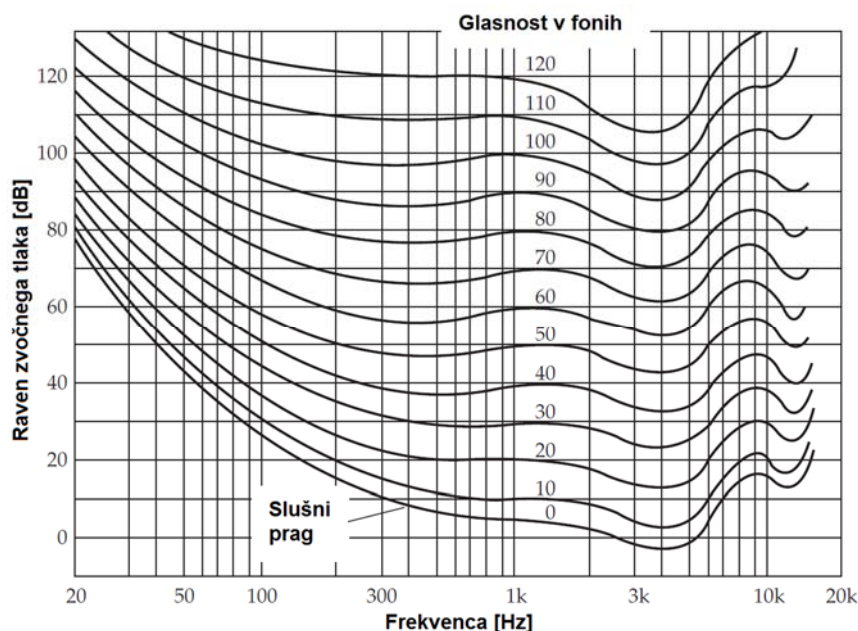
Slušno območje človeka ni omejeno le z ravno zvočnega tlaka, temveč tudi s frekvenco zvoka. Zdravo človeško uho sliši frekvence v območju od 20 Hz do 20 000 Hz. Čeprav so v naravi zastopani zvoki vseh frekvenc, bi bilo nesmiselno in zamudno zapisovati raven zvočnega tlaka pri prav vsaki frekvenci, zato so za zapis uvedeni frekvenčni pasovi, ki zajemajo določena območja frekvenc. Na slušnem območju se uporabljajo standardizirani oktavní ter terčni pasovi, prikazani na sliki 4. [1]

20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000					

Slika 4: Srednje frekvence terčnih in oktavnih (odebeljeno) pasov v Hz [12].

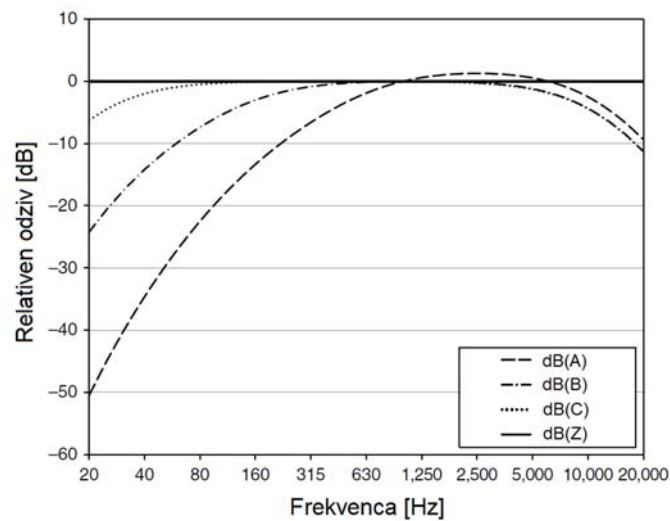
2.2.2 Zaznana glasnost zvoka

Zaznana glasnost zvoka je odvisna od frekvenčnih karakteristik obravnavanega zvoka. Človeško uho je najbolj občutljivo za zvoke s frekvenco med 2000 Hz in 5000 Hz zato le-te tudi glasneje sliši. Pri zelo nizkih in zelo visokih frekvencah se človekova občutljivost zmanjša – ti zvoki morajo biti glasnejši, da prestopijo prag slušnosti. Na sliki 5 so prikazane krivulje glasnosti, ki prikazujejo razmerje med izmerjeno ravno zvočnega tlaka v dB in zaznano glasnostjo v fonih. [1][5]



Slika 5: Povezava med foni in decibeli s krivuljami enake glasnosti [3].

Zaradi omenjenih razlik v zaznavanju zvokov različnih frekvenc so bile uvedene frekvenčne uteži, ki se uporabljajo pri meritvah zvočnega tlaka. S frekvenčnimi utežmi se tako ob meritvi prilagodi energijski prispevek zvoka določene frekvence v skladu z občutljivostjo človeškega ušesa. Najpogosteje se uporabi A-utež, ki zmanjša prispevek izredno nizkih in izredno visokih frekvenc, za katere je človeško uho manj občutljivo, in poveča prispevek frekvenc na območju od 1000 Hz do 6000 Hz, kjer je človeško uho občutljivejše (Slika 6). [4][8]



Slika 6: Frekvenčne uteži tipa A, C in Z. Graf frekvenčne uteži A je obraten krivulji enake glasnosti in se uporablja ko nas zanima človeško zaznavanje ravni zvočnega tlaka [13].

3 Prostorska akustika

Ker se večina zvočnih valov preden dosežejo poslušalca večkrat odbije od sten, stropa, tal in drugih predmetov znotraj prostora, imajo fizične lastnosti prostora (velikost, oblika, vrsta površin v prostoru) velik vpliv pri določanju narave zvoka, ki ga sliši poslušalec. Povezanost fizičnih lastnosti prostora z objektivnimi karakteristikami zvočnega polja v prostoru in subjektivnim zaznavanjem le-teh obravnava prostorska akustika. [1]

V okviru akustične analize prostora se izvajajo analitični računi, računalniške simulacije ter *in-situ* meritve, s katerimi določamo akustične parametre prostora. Med akustične parametre uvrščamo odmevni čas (T_{60}), indeks razumljivosti govora (STI – *speech transmission index*), indeks jasnosti (C - *clarity*), zvočna podpora (G - *sound strength*), absorpcija prostora (A) itd. Vsi akustični parametri niso vedno relevantni, saj je med akustično analizo pomembno tudi poznavanje fizikalnih lastnosti prostora, njegove namembnosti in potreb uporabnikov. [1]

Dva bistvena in medsebojno vzajemno povezana pojava prostorske akustike sta odmevnost prostora in zvočna absorpcija materialov.

3.1 Odmevnost prostora

Ko izklopimo zvočni vir v nekem prostoru in preden nastopi tišina, zvok še nekaj časa vztraja v prostoru [1]. Ta zvočni pojav imenujemo odmevnost in ga opisujemo z odmevnim časom (T_{60}).

Odmevnost prostora v veliki meri definira akustično klimo prostora, saj vpliva na:

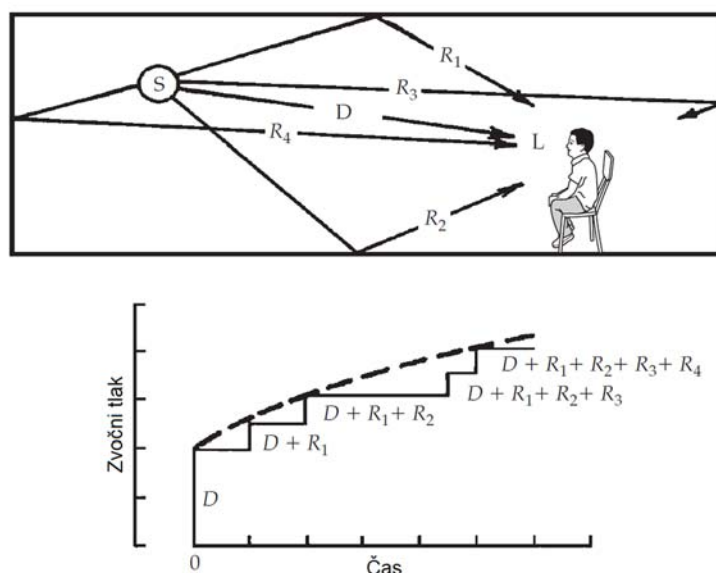
- raven zvočnega tlaka v prostoru,
- jasnost zvoka,
- dojetje velikosti in oblike prostora,
- pojav odmeva,
- obarvanost zvoka,
- dojetje izvora zvoka ... [2]

Čeprav se odmevnost smatra za nezaželeno lastnost, je določena mera odmevnosti v prostoru zaželena oziroma celo potrebna za udobje bivanja. Idealna količina odmevnosti pa je odvisna od namembnosti prostora, saj z različnimi nivoji odmevnosti dosežemo različne akustične učinke.

3.1.1 Odmevni čas

Odmevnost prostora ima bistveno vlogo pri vzpostavljanju primerne akustičnega okolja, saj vpliva na raven zvočnega tlaka, jasnost zvoka v prostoru, percepcijo oblike in velikosti prostora, dojetje izvora zvoka, obarvanost zvoka, pojav odmeva, itd. [1]. Odmevnost definiramo z akustičnim parametrom imenovanim odmevni čas (T_{60}).

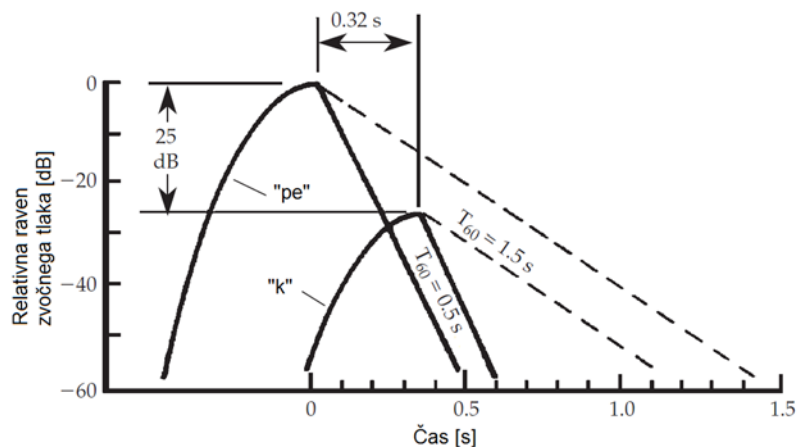
Odmevni čas je čas, v katerem se raven zvočnega tlaka v prostoru zmanjša za 60 dB po tem, ko zvočni vir izklopimo. Vrednosti odmevnega časa se spreminjajo preko frekvenčnih pasov in zato odmevnega času ne moremo zapisati z enoštevilčno vrednostjo vendar se ga poda v odvisnosti od oktavnega oz. terčnega pasu. Odmevni čas prostora je odvisen od števila odbojev zvoka v prostoru in dolžine poti, ki jo zvok prepotuje (Slika 7). Večji prostori imajo tako daljši odmevni čas, dodajanje zvočno absorpcijskih materialov v prostor pa odmevni čas skrajša.



Slika 7: Prikaz odmevnosti prostora: direktni zvočni signal (D) najhitreje pripotuje do poslušalca, prvi odboji (R_i) vplivajo na dvig zvočnega tlaka v prostoru [3].

Direktni zvok prvi pripotuje do poslušalca, kateremu nato sledijo odboji zvoka od površin v prostoru. Vsak zvočni odboj prispeva k *dvigu ravni zvočnega tlaka v prostoru* (Slika 7), ki doseže končno raven, ko do poslušalca pripotujejo vsi odboji. Prostori z visoko stopnjo odbojnosti so zato glasnejši in manj intimni.

Za govorno razumevanje pa je izrednega pomena tudi *vpliv odmevnega časa na jasnost govora*, ki je prikazan na sliki 8. Različni zlogi v besedah dosegaajo različne ravni zvočnega tlaka, zato lahko zaradi dolgega odmevnega časa odmev prvega zloga besede preglasi drugi zlog, kar povzroči nejasnost in nerazumevanje med govorcji.

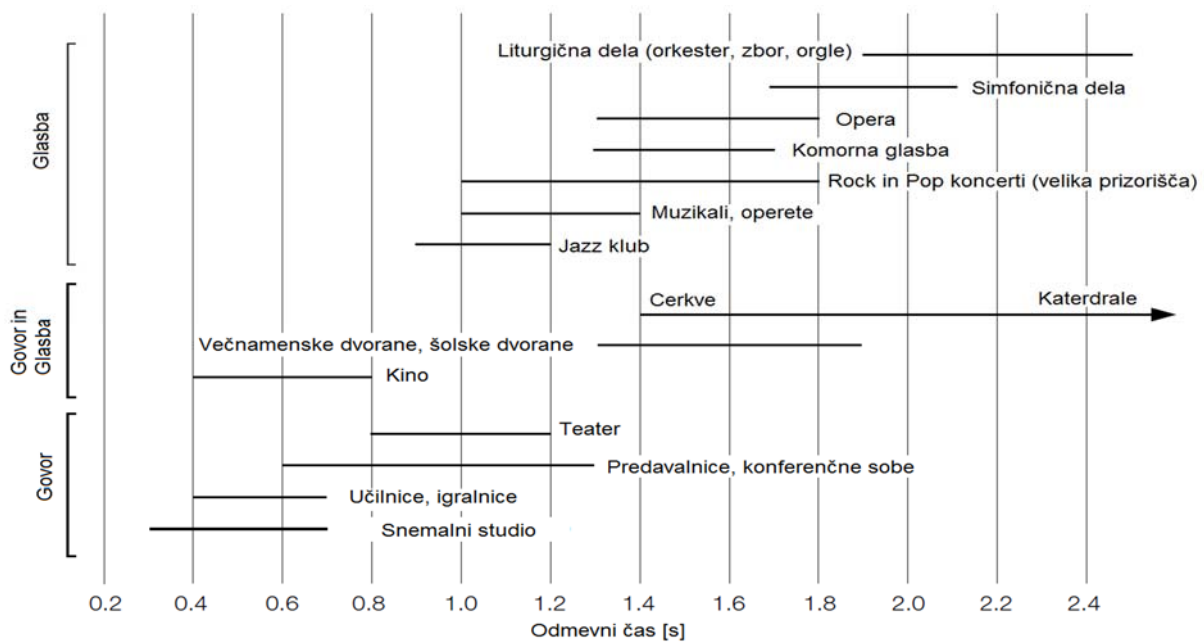


Slika 8: Vpliv odmevnosti prostora na jasnost govora [3].

3.1.2 Optimalen odmevni čas

Optimalen odmevni čas prostora določa velikost in namembnost prostora samega. V primeru prostorov namenjenih govoru (predavalnice, učilnice, sejne sobe...) je priporočljiv kratek odmevni čas, saj večje število sekundarnih odbojev povzroča zmanjšanje jasnosti govora in povečuje hrupnost prostora. Kljub temu, je določena stopnja odmevnosti potrebna, saj omogoča govorno podporo, sam prostor pa postane neprijeten in moteč v primeru, da je popolnoma neodmeven. Prostori namenjeni glasbi (prostori glasbenih šol, glasbene dvorane, opere...) pa potrebujejo daljši odmevni čas, za doseganje primerne glasnosti, bogatosti zvoka in druge veliko bolj na estetiko vezane vsebine. [2] [4]

Napotki glede primernega območja odmevnega časa za prostore različnih namembnosti so prikazani na Sliki 9.

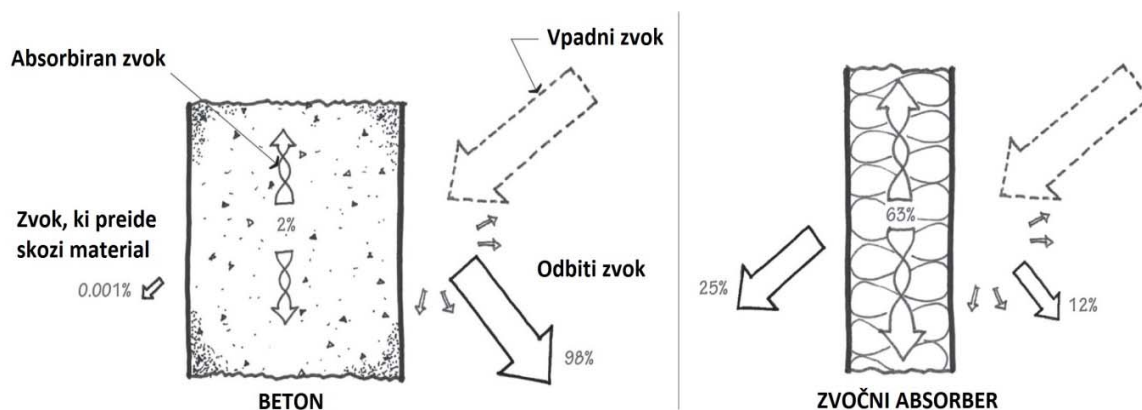


Slika 9: Namembnost prostora ima glavno vlogo pri določanju optimalnega odmevnega časa [4].

Priporočljivo je, da so vrednosti odmevnega časa tem bolj enakomerno zastopane preko frekvenčnih pasov brez večjih skokov v dolžini odmevnega časa. Pri tem je potrebno upoštevati, da človeško uho različno glasno zazna zvoke različnih frekvenc in je glede na namembnost prostora smiselno prilagoditi krivuljo optimalnih vrednosti odmevnega časa.

3.2 Zvočna absorpcija

Na odmevnost prostora ima ključen vpliv zvočna absorpcija mejnih površin v prostoru. Zvočno valovanje se ob stiku s površino delno odbije, absorbira oziroma preide skozi oviro, razmerje med pojavi pa je odvisno od vrste materiala in frekvence zvoka (Slika 10). Zmožnost absorbiranja zvočnega valovanja je opisana z akustičnim parametrom imenovanim *absorpcijski koeficient* α , materiali, ki dobro absorbirajo zvok pa so *zvočni absorberji*.



Slika 10: Zvočno valovanje se ob stiku s površino v prostoru: količina absorbiranega zvoka je odvisna od vrste materiala in frekvence zvoka. [5].

3.2.1 Absorpcijski koeficient

Odmevni čas prostora je odvisen od količine zvočno absorpcijskih površin v prostoru. Sposobnost materiala, da absorbira zvočno energijo se opiše z *absorpcijskim koeficientom* α , ki zavzema vrednosti od 0 do 1. Materiali, ki odbijejo vso zvočno energijo imajo $\alpha = 0$, popolnoma zvočno absorbni materiali pa $\alpha = 1$. Tako kot odmevni čas, je tudi absorpcijski koeficient frekvenčno odvisen – določeni materiali oz. elementi so bolj učinkoviti pri absorpiranju zvočnega valovanja visokih frekvenc, nekateri pa nizkih. [1]

Absorpcijski koeficient merimo s pomočjo impedančne cevi (Kundtove cevi) oziroma v odmevnici, metodi sta opisani s standardoma ISO 10534-2 in ISO 354. Metoda z impedančno cevjo je enostavnejša vendar pa izmeri absorpcijski koeficient le pri pravokotnem vpadnem kotu. V realnem okolju sposobnost absorpiranja materialov ni omejena le na en vpadni kot in eno ravnino, zato se je potrebno zavedati, da imajo materiali izmerjeni v impedančni cevi ponavadi še nekoliko boljše absorpcijske lastnosti. V primerih učinkovitih absorberjev pogosto absorpcijski koeficient znaša tudi več kot 1. To predvsem velja za izmerjene vrednosti s pomočjo odmevne komore (odmevnice). Ta pojav razložimo z dejstvom, da v času, ko se glasnost zmanjša za 60 dB, to je v času, ki ga definiramo kot odmevni čas, zvok večkrat pade na absorber. Poleg tega ima tudi sam absorber lahko veliko večjo aktivno absorpcijsko površino, kot znaša njegova površina gledana projekcijsko pravokotno na notranjo površino prostora, posebej v primeru, absorpcije bočnih stranic absorberjev, raznih reliefnih oblik absorberjev (vključno s piramidami) in absorberjev spušenih ali odmaknjenih od površine z absorpcijsko hrbtno stranjo. Omenjene površine po metodi izračuna odmevnega časa niso zajete, temveč le projicirana projekcija na notranjo površino prostora. Pomembna je tudi difrakcija zvočnih valov ob robovih absorberjev, kot tudi dejstvo, da koeficient absorpcije velja za idealno difuzno zvočno polje v prostoru. [1] [15]

Nekateri avtorji predlagajo upoštevanje tako izmerjenih absorpcijskih koeficientov (tudi višjih od vrednosti 1,00), drugi pa vidijo primernejšo omejitev absorpcijskega koeficienta na vrednost 1,00, četudi je izmerjena višja vrednost in upoštevanje večje efektivne absorpcijske površine [15].

V kolikor bi merili energijo zvočnega valovanja, ki pade na absorber in jo primerjali z energijo reflektiranega zvočnega valovanja, pa absorpcijski koeficient (t.i. Eyringov absorpcijski koeficient) ne bi mogel biti večji kot 1,0. [15]

Absorpcijskega koeficienta prostora ni mogoče izračunati temveč ga je potrebno izmeriti. Obstaja več uveljavljenih metod za določitev absorpcijskega koeficienta, najbolj uveljavljeni med njima sta metoda merjenja α z impedančno cevjo (Kundtova cev), ter metoda merjenja α v odmevnici. Metodi sta opisani s standardoma ISO 10534-2 in ISO 354.

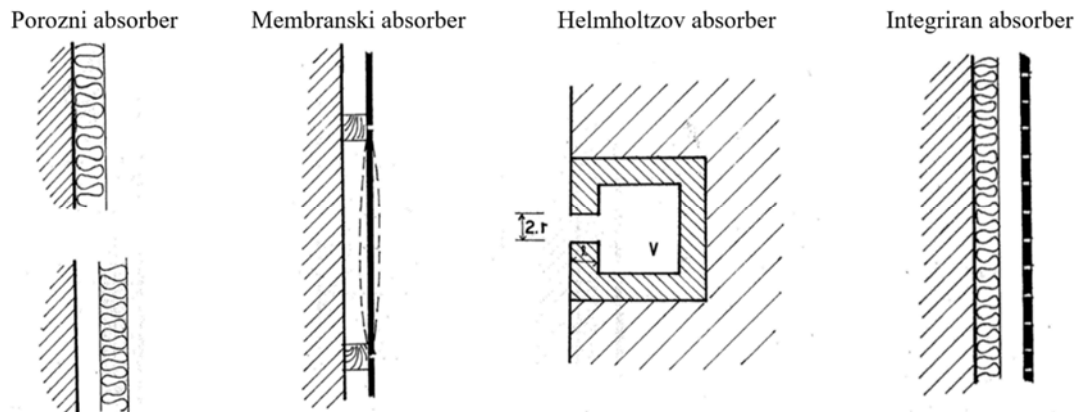
3.2.2 Zvočni absorberji

Zvočne absorberje lahko delimo glede na njihovo absorpcijsko učinkovitost, način delovanja ali frekvenčno območje, ki ga dušijo. Dobro absorpcijo visokih frekvenc je mogoče doseči z vnosom poroznih materialov v prostor (volne, pene, porozni zidaki, blago...), ki pa niso tako učinkoviti na območju nižjih frekvenc. V ta namen se uporabljajo resonančni absorberji (membranski ali Helmholtzovi), obstajajo pa tudi kombinirane rešitve, ki združujejo obe vrsti absorberjev.

Poleg količine in vrste zvočnih absorberjev pa je pri uravnavanju akustične klime prostora pomembna tudi pravilna umestitev absorberjev v prostor.

V nadaljevanju so predstavljene 4 vrste zvočnih absorberjev, določene glede na princip delovanja:

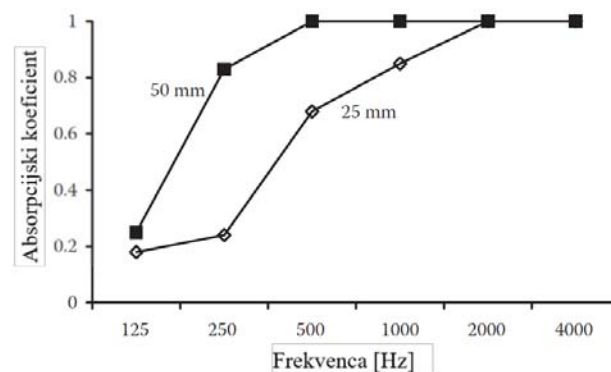
- Porozni absorberji,
- Resonančni absorberji: Membranski in Helmholtzovi absorberji ter
- Integrirani absorberji (absorpcijske plošče ali paneli).



Slika 11: Delitev zvočnih absorberjev glede na vrsto delovanja na porozne, membranske, Helmholtzove in integrirane absorberje [6].

3.2.2.1. Porozni absorberji

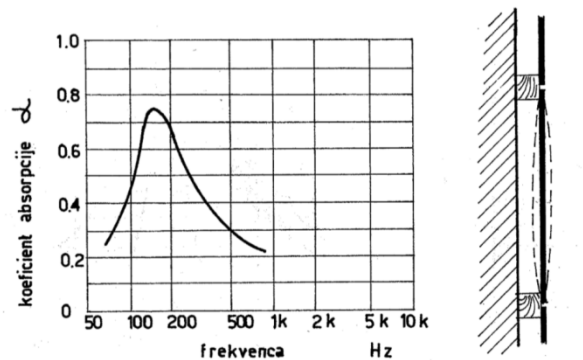
Med porozne absorberje spadajo materiali z odprto porozno strukturo kot so razne pene, blago, pluta, volne, porozni zidaki... V porozni strukturi materiala se zvočno valovanje večkrat odbije in tako izgubi zvočno energijo. Učinkovitost poroznih materialov se večja z njihovo debelino, načeloma so uporabni za absorpcijo visokih frekvenc, v primeru večjih debelin pa absorbirajo tudi srednje frekvenčno območje (Slika 12). [1] [10]



Slika 12: Absorpcijski koeficient kamene volne dveh različnih debelin (50 mm in 25 mm). Z večanjem debeline se izboljša materialova zmožnost absorbiranja srednjih frekvenc [10].

3.2.2.2. Membranski absorberji

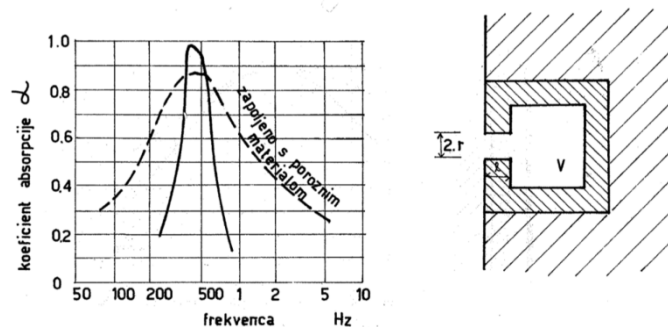
Membranski absorberji po principu delovanja spadajo med resonančne absorberje in delujejo po principu vzmeti in uteži. Membrana (ali plošča), ki je napeta preko zračne votline predstavlja utež, zračna votlina pa vzmet – tako dobimo učinkovit mehanizem za sipanje zvočne energije v ozkem frekvenčnem spektru (Slika 13). S povečevanjem debeline zvočne votline in večanjem mase membrane se znižuje resonančna frekvenca sistema. [8]



Slika 13: Membranski absorber: Frekvenčno območje zvočne absorpcije je prikazano na grafu levo, desno je razviden princip delovanja [6].

3.2.2.3. Helmholtzovi absorberji

Helmholtzovi absorberji prav tako sodijo med resonančne absorberje, vendar za razliko od membranskih absorberjev v tem primeru kot utež deluje masa zraka, ujeta v vrat odprtine (Slika 14: desno).

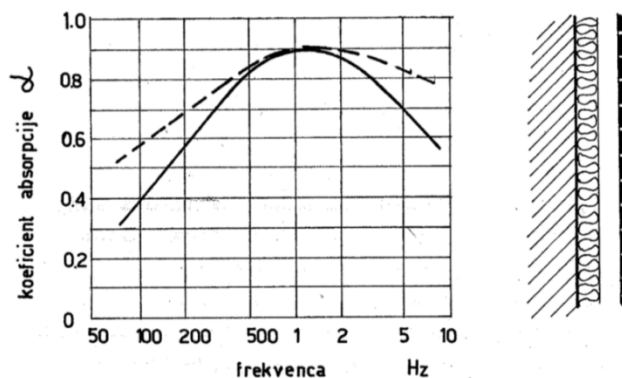


Slika 14: Helmholtzov absorber: Graf frekvenčnega območja efektivne zvočne absorpcije (levo), princip delovanja (desno) [6].

Prednost resonančnih absorberjev (membranskih in Helmholtzovih) je v tem, da jih je mogoče umeriti na nižje frekvence in lahko absorbirajo zvok v nižjem frekvenčnem spektru, kjer so porozni absorberji neučinkoviti.

3.2.2.4. Integrirani absorberji

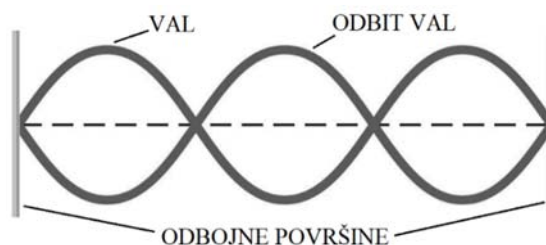
Integrirani absorberji združujejo oba principa delovanja (poroznega in resonančnega) in so učinkoviti na najširšem frekvenčnem spektru. Integriran absorber dobimo, če votlino za perforirano ploščo Helmholtzovega sistema zapolnimo s poroznim materialom. (Slika 15).



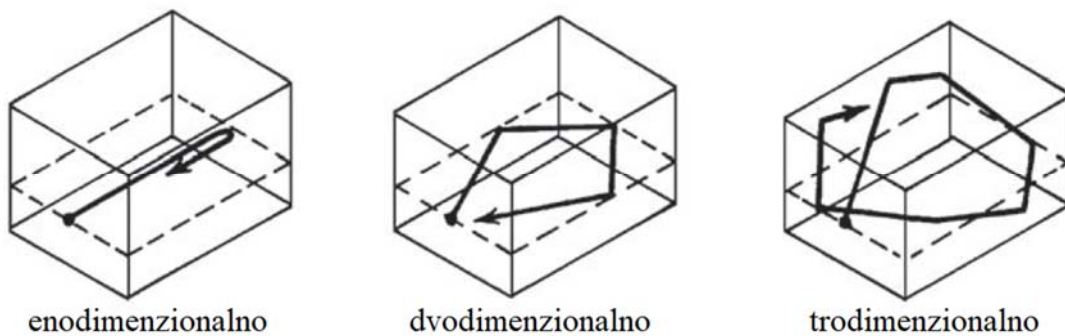
Slika 15: Integrirani absorberji: Graf frekvenčnega območja efektivne zvočne absorpcije (levo), princip delovanja (desno) [6].

3.3 Lastne frekvence prostora

Poseben akustični pojav se zgodi pri nizkih frekvencah (običajno pod 200 Hz), ko je valovna dolžina zvočnega valovanja v velikostnem redu dimenzij prostora. Zaradi ujemanja določene valovne dolžine z dimenzijami prostora nastane stoječe valovanje (Slika 16). Pojav stoječega valovanja je posebej problematičen v manjših prostorih, z vzporednimi odbojnimi površinami. Zaradi stoječega valovanja se v prostoru pojavijo območja visokega zvočnega tlaka (višja glasnost) in območja nizkega zvočnega tlaka (nižja glasnost), kar ima velik vpliv na zvočno polje v prostoru. Frekvence, pri katerih se stoječe valovanje pojavi imenujemo lastne frekvence prostora in so lahko eno-, dvo- ali tridimenzionalne (Slika 17). [3] [4] [5]



Slika 16: Enodimenzionalno stoječe valovanje. [1]



Slika 17: Prikaz odbojev zvoka v primeru eno-, dvo- in trodimenzionalnih oblik stoječega valovanja [3].

3.3.1 Račun lastnih frekvenc prostora

Račun osnovne frekvence, pri kateri se pojavi stoječe valovanje med dvema vzporednima odbojnima površinama je pogojeno z razdaljo med površinama d in hitrostjo zvoka c . Osnovna (prva) lastna frekvenca se pojavi ko velja: $d = \frac{1}{2} \lambda$, to pomeni, ko je razdalja med odbojnima površinama enaka polovici valovne dolžine.

Frekvence, pri katerih se pojavi enodimenzionalno stoječe valovanje tako izračunamo po enačbi [8]:

$$f_1 = n * \frac{c}{2d} \quad (1)$$

Kjer velja:

- n ... mnogokratnik $\frac{1}{2}$ valovne dolžine ($n = 1, 2, 3 \dots$),
- c ... hitrost zvoka [m^2/s],
- d ... razdalja med odbojnimi površinami [m].

Lastne frekvence pa se v prostoru pojavijo tudi v dvo- in trodimenzionalnih oblikah. V tem primeru se poslužimo spodnje enačbe [8]:

$$f_i = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{x}{\check{S}}\right)^2 + \left(\frac{y}{D}\right)^2 + \left(\frac{z}{V}\right)^2} \quad (2)$$

Kjer velja:

- f_i ... i -ta lastna frekvenca prostora [Hz],
- x, y, z ... mnogokratniki $\frac{1}{2}$ valovne dolžine ($x, y, z = 1, 2, 3 \dots$),
- \check{S}, D, V ... dimenzije prostora (širina, dolžina in višina) [m].

3.3.2 Račun mejne frekvence

Zgornjo mejo, do katere frekvence je stoječa valovanja smiselno obravnavati lahko izračunamo s Schroederjevo oziroma mejno frekvenco. Ta določa mejo med nizkimi in visokimi frekvencami glede na volumen obravnavanega prostora in jo izračunamo po spodnji enačbi [8]:

$$f_{\text{mejna}} = 2102 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (3)$$

Kjer velja:

T_{60} ... odmevni čas [s],
 V ... volumen prostora [m^3].

3.4 Račun odmevnega časa

Določanje odmevnega časa prostora omogočajo različni računski postopki, osnovna in najbolj razširjena med njimi je Sabinova enačba (4):

$$T_{60,S} = \frac{0,163 * V}{A + (4mV)} \quad (4)$$

Kjer velja:

$T_{60,S}$... odmevni čas izračunan po Sabinovi enačbi [s],
 V ... volumen prostora [m^3],
 A ... ekvivalentna absorpcijska površina prostora [m^2],
 m ... konstanta zvočnega zmanjševanja (absorpcije) v zraku [m^{-1}].

Opisana je t.i. 'modificirana' Sabinova formula s členom upoštevanja absorpcije zvoka v zraku (člen ' $4 \cdot m \cdot V$ ' v imenovalcu formule). Prvotna Sabinova formula tega člena ni imela. Poleg Sabinove enačbe *Tehnična smernica TSG-I-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah* [7] navaja tudi Eyring-Norrisovo enačbo (5), ki pa je bolj primerna v primeru večje količine zvočne absorpcije v prostoru, t.j. $\bar{\alpha} > 0,20$:

$$T_{60,Ey} = \frac{0,163 * V}{-S * \ln(1 - \bar{\alpha}) + (4mV)} \quad (5)$$

Kjer velja:

$T_{60,Ey}$... odmevni čas izračunan po Eyring-Norrisovi enačbi [s],
 S ... vse površine v prostoru [m^2],
 $\bar{\alpha}$... srednji koeficient absorpcije vseh površin v prostoru [-].

Za račun odmevnega časa je poleg velikosti prostora potrebno poznavanje absorpcijskih lastnosti vseh površin v prostoru, na podlagi katerih dobimo faktorja A in $\bar{\alpha}$ (Enačbi (6) in (7)):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * S_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (7)$$

Kjer velja:

α_i ... absorpcijski koeficient materiala i [-],

S_i ... površina materiala i [m²].

Z uporabo ekvivalentne absorpcijske površine A pretvorimo vse površine v prostoru z različnimi vrednostmi α na eno, ekvivalentno absorpcijsko površino z absorpcijskim koeficientom $\alpha = 1$, srednji koeficient absorpcije $\bar{\alpha}$ pa predstavlja povprečno vrednost koeficientov absorpcije materialov v prostoru. Obe vrednosti sta frekvenčno odvisni, tako kot posledično tudi vrednosti odmevnega časa.

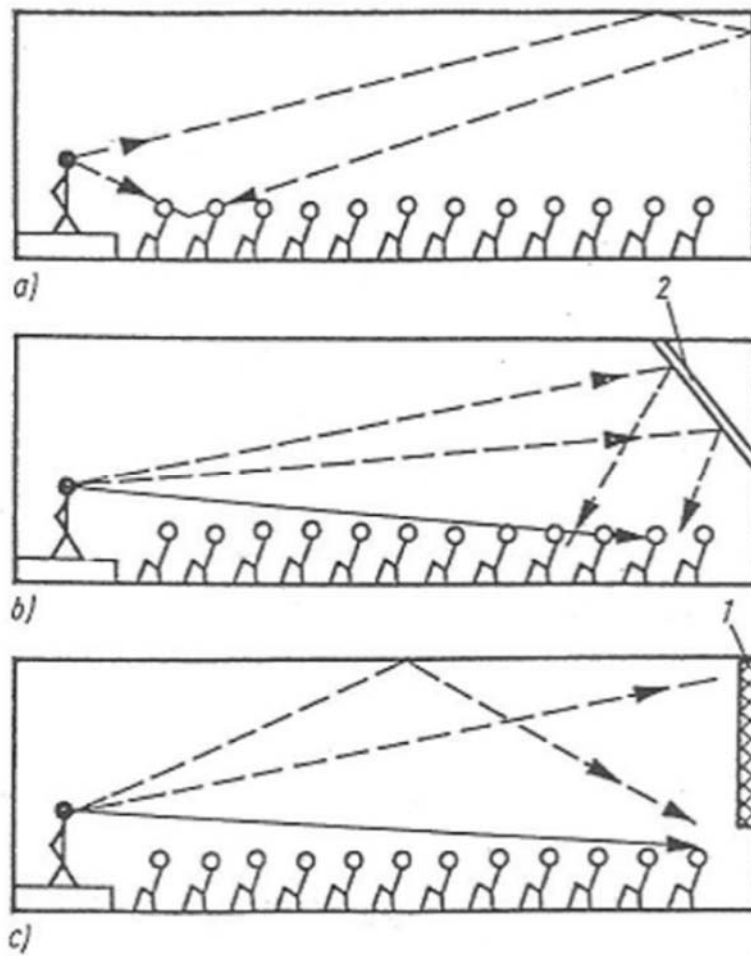
Enačbi (4) in (5) predstavljajo enostavno in hitro metodo napovedovanja odmevnega časa prostora, vendar je izrednega pomena dobro poznavanja dimenzij prostora ter absorpcijskih lastnosti vseh površin in elementov v prostoru. Z računsko analizo je mogoče v fazi načrtovanja napovedati akustične lastnosti prostora, za celovito analizo prostorske akustike pa je odmevni čas potrebno tudi izmeriti. Potek meritev odmevnega časa v običajnih prostorih opisuje standard ISO 3382-2 (Akustika - Merjenje parametrov prostorske akustike - 2. del: Odmevni čas v običajnih prostorih) [14].

3.5 Akustično načrtovanje prostora

Pri načrtovanju akustike prostora je potrebno upoštevati namembnost, velikost, obliko in vrste površin v obravnavanem prostoru. Ob poznavanju namembnosti prostora lahko določimo katere akustične parametre je smiselno upoštevati in kakšne so ciljne vrednosti. Nato na podlagi osnovnih dimenzij prostor načrtujemo tako, da bo akustika prostora ustrezna. Odmevni čas reguliramo s količino zvočno absorpcijskih površin v prostoru, poleg tega, pa je potrebno paziti tudi na pojav stoječih valovanj, kar lahko reguliramo s pravilno umestitvijo zvočno absorpcijskih ter zvočno reflektivnih materialov v prostor. Priporočljiva je tem bolj enakomerna razporeditev absorpcijskih materialov po prostoru, izogibanje močno odbojnih vzporednih površin (nastanek stoječega valovanja) in pazljivost pri stenah specifičnih oblik (npr. konkavne stene), ki lahko močno vplivajo na lokalno akustiko (poglavje 2.1). [1]

Akustiko prostora načrtujemo za zaseden prostor, saj ljudje predstavljamo veliko absorpcijsko površino in s tem vplivamo na akustično klimo prostora. *Absorpcija ljudi* je odvisna od gostote in umestitve ljudi v prostoru (sedišča, stojšča) in je z absorpcijskimi koeficienti podana v razni literaturi [9] [10] [11].

Pri načrtovanju prostorov namenjenih govoru, se načeloma želimo izogniti poznim odbojem zvoka, ki do sprejemnika pripotujejo z večjim časovnim zamikom in nižajo jasnost govora. Nekaj primerov ustreznega načrtovanja akustike prostora je prikazanih na sliki 18.



Slika 18: Umestitev zvočno absorpcijskih in zvočno reflektivnih površin v prostor: a) prazen prostor, b) dodane zvočno reflektivne površine, c) dodane zvočno absorpcijske površine [7].

4 Računalniški program ARTIE

4.1 Opis programa

Program *ARTIE* (*Analysis of Reverberation Time in Indoor Environment*) je izdelan v prvi vrsti za študijske namene. Namenjen je študentom Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani in tudi študentom drugih strok, kot študijski pripomoček pri predmetih, ki vključujejo akustiko kot del študijskega načrta. Program omogoča izračun odmevnega v frekvenčnem območju od 125 Hz do 4000 Hz in račun lastnih frekvenc prostora. Namenjen je za analizo prostorov pravokotne oblike, t.j. oblike kvadra.

Račun odmevnega časa je izveden po dveh uveljavljenih enačbah: Sabinovi (4) in Eyring-Norrisovi enačbi (5). Vrednosti odmevnega časa se v programu primerjajo s priporočenimi vrednostmi, glede na namembnost prostora. Odmevni čas prostora se izračuna v različnih stanjih: osnovno stanje, z dodano absorpcijsko površino in ob prisotnosti ljudi. Iz odmevnega časa v različnih stanjih prostora je tako mogoče oceniti vpliv dodane absorpcijske površine oziroma zasedenosti ljudi na odmevni čas prostora.

Program omogoča tudi tridimenzionalno določanje lastnih frekvenc prostora. Izračuna se prvih 1330 lastnih frekvenc prostora po enačbi (2) in se jih primerja z mejno frekvenco (3), ki določa katere lastne frekvence je še smiselno upoštevati.

Poleg omenjenih izračunov, program omogoča tudi vpogled v bazo podatkov, dodajanje lastnih absorpcijskih materialov in izpis podatkov v obliko PDF. Izpis je možen za:

- Vhodne podatke,
- Rezultate računa odmevnega časa,
- Absorpcijske lastnosti uporabljenih materialov,
- Račun lastnih frekvenc prostora.

Program *ARTIE* je izdelan v programskem okolju Microsoft Office Excel.

4.2 Tehnične osnove in nabor podatkov

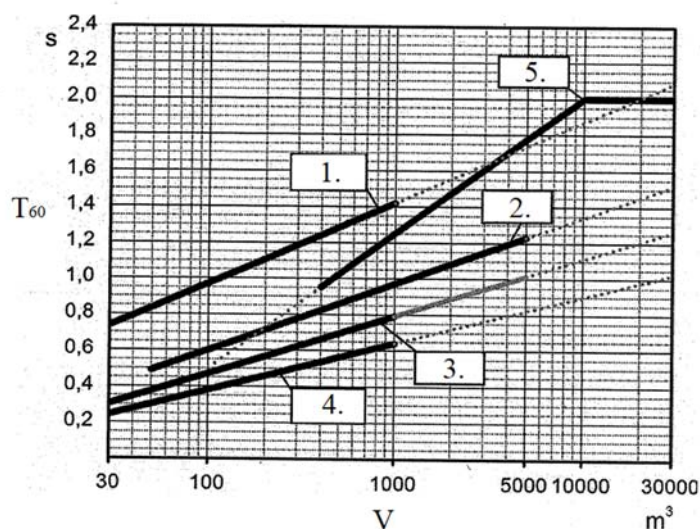
3.3.3 Optimalen odmevni čas

Teoretična podlaga za izračune uporabljene v programu *ARTIE* je opisana v sklopu poglavja 3. Pri tem se upošteva osnovne napotke za račun odmevnega časa iz nacionalne tehnične smernice *TSG-I-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah* [7].

Optimalne vrednosti odmevnega časa glede na namembnost prostora in tolerančnega območja se določi na podlagi nemškega standarda *DIN 18041: 2015; Acoustic quality in rooms – Specifications and instructions for room acoustic design* [9]. V programu je možno zbrati med petimi različnimi namembnostmi (Slika 19, Slika 20).

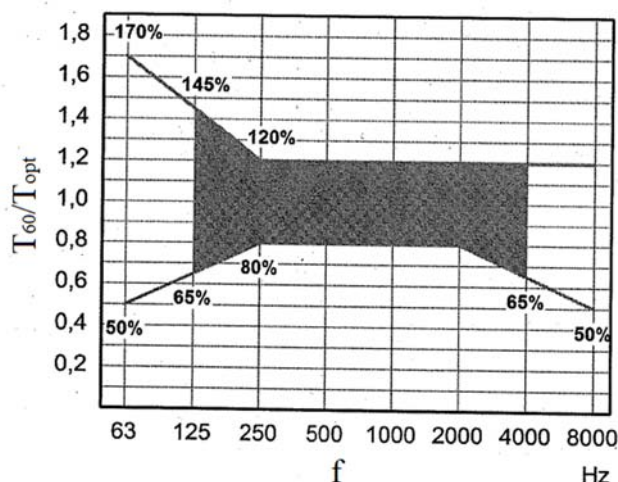
Namembnost:	Optimalen odmevni čas:	Volumen prostora:
1. glasba	$T_{60,1} = \left(0,45 \log \frac{V}{m^3} + 0,07\right) s$	$30 m^3 \leq V < 1000 m^3$
2. govor/predavanja	$T_{60,1} = \left(0,37 \log \frac{V}{m^3} - 0,14\right) s$	$50 m^3 \leq V < 5000 m^3$
3. pouk	$T_{60,1} = \left(0,32 \log \frac{V}{m^3} - 0,17\right) s$	$30 m^3 \leq V < 5000 m^3$
4. pogovor/aktiven pouk	$T_{60,1} = \left(0,26 \log \frac{V}{m^3} - 0,14\right) s$	$30 m^3 \leq V < 1000 m^3$
5. šport	$T_{60,1} = \left(0,75 \log \frac{V}{m^3} - 1,00\right) s$	$400 m^3 \leq V < 10000 m^3$

Slika 19: Optimalni odmevni čas glede na namembnost prostora [9].



Slika 20: Optimalen odmevni čas prostora v odvisnosti od volumna, upoštevajoč namembnost prostora [9].

Standard [9] določa tudi tolerančno območje, t.j. možno odstopanje od optimalnih vrednosti za oktavne pasove 125 Hz – 4000 Hz (Slika 21).



Slika 21: Tolerančno območje odmevnega časa [9].

3.3.4 Baza absorpcijskih koeficientov α

Baza podatkov o absorpcijskih lastnostih površin je pridobljena pretežno iz literature [10] in [11]. Podatki za absorpcijske koeficiente (α) površin (materialov površin sten, predmetov in ljudi v prostoru) obsegajo oktavne pasove od 125 Hz do 4000 Hz. V bazi podatkov osnovne verzije programa je zbranih več kot 120 različnih materialov, možen pa je vnos lastnih materialov in pripadajočih vrednosti α .

Poleg absorpcijskih koeficientov so iz literature [10] pridobljene tudi vrednosti konstante zvočne absorpcije zraka m pri temperaturi 20°C in konstantnem atmosferskem pritisku.

4.3 Navodila za uporabo

Navodila za uporabo programa *ARTIE* so glede na tematske sklope razdeljena na pet poglavij:

- Zasnova in delovanje programa,
- Odmevni čas analiziranega notranjega prostora,
- Uporabljeni materiali na površinah prostora in v notranjosti prostora,
- Lastne frekvence notranjega prostora,
- Koeficienti absorpcije notranjih površin prostora in predmetov ali oseb v prostoru.

3.3.5 Zasnova in delovanje programa

Program deluje v programskem okolju Microsoft Office Excel. Sestavljen je iz več zavihkov (*info, odmevni čas, uporabljeni materiali, lastne frekvence, koeficienti absorpcije in izpis*), do katerih uporabnik lahko dostopa. Zavihki so med seboj povezani, uporabnik vhodne podatke vnaša v prvi zavihke (odmevni čas), v ostalih pa se podatke pregleda, dodaja, zažene dodaten izračun ali ureja.

Vsi zavihki so zaščiteni in v programu so odklenjene le celice, ki so potrebne za vpis vhodnih podatkov. Te celice, v katere vnašamo vhodne podatke, so obarvane rumeno in opremljene z dodatnimi komentarji, za lažje razumevanje delovanja programa. V kolikor je vnos vhodnih podatkov pomanjkljiv, program uporabnika na to opozori z rdeče obarvanim tekstom ali celico. Zavihkek *odmevni čas* je tudi opremljen z gumbom, ki omogoča izpis rezultatov v obliki PDF.

V nadaljevanju bo delovanje programa predstavljeno po zavihkih programa (**Error! Reference source not found.**).



Slika 22: Zavihki programa ARTIE.

3.3.6 Odmevni čas

Zavihkek ODMEVNI ČAS je sestavljen iz dveh delov: VHODNI PODATKI in REZULTATI (Slika 23). V sklopu zavihka poteka vnos podatkov o obravnavanem prostoru in izračun odmevnega časa po dveh enačbah in v različnih stanjih.

Prvi del – **VHODNI PODATKI** predstavlja glavni vmesnik za uporabnika. Na sliki 23 so območja v katera uporabnik vpisuje podatke o prostoru razdeljena na 4 sklope:

- (1) Podatki o projektu: namen in opis projekta,
- (2) Podatki o prostoru: dimenzije prostora, zasedenost volumna z opremo, število ljudi v prostoru, relativna vlažnost zraka in namembnost prostora.
- (3) Površine v prostoru: izbere se vrsta materiala, sam material in površina,
- (4) Dodane absorpcijske površine: izbere se vrsta absorpcijskega materiala in površina.

Sklop (1) je namenjen opisu trenutnega projekta ter v kak namen se izračuni opravljajo. Vnos v polji »Namen« in »Opis« je popolnoma poljuben in ne vpliva na proces izračuna, ki sledi.

RAČUN ODMEVNEGA ČASA (5) [Natisni v PDF](#)

VHODNI PODATKI:

Namen (1) Test

Opis (1) ...

Dimenzije prostora: $\delta = 7,00$ m, $d = 10,00$ m, $v = 3,00$ m, $V' = 210,00$ m³ (2)

zasedenost volumna z opremo: 2%

končni volumen prostora: $V = 205,80$ m³

temperatura prostora: $T = 20$ °C

relativna vlažnost zraka: $RH = 50$ %

št. ljudi v prostoru: $N = 30$

namembnost prostora: pouk/pogovor

površine v prostoru:

vrsta površine	material	Površina
1. tla	parket na betonski podlagi	80,0 m ²
2. stena/strop	barvan omet	108,0 m ²
3. stena/strop	mavčne plošče na okvirju, 2x13mm, 5cm zrač. prostora z min. volno, barvana površ.	10,0 m ²
4. stavišno pothlivo	maska ventilacijskega jaška	0,2 m ²
5. stavišno pothlivo	običajno steklo za okna	10,0 m ²
6. stavišno pothlivo	masivna lesena vrata	6,0 m ²
7. oprema	leseni ali kovinski stoli (št. stolov)	30,0 m ²
8. lastni materiali	material 1	2,0 m ²
9. lastni materiali		m ²
10.		m ²
11.		m ²
12.		m ²
13.		m ²
14.		m ²
15.		m ²
16.		m ²

Dodani absorpcijski elementi (3)

vrsta površine	material	Površina
1. absorpcijski material	mineralna volna 5 cm (40 kg/m ³), lepjena na podlago, s tankoslojnim ometom	30,0 m ²
2. absorpcijski material	paneli iz steklenih vlaken 5.1 cm, v plastičnem ovoju, prekriti s perforirano kovino	10,0 m ²
3. absorpcijski material	mineralna volna 5 cm (70 kg/m ³), 30 cm odmaknjena od stene	10,0 m ²
4. absorpcijski material	mikroperforirani absorberji - 40cm volnine	20,0 m ²
5.		m ²
6.		m ²
7.		m ²
8.		m ²

REZULTATI: (6)

Odmevni čas prostora:

odmevni čas [s]	frekvenčni pasovi [Hz]						Povprečen koeficient absorpcije, α_{vse}
	125	250	500	1000	2000	4000	
Osnova	$T_{\text{os.a}}$ 1,26	1,48	1,46	1,31	1,30	1,14	0,08
$T_{\text{os.bv}}$	1,21	1,44	1,43	1,28	1,30	1,27	
Osnova + Ljudje	$T_{\text{os.a}}$ 1,00	0,97	0,93	0,86	0,85	0,78	0,10
$T_{\text{os.bv}}$	0,95	0,92	0,89	0,82	0,83	0,81	
Osnova + Absorpcija	$T_{\text{os.a}}$ 0,62	0,49	0,51	0,52	0,51	0,51	0,16
$T_{\text{os.bv}}$	0,58	0,45	0,47	0,48	0,47	0,50	
Osnova + Ljudje + Absorpcija	$T_{\text{os.a}}$ 0,55	0,42	0,43	0,43	0,42	0,42	0,19
$T_{\text{os.bv}}$	0,50	0,38	0,38	0,39	0,38	0,40	

Optimalen odmevni čas: $T_{\text{opt}} = 0,46$ s po standardu DIN 18041 Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design

(7)

Slika 23: Zavihek ODMEVNI ČAS: (1) Podatki o projektu, (2) podatki o prostoru, (3) površine v prostoru, (4) dodani absorpcijski materiali, (5) gumb za izpis v PDF, (6) tabelarni in (7) grafični prikaz rezultatov.

Sklop (2) vsebuje podatke o prostoru. Program je namenjen analizi pravokotnih prostorov, to je prostorov, v obliki kvadra, s širino, dolžino in višino. Dimenzije prostora se tako poda v obliki širine δ , dolžine d in višine v prostora, program nato izračuna volumen V' . Ker običajno analiziramo prostore, ki so opremljeni, podamo tudi odstotek *zasedenosti volumna z opremo*. V primeru tipičnih, pravokotnih prostorov, z dokaj enakomerno razporeditvijo absorpcijskega materiala velja, da je odstotek zasedenosti volumna venomer manjši od 20 %, v primeru malo- ali nezasedenih prostorov pa manjši od 5 % [5]. Ko je odstotek zasedenosti volumna določen, se izračuna dejanski volumen prostora V . Za izračun odmevnega časa je potrebno definirati tudi temperaturo in relativno vlažnost zraka v prostoru. Ker obravnavamo bivalne prostore, se za temperaturo predpostavi 20°C, relativno vlažnost prostora RH pa uporabnik izbere iz spustnega seznama.

V zadnji vrstici sklopa (2) se določi še število ljudi N , ki se nato upošteva pri računu odmevnega časa zasedenega prostora ter *namembnost prostora*. Pri določanju namembnosti obravnavanega prostora je na voljo 5 različnih namembnosti:

- glasba (glasbene učilnice, vadbeni prostori..),
- govor/predavanja (predavalnice, prostori namenjeni enemu govorniku),
- pouk (učilnice, predavalnice... prostori namenjeni govorniku z majhno stopnjo komunikacije med prisotnimi),
- pouk/pogovor (učilnice, igralnice, pisarne... prostori namenjeni pogovoru med skupinami ljudi),
- šport (športne dvorane, športne učilnice..).

V kolikor primerjava z optimalnimi vrednostmi [9] v sklopu grafičnega prikaza rezultatov (Slika 23: (7)) ni potrebna oziroma je nezaželena je možno celico pustiti prazno. V tem primeru se tolerančno območje na grafu ne bo izrisalo.

Sklopa (3) in (4) sta namenjena določitvi materialov v prostoru. V sklopu (3) se določi osnovne materiale, kot so površine sten, tal, stropa in stalne opreme v prostoru. Možno je določiti 16 različnih materialov. Nabor materialov se deli na glede na vrsto površine in sicer: *tla, stene/strop, stavbno pohištvo, oprema, absorpcijski material, razno, lastni materiali*. V prvem stolpcu tako uporabnik najprej izbere vrsto površine. Nato lahko izbere konkreten material iz spustnega seznama v drugem stolpcu, ter mu pripiše pripadajočo površino v kvadratnih metrih (tretji stolpec). Materiali, ponujeni v sklopu spustnega seznama, se glede na izbrano vrsto površine razlikujejo, zato spreminjanje vrste površine (prvi stolpec) ni mogoče, ko je material (drugi stolpec) že izbran – takrat se izbrana vrsta površine obarva sivo (Slika 24: (1)). Če celico, v kateri je vpisan izbrat material izbrišemo, je izbira vrste površine spet mogoča – tekst je obarvan črno (Slika 24: (2)). V kolikor uporabnik izbere vrsto površine: *lastni materiali*, mora le te definirati v zavihku *koeficient absorpcije* (poglavje 3.3.9).

površine v prostoru:

vrsta površine	material	Površina
1. tla (1)	parket na betonski podlagi	80,0 m ²
2.	barvani omet	108,0 m ²
3. stene/strop	mavčne plošče na okvirju, 2x13mm, 5cm zrač. prostora z min. volno, barvana površ.	m ²
4. stavbno pohištvo		0,2 m ²
5. oprema (2)		m ²
6.		m ²
7.		m ²

✓ pravilno izpolnjen vnos površine
 ✗ pomankljivo izpolnjeni vnosi površin

Slika 24: Določanje površin v prostoru: V prvi vrstici je prikazan pravilen vnos površine v prostoru, medtem ko so ostali vnosi pomankljivo izpolnjeni – manjka podatek o vrsti površine (druga vrstica), površini (tretja vrstica) ali materialu (četrt vrstica). Ko je material že izbran, spreminjanje vrste površine ni več mogoče in se le-ta obarva sivo (1). V primeru, da je celica z materialom prazna, je vrsta površine obarvana črno (2) in jo je možno spreminjati.

V primeru, da je vnos materialov v razpredelnico nepopoln (manjka podatek o vrsti površine, materialu ali površini), se okence v tretjem stolpcu obarva rdeče. Nepopolno izpolnjene vrstice se v končnem računu ne upoštevajo, vendar se izpišejo v PDF obliko, zato je pred izpisom pomembno preveriti, ali je razpredelnica pravilno izpolnjena.

Sklop (4) deluje enako kot sklop (3), le da je tokrat možen vnos le absorpcijskih ali lastnih materialov. Možno je dodati do 8 različnih absorpcijskih materialov. Uporabnik kot vrsto površine izbere absorpcijski material ali lasten material, ki ga doda v zavihku *koeficienti absorpcije* (poglavje 3.3.9). Nato izbere konkreten material iz spustnega seznama ter mu pripiše površino v m².

V drugem delu zavihka so predstavljeni **REZULTATI** računa odmevnega časa. Zavihek je sestavljen iz treh sklopov označenih na sliki 23:

- (5) Gumb za izpis podatkov in izračuna v PDF obliko,
- (6) Izračun odmevnih časov po oktavnih pasovih od 125 Hz do 4000 Hz in povprečnega koeficienta absorpcije v različnih stanjih prostora, izračun optimalnega odmevnega časa.
- (7) Grafični prikaz odmevnega časa v različnih stanjih prostora v primerjavi s tolerančnim območjem.

V **sklopu (6)** so tabelarično izpisane vrednosti odmevnega časa v oktavnih pasovih od 125 Hz do 4000 Hz. Vrednosti so izračunane po dveh enačbah: Sabinovi ($T_{60,S}$) in Eyring-Norrisovi ($T_{60,Ey}$) in upoštevajo 4 različna stanja prostora:

- *Osnova*: osnovno stanje prostora, upoštevajo se vsi (pravilno izpolnjeni) podatki o površinah v prostoru (sklop (3)) za nezaseden prostor.
- *Osnova + Ljudje*: osnovno stanje prostora, upoštevajo se vsi (pravilno izpolnjeni) podatki o površinah v prostoru (sklop (3)) za zaseden prostor.
- *Osnova + Absorpcija*: upoštevajo se vsi podatki o površinah v prostoru (sklop (3)) in dodanih absorpcijskih elementih (sklop (4)) za nezaseden prostor.
- *Osnova + Ljudje + Absorpcija*: upoštevajo se vsi podatki o površinah v prostoru (sklop (3)) in dodanih absorpcijskih elementih (sklop (4)) za zaseden prostor – najvišja absorpcija prostora.

Za vsa stanja je izračunan *povprečen koeficient absorpcije* α_{skupaj} . V primeru, ko je $\alpha_{skupaj} < 0,20$ je bolj primeren izračun po Sabinovi enačbi, zato so vrednosti $T_{60,S}$ zapisane v odebeljeni pisavi. Ko je $\alpha_{skupaj} > 0,20$ pa je primernejši izračun po Eyring-Norrisovi enačbi in so te vrednosti odebeljene.

Različna stanja prostora so v tabeli ločijo po barvah (vijolična, modra, rdeča, oranžna), katere so uporabljene v sklopu (7) pri grafičnem izrisu rezultatov.

Pod tabelo odmevnih časov prostora je izpisan tudi *optimalni odmevni čas* glede na izbrano namembnost prostora v sklopu (2). Optimalni odmevni čas se nanaša na oktavna pasova 500 Hz in 1000 Hz [9], tolerančno območje, izračunano na podlagi optimalnega odmevnega časa (Slika 21) pa zavzema oktavne pasove 125 Hz – 4000 Hz in je izrisano na grafu (sklop (7)).

Sklop (7) predstavlja grafični prikaz rezultatov računa odmevnega časa v frekvenčnem območju od 125 Hz do 4000 Hz. Prikazani so rezultati iz tabele (sklop (6)) v primerjavi s tolerančnim območjem. Glede na stanje prostora, se rezultati ločijo po barvah in sicer:

- | | |
|---------------------------------------|-----------|
| – <i>Osnova</i> | vijolična |
| – <i>Osnova + Ljudje</i> | modra |
| – <i>Osnova + Absorpcija</i> | rdeča |
| – <i>Osnova + Ljudje + Absorpcija</i> | oranžna |

Pri tem velja, da so vrednosti odmevnega časa izračunane po Sabinovi enačbi izrisane s polno črto, vrednosti izračunane po Eyring-Norrisovi enačbi pa s prekinjeno črto.

Tolerančno območje odmevnih časov za izbrano namembnost je na grafu prikazano s črnima črtama: polno za zgornjo mejo in prekinjeno za spodnjo mejo območja.

Izpis podatkov v obliko PDF je omogočen s pritiskom na gumb v zgornjem desnem robu zavihka (Slika 23: (5)). Ob pritisku na gumb se pojavi okence za shranjevanje datotek, kjer uporabnik datoteki dodeli ime in jo shrani na željeno mesto. Shranjena datoteka vsebuje:

- vhodne podatke,
- rezultate računa odmevnega časa,
- absorpcijske lastnosti materialov in
- račun lastnih frekvenc prostora.

3.3.7 Uporabljeni materiali

V zavihku UPORABLJENI MATERIALI je možen pregled absorpcijskih lastnosti materialov, izbranih v sklopu akustične analize izvedene v zavihku ODMEVNI ČAS. Materiali se delijo na enake sklope kot v zavihku ODMEVNI ČAS, to so površine v prostoru (Slika 25: (1)) in dodani absorpcijski materiali (Slika 25: (2)), poleg tega pa so prikazane tudi vrednosti absorpcije ljudi (Slika 25: (3)).

ABSORPCIJSKE LASTNOSTI MATERIALOV (5)																																																																	
površine v prostoru:																																																																	
material	absorpcijski koeficient (α)						površina [m ²]	ekvivalentna absorpcijska površina (A)																																																									
	frekvenčni pasovi [Hz]							frekvenčni pasovi [Hz]																																																									
	125	250	500	1000	2000	4000	S	125	250	500	1000	2000	4000																																																				
1. parket na betonski podlagi	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	80	3,2	3,2	5,6	4,8	4,8	5,6																																																				
2. barvani omet	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	108	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16																																																				
3. mavčne plošče na okvirju, 2x13mm, 5cm zrač. prostora z min. volno, barvana površ.	0,15	0,1	0,06	0,04	0,04	0,05	80	12	8	4,8	3,2	3,2	4																																																				
4. maska ventilacijskega jaška	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,2	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12																																																				
5. običajno steklo za okna	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	10	3,5	2,5	1,8	1,2	0,7	0,4																																																				
6. masivna lesena vrata	0,14	0,1	0,06	0,08	0,1	0,1	6	0,84	0,6	0,36	0,48	0,6	0,6																																																				
7. leseni ali kovinski stoli (št. stolov)	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,3	30	4,5	5,7	6,6	11,7	11,4	9																																																				
8. material 1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	2	0,2	1	1	1	1	1,8																																																				
9.																																																																	
10.																																																																	
11.																																																																	
12.																																																																	
13.																																																																	
14.																																																																	
15.																																																																	
16.																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Povprečen α:</th> <th colspan="3">Skupna S</th> <th colspan="3">Skupna A:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,228</td><td>0,313</td><td>0,331</td><td>0,299</td><td>0,299</td><td>0,263</td> <td>70,0</td><td>27,80</td><td>44,60</td><td>42,80</td><td>38,70</td><td>40,20</td><td>36,60</td> </tr> </tbody> </table>													Povprečen α :						Skupna S			Skupna A:			0,228	0,313	0,331	0,299	0,299	0,263	70,0	27,80	44,60	42,80	38,70	40,20	36,60																												
Povprečen α :						Skupna S			Skupna A:																																																								
0,228	0,313	0,331	0,299	0,299	0,263	70,0	27,80	44,60	42,80	38,70	40,20	36,60																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">absorpcijski koeficient (α)</th> <th rowspan="2">površina [m²]</th> <th colspan="6">ekvivalentna absorpcijska površina (A)</th> </tr> <tr> <th colspan="6">frekvenčni pasovi [Hz]</th> <th colspan="6">frekvenčni pasovi [Hz]</th> </tr> <tr> <th></th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> <th>S</th> <th>125</th> <th>250</th> <th>500</th> <th>1000</th> <th>2000</th> <th>4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1. oseba - sedi</td> <td>0,23</td><td>0,37</td><td>0,44</td><td>0,45</td><td>0,45</td><td>0,45</td> <td>30</td> <td>6,9</td><td>11,1</td><td>13,2</td><td>13,5</td><td>13,5</td><td>13,5</td> </tr> </tbody> </table>													absorpcijski koeficient (α)						površina [m ²]	ekvivalentna absorpcijska površina (A)						frekvenčni pasovi [Hz]						frekvenčni pasovi [Hz]							125	250	500	1000	2000	4000	S	125	250	500	1000	2000	4000	1. oseba - sedi	0,23	0,37	0,44	0,45	0,45	0,45	30	6,9	11,1	13,2	13,5	13,5	13,5
absorpcijski koeficient (α)						površina [m ²]	ekvivalentna absorpcijska površina (A)																																																										
frekvenčni pasovi [Hz]							frekvenčni pasovi [Hz]																																																										
	125	250	500	1000	2000	4000	S	125	250	500	1000	2000	4000																																																				
1. oseba - sedi	0,23	0,37	0,44	0,45	0,45	0,45	30	6,9	11,1	13,2	13,5	13,5	13,5																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Povprečen α:</th> <th colspan="3">Skupna S</th> <th colspan="3">Skupna A:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,158</td><td>0,205</td><td>0,203</td><td>0,199</td><td>0,201</td><td>0,191</td> <td>386,2</td><td>61,02</td><td>78,98</td><td>78,24</td><td>76,86</td><td>77,68</td><td>73,78</td> </tr> </tbody> </table>													Povprečen α :						Skupna S			Skupna A:			0,158	0,205	0,203	0,199	0,201	0,191	386,2	61,02	78,98	78,24	76,86	77,68	73,78																												
Povprečen α :						Skupna S			Skupna A:																																																								
0,158	0,205	0,203	0,199	0,201	0,191	386,2	61,02	78,98	78,24	76,86	77,68	73,78																																																					

Slika 25: Zavihek UPORABLJENI MATERIALI: (1) površine v prostoru, (2) dodane absorpcijske površine, (3) absorpcija ljudi, (4) skupne vrednosti.

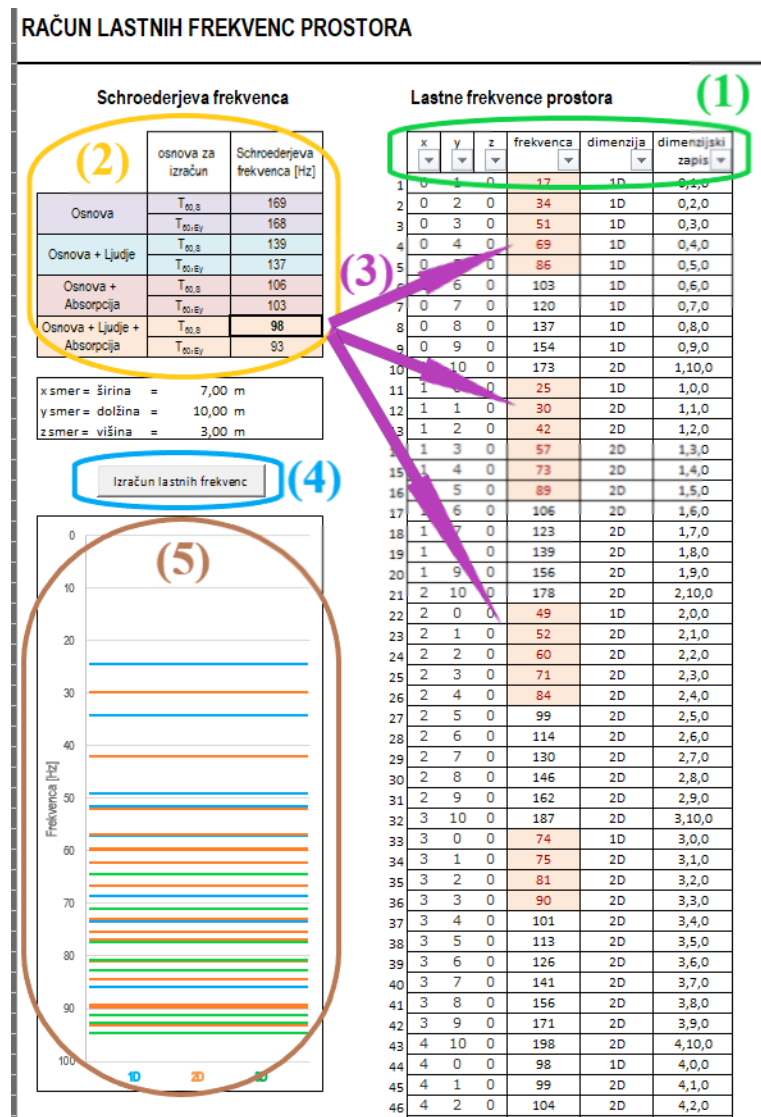
Za vsak material so izpisane vrednosti absorpcijskega koeficienta α , površine S in ekvivalentne absorpcijske površine A (Slika 25: (5)). vrednosti α in A so podane v frekvenčnem območju od 125 Hz do 4000 Hz. Ob koncu vsakega sklopa materialov so izračunane povprečne vrednosti α ločeno po oktavnih pasovih ter seštevke S in seštevke A ločeno po oktavnih pasovih (Slika 25: (6)). Na koncu so te vrednosti izračunane tudi skupaj, za vse materiale, predmete in ljudi v prostoru (Slika 25: (4)).

3.3.8 Lastne frekvence

Zavihek LASTNE FREKVENCE vsebuje izračun Schroederjeve frekvence in prvih 1330 lastnih frekvenc prostora.

Schroederjeve frekvence (Slika 26: (2)) program izračuna na podlagi enačbe (2), kjer upošteva povprečje vrednosti odmevnih časov v oktavnih pasovih od 125 Hz do 4000 Hz. Po dve Schroederjevi frekvenci sta izračunani za vsa stanja prostora (Osnova, Osnova + Ljudje, Osnova + Absorpcija, Osnova + Ljudje

+ *Absorpcija*), prva na podlagi odmevnih časov izračunanih po Sabinovi enačbi ($T_{60,s}$), druga pa na podlagi odmevnih časov izračunanih po Eyring-Norrisovi enačbi ($T_{60,Ey}$).



Slika 26: Zavihek LASTNE FREKVENCE: (1) razvrščanje lastnih frekvenc prostora glede na dane parametre, (2) izračunane Schroederjeve frekvence za različna stanja prostora, (3) lastne frekvence, ki so pod Schroederjevo frekvenco prostora so barvno označene, (4) gumb za izračun lastnih frekvenc prostora (5) graf lastnih frekvenc prostora.

Ker Schroederjeva frekvenca predstavlja mejo, do katere je lastne frekvence prostora smiselno upoštevati, so lastne frekvence, ki padejo pod Schroederjevo frekvenco (v stanju prostora Osnova + Ljudje + Absorpcija in na podlagi $T_{60,s}$) obarvane rdeče (Slika 26: (3)) in so tudi prikazane na grafu (Slika 26: (5)).

Lastne frekvence prostora se izpišejo ob pritisku na gumb »Izračun lastnih frekvenc« (Slika 26: (4)). Poleg lastnih frekvenc je navedena tudi dimenzija, torej enodimenzijska (1D), dvodimenzijska (2D) oziroma trodimenzijska (3D) lastna frekvenca in pa dimenzijski zapis. Dimenzijski zapis prikaže, v kateri smeri se lastna frekvenca pojavi (x = širina, y = dolžina, z = višina) ter pri katerem mnogokratniku

$\frac{1}{2}$ valovne dolžine ($x, y, z = 1, 2, 3 \dots$). Lastne frekvence je možno glede na omenjene karakteristike tudi razvrščati (Slika 26: (1)). Ob pritisku na gumb »Izračun lastnih frekvenc« se izriše tudi graf lastnih frekvenc ki padejo od Schroderjevo mejno frekvenco (Slika 26: (5)). Izrisane frekvence se delijo po njihovi dimenziji (1D, 2D in 3D) in v grafični obliki omogočajo pregled gostote lastnih frekvenc na določenih frekvenčnih območjih.

3.3.9 Koeficienti absorpcije

V zavihku KOEFICIENTI ABSORPCIJE je možen vpogled v bazo podatkov o materialih, med katerimi lahko uporabnik izbira v sklopu zavihka ODMEVNI ČAS. Baza podatkov obsega več kot 120 različnih materialov in pripadajočih koeficientov absorpcije α podanih v oktavnih pasovih od 125 Hz do 4000 Hz (Slika 27: (3)). Uporabnik ima možnost tudi dodati lastne materiale, katere lahko nato uporabi v zavihku ODMEVNI ČAS in jih umesti v notranji prostor, ki je predmet analize. Nove dodane materiale lahko poljubno poimenuje (Slika 27: (1)) in jim pripiše koeficiente absorpcije v odvisnosti od oktavnih pasov (Slika 27: (2)).

absorpcijski koeficient α										
		frekvenčni pasovi								
material		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
LASTNI MATERIALI	material 1	0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,9	1	
	material 2									
	material 3									
	material 4									
	material 5									
	material 6									
	material 7									
	material 8									
	material 9									
	material 10									
TLA	parket na betonski podlagi	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07			
	marmorne ali steklene ploščice	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02			
	lesena/linolej/gumjasta tla	0,02	0,04	0,05	0,05	0,1	0,05			
	beton	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02			
	tanka preproga na betonu	0,02	0,04	0,08	0,2	0,35	0,4			
	težka preproga na betonu	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65			
	les na trdni podlagi	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02			
	lesena tla	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07			
	lesena tla nad večjim zračnim prostorom	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1			
	linolej, asfaltna plošča, plošča iz plute na betonu	0,02	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05			

Slika 27: Zavihek KOEFICIENTI ABSORPCIJE: (1) ime dodanega materiala, (2) koeficienti absorpcije po oktavnih pasovih, (3) baza podatkov.

5 Literatura

- [1] Šubic, N. 2017. Izboljšanje akustične klime prostorov v vzgojno varstvenih ustanovah z upoštevanjem psihofizičnega odziva uporabnikov. Magistrsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Šubic): 91 str.
- [2] Rossing, T.D. 2007. Springer handbook of acoustics. New York, Springer Science+Business Media: str. 305, 394/395.
- [3] Everest, F.A., Pohlmann, K.C. 2009. Master Handbook of Acoustics. Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc.: str. 1-5, 46, 99, 152, 169, 223-231
- [4] Mommertz, E. 2008. Acoustics and Sound Insulation. Munich, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation: str. 7-15.
- [5] Ermann, M. 2015. Architectural acoustics illustrated. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc.: str. 19-22, 26, 62.
- [6] Kunič, R. 1986. Akustika stavbe, prostora in akustična izolacija. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Kunič): 103 str.
- [7] Tehnična smernica TSG-1-005:2012 : Zaščita pred hrupom v stavbah.
- [8] Howard, D., Angus, J. 2009. Acoustics and Psychoacoustics. Forth Edition. Oxford, Elsevier Ltd.: str. 95-104, 322-327, 336-346.
- [9] Nemški standard DIN 18041: 2015; Acoustic quality in rooms – Specifications and instructions for room acoustic design: str. 10-12.
- [10] Cox, T. J., D'Antonio, P. 2017. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application. 3rd edition. Oxon. Taylor & Francis: str. 104, 175-180, 475-479.
- [11] Bies, D.A., Hansen, C.H., 2003, Engineering noise and control: theory and practice, 3rd ed. Spon Press, str 303-305.
- [12] Jacobsen, F., Poulsen, T., Rindel, J.H., Gade, A.C., Ohlrich, M. 2009. Fundamentals of acoustics and noise control. Denmark, Technical University of Denmark: str. 17, 19.
- [13] Cowan, J.P. 2016. The effects of sound on people. West Sussex, United Kingdom. John Wiley & Sons, Inc.: str. 25.
- [14] ISO 3382-2:2008: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [15] Huges, W.O., McNelis, A.M., Nottoli, C., Wolfram, E., 2015. Examination of the measurement of absorption using the reverberant room method for highly absorptive acoustic foam. 29th Aerospace Testing Seminar.