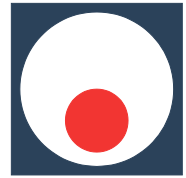




УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО
И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ



мр Бранко С. Радичевић

РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА ЗА ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ
СМЕШЕ ЗВУЧНО АПСОРПЦИОНИХ МАТЕРИЈАЛА

Докторска дисертација

Краљево, 2016.

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

I. АУТОР	
Име и презиме:	мр Бранко Радичевић
Датум и место рођења:	29.1.1966., Краљево, Србија
Садашње запослење:	Факултет за машинство и грађевинарство Универзитета у Крагујевцу
II. ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА	
Наслов:	РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА ЗА ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ СМЕШЕ ЗВУЧНО АПСОРПЦИОНИХ МАТЕРИЈАЛА
Број страница:	291
Број слика:	156
Број библиографских података:	151
Установа и место где је рад изра- ђен:	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу
Научна област (УДК):	621.7; 519.816; 681.8
Ментор:	др Милан Коларевић , ванредни професор
III. ОЦЕНА И ОДБРАНА	
Датум пријаве теме:	24.4.2013. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	332/8 од 12.6.2013. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	др Миомир Мијић , редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
	др Душко Минић , ванредни професор, Факултет техничких наука у Косовској Митровици
	др Милан Коларевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Зоран Петровић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Мирко Ђапић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Комисија за оцену и одбрану док- торске дисертације:	др Миомир Мијић , редовни професор, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
	др Момир Прашчевић , редовни професор, Факултет заштите на раду Универзитета у Нишу
	др Душко Минић , редовни професор, Факултет техничких наука у Косовској Митровици
	др Миомир Вукићевић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
	др Мирко Ђапић , ванредни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву
Датум одбране дисертације:	

ПРЕДГОВОР

Истраживање обухваћено докторском дисертацијом реализовано је на Универзитету у Крагујевцу, Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, на Катедри за производно машинство и представља резултат вишегодишњег научног и стручног усавршавања у оквиру Центра за одржавање, квалитет и техничку дијагностику.

Захваљујем се:

проф. др Милану Коларевићу, професору Универзитета у Крагујевцу, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, мом ментору, на стручној помоћи и разумевању током израде докторске дисертације. Хвала за пажњу, савете, енергију и изузетно залагање у свим фазама израде докторске дисертације,

проф. др Миомиру Мијићу са Електротехничког факултета у Београду на саветима и сугестијама у области акустике. Његова помоћ приликом обављања експерименталног дела дисертације у Лабораторији за акустику Електротехничког факултета у Београду, битно је усмерила даљи ток ове докторске дисертације,

проф. др Момиру Прашчевићу, професору Универзитета у Нишу, Факултета заштите на раду, на помоћи и саветима током израде дисертације,

проф. др Душку Минићу, професору Универзитета у Приштини Факултета техничких наука у Косовској Митровци на помоћи око реализације дела експерименталних истраживања,

проф. др Златану Шошкићу, професору Универзитета у Крагујевцу, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, руководиоцу пројекта „Развој методологија и средстава за заштиту од буке урбаних средина“ Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, на финансијској и другој подршци током израде дисертације,

свим колегама са Факултета за машинство у грађевинарство Универзитета у Крагујевцу а посебно колегама са Катедре за производно машинство, који су својом помоћи, саветима и сугестијама допринели у мом досадашњем професионалном раду,

предузећима Тигар АД „Тигар техничка гума“ – Пирот и „Вапекс“ д.о.о. – Чачак, на изради узорака за испитивање,

СЗР „Иван Станојевић“ – Крагујевац, на изради и донацији мерне ћелије за потребе истраживања,

мојим родитељима Стојни и Славку, супрузи Горици, синовима Александру и Антонију за неизмерну помоћ, стрпљење и разумевање током израде докторске дисертације.

Краљево, 2016.

Бранко Радичевић

РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА ЗА ИЗБОР ОПТИМАЛНЕ СМЕШЕ ЗВУЧНО АПСОРПЦИОНИХ МАТЕРИЈАЛА

Резиме

Бука је последњих деценија један од основних узрока комплексног оштећења здравља становништва, посебно у индустријски развијеним земљама. Све већи обим индустријске производње, све бројније и брже саобраћајне везе и све шира примена машина и уређаја у комуналној средини, као и многи други фактори који људима омогућују удобнији живот, истовремено доводе и до своје негације која се испољава у облику озбиљног угрожавања човековог здравља. Борба против буке и њеног штетног дејства део су напора који се чине за побољшање услова живота и за заштиту животне и радне средине нарочито у густо насељеним подручјима.

Један од начина за смањење нивоа буке је примена апсорпционих материјала који апсорбују део енергије звука и карактеришу се коефицијентом апсорпције као фреквенцијски зависном величином. Осим потребе да се апсорбују различити делови фреквенцијског октавног спектра коју дају различити извори буке при избору апсорпционих материјала треба водити рачуна и о другим неакустичким захтевима као што су: изглед, животни век, безбедност, могућност одржавања, могућност коришћења рециклираних отпадних материјала, цена, могућност поновне рециклаже након истека периода коришћења и др.

У раду је формиран Модел одлучивања за избор оптималне варијанте звучно апсорпционих материјала и њихових смеша који се могу користити за заштиту од буке, било да је у питању решење проблема буке у индустријским погонима, концертним дворанама или на отвореном простору поред друмских и железничких саобраћајница. Модел се заснива на вишекритеријумском одлучивању у коме су алтернативе рангиране према акустичким и неакустичким параметрима. Пошто се звучно апсорпциони материјали користе за заштиту од буке у животној средини, критеријуми за њихов избор који се односе на безбедност и здравље људи имају апсолутни приоритет, тако што су елиминаторни за материјале који их не испуњавају. На конкретном примеру заштите од саобраћајне буке, одабрана је и имплементирана оптимална алтернатива за избор апсорпционог материјала за израду звучне баријере, узимајући у обзир карактеристике буке на местима извора и баријере.

Вишекритеријумска оптимизација је ретко заступљена у научној литератури као метода за избор оптималног решења апсорпционих материјала и њихових смеша. Основни проблем је немогућност генерисања великог броја поузданих алтернатива на основу акустичких захтева. У циљу решавања наведеног проблема, у раду су развијени алгоритми за формирање макроскопских емпиријских модела и стохастичких модела порозних материјала. Мерење коефицијента апсорпције је извршено према метода СРПС ЕН ИСО 10534-2. За одређивање подужне отпорности струјању ваздуха испројектован је и реализован мерни систем са константним протоком ваздуха према методи СРПС ИСО 9053. Предложена је нова метода за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха, чије се предвиђање у односу на стандардну методу разликује за 1.8%, што је мање од дозвољене вредности од 15% из научне литературе.

Користећи методу најмањих квадрата предложен је нов емпиријски модел за одређивање акустичких особина полиуретанских пена мале густине. У односу на најтачнији познати емпиријски модел Dunn & Davern за полиуретанске пене, применом новог модела остварено је смањење средње апсолутне и средње релативне грешке коефицијента звучне апсорпције за 48,3% и 35,4% респективно.

Применом методологије која је оформљена на примеру полиуретанских пена мале густине, формиран су модели за зрнасте материјале. Истраживани су узорци рециклиране гуме, рециклиране пластике и песка и све смеше њихових међусобних комбинација. Одступања коефицијента апсорпције добијена применом ново предложених модела у односу на мерења у импедансној цеви се крећу у границама од 2,13% до 3,84%, што је веома добро у поређењу са најчешће коришћеном граничном вредношћу од 10% из научне литературе.

Формирани су и стохастички модели за исте апсорпционе материјале. Израда ових модела је заснована на АНОВА анализи. Стохастички модели представљају полиномске функције вишег степена и због тога су сложенији у односу на емпиријске моделе. Тачност предвиђања коефицијента апсорпције ових модела је јако висока, јер је апсолутна грешка коефицијента апсорпције мања од 1%.

Овако формиран емпиријски и стохастички модели омогућавају израду базе знања о апсорпционим својствима материјала. Оваква база је отворена и увек се може проширити са новим моделима и материјалима. Ново формиран модели представљају поуздану основу за генерисање алтернатива за избор звучно апсорпционих материјала и њихових смеша и као такве се могу користити у моделу одлучивања за решавање конкретних проблема заштите од буке, уместо скупих експерименталних испитивања.

Кључне речи: модел одлучивања, звучно апсорпциони материјали, макроскопски емпиријски модели, стохастички модели, рециклирани материјали

DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING MODEL FOR THE SELECTION OF THE OPTIMAL MIXTURE OF SOUND ABSORBING MATERIALS

Abstract

In the last few decades, noise is one of the main causes of the population health damage, especially in industrialized countries. An increasing volume of industrial production, greater and faster traffic and a broader application of the machinery and equipment in the communal area, as well as many other factors that enable more comfortable life to us, leads to its negation, which is manifested in the form of a serious threat to human health. The fight against noise and its harmful effects are part of the efforts which are made in order to improve living conditions and to protect the living and working environment, especially in densely populated areas.

One way to reduce the noise level is the use of the absorbing materials which absorb some parts of the sound energy and which are characterized by the coefficient of absorption as a frequency - dependent variable. Besides the need for the absorption of different parts of the frequency octave spectrum which are produced by different sources of noise, there are some non-acoustic requirements which should be taken care of, such as: appearance, service life, safety, maintainability, the possibility of using recycled waste materials, cost, possibility of repeated recycling after the expiry date, etc.

The dissertation presents the development of a decision-making model for the selection of the optimal variant of sound absorbing materials and their mixtures which can be used for noise protection, thus solving possible noise problems in industrial plants, concert halls or in an open space by the roads and railway lines. The model is based on multi-criteria decision-making in which the alternatives are ranked according to acoustic and non-acoustic parameters. As sound absorbing materials are used for noise protection in the environment, the criteria for their selection which refer to safety and health of people are an absolute priority, and hence they are eliminatory for the materials which do not fulfil them. In a concrete example of traffic noise protection, the optimum alternative for the selection of absorbing material for production of a noise barrier was chosen and implemented, taking into account the characteristics of noise at the points of its source and the barrier.

Multi-criteria optimization is rarely present in the scientific literature as a method for the selection of the optimum solution of absorbing materials and their mixtures. The main problem is in the impossibility of generating a large number of reliable alternatives based on acoustic requirements. For the purpose of solving the mentioned problem, the dissertation presents the development of algorithms for creating empirical macroscopic models and stochastic models of porous materials. The measurement of absorption coefficients was performed according to the method SRPS EN ISO 10534-2. In order to determine airflow resistivity, a measurement system with constant airflow was designed and realized according to the method SRPS ISO 9053. A new method for determination of airflow resistivity whose prediction differs from the standard method by 1.8%, which is less than the allowed value of 15% from the scientific literature, was proposed.

A new empirical model for determination of acoustic properties of low-density polyurethane foams was proposed by using the method of least squares. In comparison with the empirical Dunn-

Davern model for polyurethane foams, which is known as most accurate so far, the application of the new model reduced the mean absolute error and the mean relative error of the sound absorption coefficient by 48.3% and 35.4%, respectively.

The models for granular materials were developed by means of the methodology created by using the example of low-density polyurethane foams. Samples of recycled rubber, recycled plastics and sand as well as all mixtures of their mutual combinations were examined. Deviations of the absorption coefficient obtained by applying the newly proposed models from the measurements in the impedance tube range between 2.13% and 3.84%, which is very good if compared with the most frequently used limit value of 10% from the scientific literature.

Stochastic models for the same absorbing materials were developed, too. The creation of these models was based on the ANOVA analysis. The stochastic models represent polynomial functions of higher degree and, therefore, they are more complex than the empirical models. The accuracy of predicting the absorption coefficient by these models is very high because the absolute error of the absorption coefficient is less than 1%.

The empirical and stochastic models developed in such a way enable the creation of a knowledge base of absorbing properties of materials. Such a base is open and can always be added by new models and materials. The newly developed models represent a reliable base for generating alternatives for the selection of sound absorbing materials and their mixtures, which can be used in the decision-making model for solving concrete problems of noise protection, instead of expensive experimental testing.

Key words: decision-making model, sound absorbing materials, empirical macroscopic models, stochastic models, recycled materials.

Садржај

СПИСАК ОЗНАКА	XII
СПИСАК СЛИКА	XVII
СПИСАК ТАБЕЛА.....	XXII
1. УВОД	1
1.1. Општа разматрања.....	2
1.2. Предмет докторске дисертације	2
1.3. Циљеви истраживања.....	3
1.4. Основне хипотезе.....	4
1.5. Методе истраживања	4
1.6. Значај истраживања	5
1.7. Приказ по поглављима.....	6
2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ ИСТРАЖИВАЊА	8
2.1. Увод	9
2.2. Коефицијент апсорпције.....	10
2.3. Апсорпциони материјали	14
2.4. Методе за мерење отпорности струјању ваздуха.....	18
2.4.1 Метода са сталним протоком ваздуха	18
2.4.2 Метода са променљивим протоком ваздуха	19
2.4.3 Основне величине и услови испитивања.....	19
2.5. Методе за мерење коефицијента апсорпције.....	22
2.5.1 Мерење коефицијента звучне апсорпције у Кунтовој цеви (SRPS U.J6.224)	22
2.5.2 Мерење коефицијента апсорпције у импедансној цеви - Метода помоћу стојећих таласа (SRPS EN ISO 10534-1:2008)	24
2.5.3 Мерење коефицијента апсорпције у импедансној цеви - Метода трансфер функције.....	26
2.5.4 Мерење звучне апсорпције у реверберационој комори према методи EN ISO 354	26
2.6. Модели	30
2.6.1 Модели за одређивање отпорности струјању ваздуха	30
2.6.2 Модели за одређивање акустичких особина порозних материјала	32
2.7. Вишекритеријумска оптимизација и друге методе у поступку избора апсорпционих материјала.....	47
3. ИСТРАЖИВАЊЕ АПСОРПЦИОНИХ СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА.....	48

3.1. Планирање истраживања	49
3.2. Методе и опрема	50
3.2.1 Одређивање коефицијента апсорпције звука и импедансе у Кунтовој цеви – Метода трансфер функције.....	50
3.2.2 Одређивање отпорности струјању ваздуха	54
3.3. Методологија обраде података	67
3.3.1 Методологија формирања стохастичких модела	67
3.3.1 Методологија формирања макроскопских емпиријских модела	72
3.4. Апсорпциона својства пенастих материјала	75
3.4.1 Припрема узорака и план експеримената.....	75
3.4.2 Резултати мерења.....	78
3.4.3 Обрада и анализа експерименталних резултата.....	90
3.5. Апсорпциона својства зрнастих материјала	105
3.5.1 Припрема узорака и план експеримената.....	105
3.5.2 Резултати мерења.....	107
3.5.3 Обрада и анализа експерименталних резултата.....	110
3.6. Апсорпциона својства смеше зрнастих материјала	119
3.6.1 Припрема узорака и план експеримента	119
3.6.2 Резултати мерења.....	123
3.6.3 Обрада и анализа експерименталних резултата.....	123
3.7. Апсорпциона својства вишеслојних зрнастих материјала	139
3.7.1 План експеримента	139
3.7.2 Резултати мерења.....	142
3.7.3 Обрада и анализа експерименталних резултата.....	142
3.8. Апсорпциона својства влакнастих материјала	148
3.8.1 Материјал	148
3.8.2 План експеримента	148
3.8.3 Резултати мерења.....	149
3.8.4 Обрада и анализа експерименталних резултата.....	151
4. РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА	156
4.1. Приступ развоју модела	157
4.2. Развој модела	159
4.2.1 Дефинисање проблема.....	159
4.2.2 Креирање модела	160
4.2.3 Решавање проблема.....	164
4.2.4 Имплементација решења.....	166

4.3. Избор алтернатива за заштиту од ускопојасне и тоналне буке [СРПС 1996-2]	167
4.3.1 Избор алтернатива из базе ПУ пена.....	167
4.3.2 Избор алтернатива из базе смеше зрнастих материјала.....	169
4.3.3 Избор алтернатива из базе вишеслојних зрнастих материјала	171
4.3.4 Избор алтернатива из базе влакнастих материјала	172
4.4. Утврђивање карактеристика звучне апсорпције и избор материјала за заштиту од широкопојасне саобраћајне буке	173
4.4.1 Друмски саобраћај као извор буке.....	173
4.4.2 Модели за прогнозу буке	174
4.4.3 Методе прорачуна саобраћајне буке	175
4.4.4 Интегрални модел за одређивање једнобројне вредности оцене звучне апсорпције $DL\alpha$	177
4.4.5 Избор материјала	186
4.5. Оцена звучне апсорпције и избор материјала који се користе за заштиту у зградама	187
4.5.1 Оцена звучне апсорпције материјала за заштиту од буке у зградама	187
4.5.2 Смернице за избор материјала за заштиту од буке у зградама.....	188
5. ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА.....	189
5.1. Идентификација проблема	190
5.2. Класификација проблема.....	194
5.3. Мерење буке и и фреквенцијска анализа.....	195
5.3.1 Мерење нивоа буке.....	195
5.3.2 Предвиђање нивоа буке према NAISS моделу	197
5.3.3 Предвиђање нивоа буке помоћу Модела за прорачун локалних мапа буке	198
5.3.4 Нормализација спектра саобраћајне буке	200
5.4. Декомпозиција проблема.....	201
5.5. Дефинисање „надлежности“	201
5.6. Дефинисање критеријума одлучивања.....	202
5.7. Генерисање алтернатива.....	205
5.8. Формирање модела одлучивања	207
5.9. Оцена и рангирање алтернатива	208
5.10. Анализа осетљивости.....	208
5.11. Избор оптималне алтернативе и предлог реализације пројекта.....	219
5.11.1 Технички опис пројектоване баријере	219
5.11.2 Ефекти заштите од буке остварени постављањем баријере.....	221

6. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	223
6.1. Дискусија остварених резултата	224
6.2. Закључак	225
6.3. Теоријске импликације	226
6.4. Практичне импликације	227
6.5. Ограничења	228
6.6. Будућа истраживања	228
ЛИТЕРАТУРА	230
ПРИЛОГ 1	240
ПРИЛОГ 2	271
РЕПОЗИТОРИЈУМ	288

Списак ознака

α – коефицијент апсорпције

P_α – апсорбована енергија

P_u – укупна енергија

P_r – рефлектована енергија

r – коефицијент рефлексije

Z_{sc} – специфична акустичка импеданца

p – звучни притисак

v, u – брзина честица

R'_s, r, σ – подужна отпорност струјању ваздуха

ρ, ρ_0, ρ_m – густина ваздуха

χ – фактор структуре материјала

σ – порозност материјала

c, c_0 – брзина звука у ваздуху

γ – константа

\underline{y}_x – компонента коефицијента простирања дуж x –осе

\underline{y}_y – компонента коефицијента простирања дуж y –осе

\underline{v}_x – компонента брзине нормална на граничну површину

k, γ – однос специфичних топлота при сталном притиску и сталној запремини

Z_n – нормална импеданса

$Z_{n\infty}$ – нормална импеданса која важи за бесконачно дебео слој материјала

α_θ – коефицијент апсорпције таласа који долазе под углом θ

f – фреквенција

h – ход клипа

R – отпорност струјању ваздуха

Δp – разлика ваздушног притиска испред и иза узорка за испитивање

q_v – (запремински) ваздушни проток кроз узорак за испитивање

R_s – специфична отпорност струјању ваздуха

A – површина попречног пресека узорка за испитивање управна на правац протока

A_p – површина попречног пресека клипа

d, l – дебелина узорка за испитивање у правцу протока

- p_r – притисак услед рефлектованог таласа
 p_a – притисак услед упадног таласа
 Δx – растојање у односу на произвољно одабрану референтну раван
 p_i – притисак услед инцидентног таласа
 Z_0 – импеданса равног таласа
 T – време реверберације
 V – запремина коморе
 A – укупна апсорпција граничних површина коморе
 A_d – апсорпција услед дисипације
 ΔA – апсорпција унетог материјала
 S – површина унетог узорка
 Γ_c, γ, Γ – коефицијент простирања таласа
 Z_c – карактеристична импеданса
 k_c – карактеристични таласни број
 Γ'_c – коефицијент слабљења
 Γ''_c – фазни експонент
 Z'_c – акустички отпор
 Z''_c – акустичка реактанса
 K – модул стишљивости
 E, C – бездимензиони члан
 ω – кружна учестаност
 P_0 – ваздушни притисак
 P_r – Прантлов број
 Z_l – импеданса коначне дебљине материјала
 Z_R – реални део карактеристичне акустичке импедансе Z_c
 Z_I – имагинарни део карактеристичне акустичке импедансе Z_c
 α – реални део коефицијента простирања
 β – имагинарни део коефицијента простирања
 C_1, \dots, C_8 – коефицијенти
 Z_i – акустичка импеданса
 L, d – дебљина материјала
 Z_0 – импеданса ослонца слоја материјала

- W – таласна импеданса (карактеристична импеданса)
 R – коефицијент рефлексије за нормалну инциденцију
 α, β – реалне функције које зависе од фреквенције
 $2\pi f$ – угаона брзина
 R – реални део импедансе
 X – имагинарни део импедансе
 f_1 – доња гранична фреквенција
 f_2 – горња гранична фреквенција
 d – пречник цеви
 s – међусобно растојање између микрофона
 H – коригована функција преноса
 l – удаљеност ближег микрофона од узорка
 k, k_0 – таласни број
 \bar{H}_{12} – комплексна функција преноса
 G_{12} – унакрсни спектар снаге
 G_{11} – аутокорелациони спектар снаге
 $\bar{H}_{12}^{st}, \bar{H}_{12}^{inv}$ – функције преноса у стандардној и инверзној поставци
 \bar{H}_{kor} – корелациони фактор
 \bar{H}_m – функција преноса добијена у поступку мерења
 R^2 – коефицијент детерминације
 q_v – запремински проток
 u – брзина струјања ваздуха у мерној ћелији
 $\Gamma_{sr,d}$ – средња вредност подужне отпорности струјању ваздуха за одговарајућу дебљину узорка
 α_s – коефицијент апсорпције за дифузно звучно поље
 φ – упадни угао инцидентног таласа
 α_φ – коефицијент апсорпције равног звучног таласа, везан за угао φ
 $\bar{Z}' / \rho_0 c_0$ – нормализована површинска импеданса слоја
 $\bar{Z}'_c / \rho_0 c_0$ – нормализована карактеристична импеданса апсорпционог материјала
 $\alpha_{ij,D\&D,n}$ – коефицијент апсорпције одређен према моделу Dunn i Davern-a при нормалној инциденцији таласа
 $\alpha_{ij,meas}$ – средња вредност коефицијента апсорпције измерена у импедансној цеви

$\Delta\bar{\alpha}_k, \Delta\bar{\alpha}$ – средња вредност апсолутне грешке

$\Delta\bar{\varepsilon}_k, \Delta\bar{\varepsilon}$ – средња вредност релативне грешке

n – укупан број експерименталних тачака

k – број регресионих коефицијената

SS_R – регресиона сума квадрата

SS_E – сума квадрата резидуала (грешака)

ν_1, ν_2 – степени слободе

$\hat{\sigma}$ – процена стандардне девијације

C_{jj} – дијагонални елемент матрице $(X'X)^{-1}$

\hat{b}_j – процена параметра b_j бројем

$t_{\alpha, n-k}$ – вредност t расподеле за вероватноћу α и $n-k$ степени слободе

$(1-\alpha)$ – поузданост процене

$\sigma_{\hat{b}_j}$ – стандардна грешка регресионог коефицијента

σ – стандардна девијација

μ – аритметичка средина

r_{meas} – подужна отпорност струјању ваздуха, одређена према стандарду ISO 9053:1991

r_{Rs-r} – подужна отпорност струјању ваздуха, одређена према новој методи Rs-r

d_{sr} – средња вредност дебљине узорака

d – средња вредност пречника влакна

K_1, K_2 – константе

d_{kino} – еквивалентни пречник решетке ћелијске структуре меламинске пене са отвореним ћелијама

d_{eq} – еквивалентни пречник решетке ћелијске структуре пене

r_ϕ – коефицијент рефлексије за равни звучни талас

α_{mean} – средњи коефицијент апсорпције

r_{mean} – средња вредност подужне отпорности струјању ваздуха

C – јединична цена смеше зрнастих материја

c_P, c_G, c_S – цена јединице мере појединачних компоненти (пластика, гума и песак)

P, G, S – процентуални удео појединачне компоненте у смеси (пластике, гуме и песка)

n – број критеријума

m – број алтернатива

f_j – критеријуми **Kj**

- A_i – алтернативе за разматрање
- A – скуп свих алтернатива
- L_{Aeq} – еквивалентни ниво буке
- N_c – број путничких возила
- N_{hv} – број теретних возила
- N_b – број аутобуса
- $\Delta\bar{L}$ – разлика израчунатог и измереног нивоа буке
- N – просечан број пролазака возила у посматраном временском интервалу
- L_{AE} – ниво изложености звуку
- T – временски интервал
- L – ниво буке
- L_w – ниво звучне снаге извора
- C – корекција нивоа звука
- C_{DA} – корекција која настаје услед ширења таласног фронта и апсорпције у ваздуху
- s_{\perp} – најкраће нормално растојање између извора буке и пријемне тачке
- C_G – корекција апсорпције терена
- h_m – средња висина линије која спаја извор буке и пријемну тачку
- d – дужина линије која спаја извор буке и пријемну тачку
- C_B – корекција због баријере
- z_{\perp} – разлика путева дифрактованог и директног таласа
- A_{\perp} – растојање од извора до горње границе баријере
- B_{\perp} – растојање од пријемника до горње ивице баријере
- C_{\perp} – сума дужина преломних ивица код баријера са више преломних ивица
- $K_{w\perp}$ – метеоролошка корекција
- DL_{α} – једнобројна вредност оцене перформанси звучне апсорпције
- α_{si} – коефицијент апсорпције терце
- L_i – нормализован А-пондерисан ниво звучног притиска
- α_{pi} – практичан коефицијент звучне апсорпције
- α_w – меродавна вредност коефицијента апсорпције
- L_{den} – целодневни меродавни ниво буке
- L_{day} – меродавни ниво буке за период дана
- $L_{evening}$ – меродавни ниво буке за период вече
- L_{night} – меродавни ниво буке за период ноћи

Списак слика

Слика 2.1.	Ефекат пасивних и активних метода у процесу смањења буке.....	10
Слика 2.2.	Процеси који настају при наиласку звучних таласа на препреку.....	11
Слика 2.3.	Простирање звучног таласа кроз порозни материјал	12
Слика 2.4.	Методe за мерење отпорности струјању ваздуха.....	18
Слика 2.5.	Метода са сталним протоком ваздуха (метода – А) – Основни принцип	18
Слика 2.6.	Начини обезбеђења ваздушног протока код методе са станим протоком ваздуха	19
Слика 2.7.	Метода са променљивим протоком ваздуха (метода – В) – Основни принцип	19
Слика 2.8.	Шематски приказ мерења отпорности струјању ваздуха.....	20
Слика 2.9.	Вредности пада притиска које обезбеђују ламинарно струјање	21
Слика 2.10.	Гранична вредност брзине при ламинарном струјању ваздуха у мерној ћелији	21
Слика 2.11.	Пример распореда мерне опреме са звучником постављеним на крају мерне цеви у правцу осе: део за узорак је са помичном завршном плочом	23
Слика 2.12.	Одређивање коефицијента звучне апсорпције – Метода стојећих таласа.....	25
Слика 2.13.	Препоручени изглед реверберационе коморе.....	27
Слика 2.14.	Нормализована реална компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха	36
Слика 2.15.	Нормализована имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха ..	36
Слика 2.16.	Нормализована реална компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха	37
Слика 2.17.	Нормализована комплексна компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха .	37
Слика 2.18.	Ознаке коришћене за израчунавање импедансе једнослојног материјала; адаптирано према.....	41
Слика 2.19.	Означавање у вишеслојном систему; адаптирано према.....	42
Слика 2.20.	Вишеслојни систем са ваздушним међупростором.....	42
Слика 2.21.	Нормализована реална компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха	44
Слика 2.22.	Нормализована имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха ..	44
Слика 2.23.	Нормализована реална компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха.....	44
Слика 2.24.	Нормализована имагинарна компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха ..	44
Слика 2.25.	Нормализована реална компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$	46
Слика 2.26.	Нормализована имагинарна компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$	46
Слика 2.27.	Нормализована константа слабљења у функцији од бездимензионе променљиве $E=fr_0/\sigma$	46

Слика 2.28. Нормализована фазна константа у функцији од бездимензионе променљиве $E=f\rho/\sigma$	46
Слика 3.1. Блок дијаграм система за мерење звучне апсорпције.....	50
Слика 3.2. Амплитудске карактеристике функција преноса у стандардној и инверзној поставци и корекционе функције преноса.....	53
Слика 3.3. Фазне карактеристике функција преноса у стандардној и инверзној поставци и корекционе функције преноса.....	53
Слика 3.4. Блок дијаграм система са сталним протоком ваздуха.....	54
Слика 3.5. Мерна ћелија за одређивање отпорности струјању ваздуха.....	55
Слика 3.6. Изглед реализованог мерног система за одређивање отпорности струјању ваздуха.....	56
Слика 3.7. Узорак за испитивање.....	58
Слика 3.8. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – I узорак).....	60
Слика 3.9. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – II узорак).....	60
Слика 3.10. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – III узорак).....	61
Слика 3.11. Упоредни приказ коефицијента апсорпције ПУ пене HR 3536 измереног у импедансној цеви и одређеног помоћу емпиријског модела Dunn-Davern за дебљине од 1 cm до 5 cm.....	63
Слика 3.12. Упоредни приказ коефицијента апсорпције ПУ пене HR 3536 измереног у импедансној цеви и одређеног помоћу емпиријског модела Dunn-Davern за дебљине од 6 cm до 10 cm.....	63
Слика 3.13. Вредност апсолутне грешке коефицијента апсорпције пене HR 3536.....	65
Слика 3.14. Вредност релативне грешке коефицијента апсорпције у процентима за пену HR 3536.....	65
Слика 3.15. Алгоритам за избор оптималног стохастичког модела.....	69
Слика 3.16. Алгоритам за добијање детерминистичког емпиријског модела на основу подужне отпорности струјању.....	74
Слика 3.17. Поступак исецања узорака из блока полиуретанске пене.....	75
Слика 3.18. Узорци од полиуретанске пене.....	76
Слика 3.19. Изглед ћелијске мембране код тврде ПУ пене.....	77
Слика 3.20. Отворена ћелијска структура високоеластичних ПУ пена.....	77
Слика 3.21. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3744.....	79
Слика 3.22. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 4035.....	80
Слика 3.23. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2026.....	81
Слика 3.24. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2535.....	82
Слика 3.25. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 3038.....	83
Слика 3.26. Вредности коефицијента апсорпције за пену T3545.....	84
Слика 3.27. Вредности коефицијента апсорпције за пену ES 3234.....	85
Слика 3.28. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 2514.....	86
Слика 3.29. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3536.....	87
Слика 3.30. Вредности коефицијента апсорпције за пену PVE 4016.....	88
Слика 3.31. Вредности коефицијента апсорпције за пену T 2036.....	89
Слика 3.32. Просторни дијаграм промене жељене вредности са дебљином материјала по терцама.....	94

Слика 3.33. Контурни дијаграм промене жељене вредности са дебљином материјала по терцама.....	94
Слика 3.34. Зависност отпорности струјању ваздуха од дебљине узорка.....	96
Слика 3.35. Подужна отпорност струјању ваздуха у функцији од густине ПУ пене	98
Слика 3.36. Нов модел за подужну отпорност струјању ваздуха за HR пене у поређењу са теоријским моделима	98
Слика 3.37. Резултати мерења коефицијента апсорпције у импедансној цеви за 7 врста ПУ пена мале густине.....	100
Слика 3.38. Коефицијент апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) дебљине 100 mm: измерене и израчунате вредности према NIM (r – одређено на три различита начина).....	103
Слика 3.39. Коефицијент апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) дебљине 100 mm: измерене вредности и израчунате вредности према NIM_{meas} и према моделу Duun и Davern (измерене вредности – r).....	103
Слика 3.40. Коефицијенти апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) за дебљине узорака од 10 до 50 mm: измерене вредности и израчунате вредности према NIM_{meas}	103
Слика 3.41. Коефицијенти апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) за дебљине узорака од 60 до 100 mm: измерене вредности и израчунате вредности према NIM_{meas}	103
Слика 3.42. Средње вредности апсолутних грешака коефицијента апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) добијене за 10 различитих дебљина узорака.....	104
Слика 3.43. Средње вредности релативних грешака коефицијента апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) добијене за 10 различитих дебљина узорака.....	104
Слика 3.44. Узорци од: а) рециклиране гуме б) рециклиране пластике и в) песка.....	105
Слика 3.45. Узорци од рециклиране гуме и пластике сложени по дебљинама	106
Слика 3.46. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану гуму	107
Слика 3.47. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану пластику	108
Слика 3.48. Вредности коефицијента апсорпције за песак.....	109
Слика 3.49. 3D Графички приказ математичког модела за рециклирану гуму.....	111
Слика 3.50. Контурни 2D приказ математичког модела за рециклирану гуму.....	111
Слика 3.51. 3D Графички приказ математичког модела за рециклирану пластику.....	112
Слика 3.52. Контурни 2D приказ математичког модела за рециклирану пластику.....	113
Слика 3.53. 3D Графички приказ математичког модела за песак.....	114
Слика 3.54. Контурни 2D приказ математичког модела за песак.....	114
Слика 3.55. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције рециклиране гуме	116
Слика 3.56. Апсолутне и релативне грешке модела.....	116
Слика 3.57. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције рециклиране пластике	117
Слика 3.58. Апсолутне и релативне грешке модела.....	117
Слика 3.59. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције песка	118
Слика 3.60. Апсолутне и релативне грешке модела.....	118
Слика 3.61. Приказ вертикалних пресека и смера пораста удела појединачних компоненти у троугаоном дијаграму смеше.....	119
Слика 3.62. Одређивање састава смеше у тројном систему.....	120

Слика 3.63. Тројни систем смеше (<i>Simplex centroid design</i>) састављен од компоненти песка, гранулата рециклиране гуме и гранулата рециклиране пластике.....	120
Слика 3.64. Микроскопска структура тројног система смеше.....	121
Слика 3.65. Пројекат смеша-процес: седам мешавина зрнастих материјала (на троугловима) у 60 процесних комбинација (5 дебљина х 12 фреквенција на правоугаонику).....	122
Слика 3.66. Узорци за комбиновани дизајн смеша-процес.....	122
Слика 3.67. Графички приказ математичког модела тројног система смеше у зависности од промене дебљине материјала (d) за одабрану вредност фреквенције $f=862,5\text{Hz}$	130
Слика 3.68. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од фреквенције и дебљине материјала за смешу са подједнаким уделима појединачних компоненти ($P=1/3, G= 1/3, S= 1/3$).....	131
Слика 3.69. Контурни дијаграм промене коефицијента апсорпције у зависности од фреквенције и дебљине материјала за смешу са подједнаким уделима појединачних компоненти ($P=1/3, G= 1/3, S= 1/3$).....	131
Слика 3.70. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела пластике: а) 0%, б) 50% и в) 100%.....	132
Слика 3.71. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела рециклиране гуме: а) 0%, б) 50% и в) 100%.....	133
Слика 3.72. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела песка: а) 0%, б) 50% и в) 100%.....	134
Слика 3.73. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције.....	135
Слика 3.74. Апсолутне и релативне грешке модела.....	135
Слика 3.75. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције.....	136
Слика 3.76. Апсолутне и релативне грешке модела.....	136
Слика 3.77. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције.....	137
Слика 3.78. Апсолутне и релативне грешке модела.....	137
Слика 3.79. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције.....	138
Слика 3.80. Апсолутне и релативне грешке модела.....	138
Слика 3.81. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PRS и RPS.....	144
Слика 3.82. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PSR и RSP.....	145
Слика 3.83. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације SRP и SPR.....	147
Слика 3.84. Вредности коефицијената апсорпције за 1 слој Азмафона.....	150
Слика 3.85. Вредности коефицијената апсорпције за 2 слоја Азмафона.....	151
Слика 3.86. Коефицијент апсорпције за $d=1\text{cm}$ -контурни дијаграм.....	155
Слика 3.87. Коефицијент апсорпције за $d=2\text{cm}$ -контурни дијаграм.....	155
Слика 4.1. Избор критеријума за дебљину материјала.....	167
Слика 4.2. Избор критеријума за фреквенцију.....	168
Слика 4.3. Графички приказ жељених вредности задатих циљева.....	168
Слика 4.4. Графички приказ жељених вредности задатих циљева.....	169
Слика 4.5. Избор критеријума за компоненте смеше.....	169
Слика 4.6. Графички приказ жељених вредности задатих циљева.....	170
Слика 4.7. Графички приказ остварених вредности задатих циљева за комбинације вишеслојних зрнастих материјала.....	171
Слика 4.8. Графички приказ остварених вредности задатих циљева за влакнасти материјал.....	172

Слика 4.9. Дводелни модел алгоритма за израчунавање нивоа буке	174
Слика 4.10. Модели за предвиђање нивоа саобраћајне буке.....	175
Слика 4.11. Положај места емисије према немачкој методи RLS 90	176
Слика 4.12. Положај места емисије према француској методи NMPB.....	176
Слика 4.13. Интегрални модел за одређивање звучне апсорпције елемената за заштиту од саобраћајне буке.....	178
Слика 4.14. Измерене вредности L_{eq} у односу на израчунате по NAISS моделу са једном једначином за све мерне тачке	180
Слика 4.15. Дијаграм расипања прорачунатих и измерених нивоа буке на узорку саобраћајног тока из 2010. године	181
Слика 4.16. Положај тачкастих извора буке у моделу извора саобраћајне буке	182
Слика 4.17. Положај тачкастих извора буке одређених у односу на проток саобраћаја ..	182
Слика 5.1. Нивои буке уз главне градске саобраћајнице, Краљево 2007	192
Слика 5.2. Положај школе у односу на Доситејеву улицу (извор: Мапа града Краљева, Дирекција за планирање и изградњу „Краљево“)	193
Слика 5.3. Измерени, дозвољени и меродавни нивои буке у нивоу фасаде школе	194
Слика 5.4. Фреквенцијска анализа буке на огради школе (3,4 m од ивице пута).....	194
Слика 5.5. Просечни нивои буке у фреквенцијском опсегу саобраћајне буке	195
Слика 5.6. Целодневни еквивалентни ниво буке усредњен по часу (у нивоу фасаде школе)	195
Слика 5.7. Фреквенција саобраћаја на мерном месту, усредњена по часу	196
Слика 5.8. Просечан број лаких и тешких возила у току дана и ноћи (извор: Извештај о систематском мерењу буке за град Краљево за 2015. годину, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву).....	196
Слика 5.9. Мапа буке постојећег стања	199
Слика 5.10. Нормализовани спектар саобраћајне буке према стандарду BS EN 1793-3...200	
Слика 5.11. Нормализовани спектар саобраћајне буке ($L_{eq} = 66 \text{ dB(A)}$).....	200
Слика 5.12. Интерфејс програма MODIPROM.....	208
Слика 5.13. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – ВКА.....	210
Слика 5.14. Анализа утицаја покретних тежина на резултате ВКА.....	211
Слика 5.15. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 1	213
Слика 5.16. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 1	214
Слика 5.17. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 2	215
Слика 5.18. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 2	216
Слика 5.19. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 3	217
Слика 5.20. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 3	218
Слика 5.21. Профил баријере.....	219
Слика 5.22. Изглед заштитне баријере код школе Димитрије Туцовић.....	220
Слика 5.23. Поглед на баријеру са магистралног пута.....	221
Слика 5.24. Мапа буке након постављања звучне баријере	222

Списак табела

Табела 2.1.	Уобичајено време реверберације реверберационе просторије.....	29
Табела 2.2.	Вредности коефицијената у моделу Mechel-Vér за две врсте материјала.....	38
Табела 3.1.	Фреквенцијски опсеци импедансних цеви пречника 100 mm и 30 mm.....	52
Табела 3.2.	Резултати мерења отпорности струјању ваздуха за ПУ пену HR 3536 (дебљина узорка 60 mm).....	59
Табела 3.3.	Вредности отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за пену HR 3536.....	61
Табела 3.4.	Модел за прорачун коефицијента апсорпције влакнастих и пенастих материјала.....	62
Табела 3.5.	Вредности грешака коефицијента апсорпције за полиуретанску пену HR 3536.....	66
Табела 3.6.	Оцена сигнификатности параметара према t-тесту.....	71
Табела 3.7.	Вредности механичких карактеристика 4 групе испитиваних ПУ пена.....	76
Табела 3.8.	Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3744.....	79
Табела 3.9.	Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 4035.....	80
Табела 3.10.	Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2026.....	81
Табела 3.11.	Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2535.....	82
Табела 3.12.	Вредности коефицијента апсорпције за пену S 3038.....	83
Табела 3.13.	Вредности коефицијента апсорпције за пену T 3545.....	84
Табела 3.14.	Вредности коефицијента апсорпције за пену ES 3234.....	85
Табела 3.15.	Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 2514.....	86
Табела 3.16.	Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3536.....	87
Табела 3.17.	Вредности коефицијента апсорпције за пену PVE 4016.....	88
Табела 3.18.	Вредности коефицијента апсорпције за пену T 2036.....	89
Табела 3.19.	Збирни преглед математичких модела ПУ пена.....	91
Табела 3.20.	Вредности подужне отпорности струјању ваздуха ПУ пена, одређене на два различита начина.....	95
Табела 3.21.	Параметри у моделима за одређивање отпорности струјању ваздуха.....	98
Табела 3.22.	Упоредне вредности коефицијената емпиријских модела.....	101
Табела 3.23.	Вредности апсолутних и релативних грешака коефицијента апсорпције ПУ пене за оцену тачности емпиријских модела.....	104
Табела 3.24.	Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану гуму.....	107
Табела 3.25.	Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану пластику.....	108
Табела 3.26.	Вредности коефицијента апсорпције за песак.....	109
Табела 3.27.	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела.....	110
Табела 3.28.	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела.....	112
Табела 3.29.	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела.....	114
Табела 3.30.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава рециклиране гуме	116
Табела 3.31.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава рециклиране пластике.....	117
Табела 3.32.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава песка.....	118
Табела 3.33.	Трокомпонентни <i>Simplex centroid design</i>	121

Табела 3.34.	Вредности коефицијената апсорпције за комбиновани процесни и тројни систем смеше	123
Табела 3.35.	Збирни преглед математичких модела смеше зрнастих материјала по терцним фреквенцијама	125
Табела 3.36.	Табела збирних статистичких података за избор математичких модела	128
Табела 3.37.	ANOVA извештај за одабрану комбинацију математичких модела	129
Табела 3.38.	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	129
Табела 3.39.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-пластика	135
Табела 3.40.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше пластика-песак	136
Табела 3.41.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-песак	137
Табела 3.42.	Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-пластика-песак	138
Табела 3.43.	Трокомпонентни вишеслојни RPS систем	140
Табела 3.44.	Трокомпонентни вишеслојни RSP систем	140
Табела 3.45.	Трокомпонентни вишеслојни PRS систем	140
Табела 3.46.	Трокомпонентни вишеслојни PSR систем	141
Табела 3.47.	Трокомпонентни вишеслојни SPR систем	141
Табела 3.48.	Трокомпонентни вишеслојни SRP систем	141
Табела 3.49.	Збирни преглед математичких модела вишеслојних зрнастих материјала	143
Табела 3.50.	Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PRS и RPS	144
Табела 3.51.	Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PSR и RSP	145
Табела 3.52.	Вредности коефицијената апсорпције за комбинације SRP и SPR	146
Табела 3.53.	Техничке карактеристике Азмафона	148
Табела 3.54.	Време реверберације празне коморе по терцама током мерења апсорбера „АЗМА“	149
Табела 3.55.	Подаци за 1 слој Азмафона	149
Табела 3.56.	Подаци за 2 слоја Азмафона	150
Табела 3.57.	Експериментални подаци за збирни модел	152
Табела 3.58.	Збирни преглед математичких модела зависности коефицијента апсорпције од фреквенције вишеслојних влакнастих материјала	153
Табела 3.59.	ANOVA извештај за одабрани математички модел	154
Табела 3.60.	Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела	154
Табела 4.1.	Резултати статистичке анализе разлике нивоа буке израчунатих помоћу NAISS модела и измерених вредности	181
Табела 4.2.	Нормализовани спектар саобраћајне буке	185
Табела 4.3.	Категоризација апсорпционих перформанси према стандарду BS EN 1793-1:2012	186
Табела 5.1.	Број мерних места са прекорачењем целодневног меродавног нивоа буке утврђен при систематском мерењу буке у граду Краљево за 2014. и 2015. годину	191
Табела 5.2.	Резултати систематског мерења буке за 2014. и 2015. годину	193
Табела 5.3.	Просечан ниво буке по временским интервалима измерен на мерном месту	196

Табела 5.4.	Ниво буке и прекорачења дозвољеног нивоа буке ма мерном месту.....	197
Табела 5.5.	Просечан ниво буке по временским интервалима према предвиђању NAISS модела	197
Табела 5.6.	Предвиђање нивоа буке према моделу NAISS	198
Табела 5.7.	Приказ измерених вредности нивоа буке и предвиђања Модела за прорачун локалних мапа буке	199
Табела 5.8.	Приказ предвиђених нивоа буке према NAISS моделу и Моделу за прорачун локалних мапа буке	199
Табела 5.9.	Критеријуми за избор апсорпционог материјала.....	203
Табела 5.10.	Квантификација критеријума и процењене вредности релативних тежина	204
Табела 5.11.	Прорачунате вредности $DL\alpha$ за пене по дебљинама	205
Табела 5.12.	Прорачунате вредности $DL\alpha$ за смеше зрнастих материјала.....	206
Табела 5.13.	Прорачунате вредности $DL\alpha$ за вишеслојне комбинације зрнастих материјала	206
Табела 5.14.	Прорачунате вредности $DL\alpha$ за влакнасте материјале	206
Табела 5.15.	Одабране алтернативе	207
Табела 5.16.	Релативне тежине за анализу осељивости.....	212

ПОГЛАВЉЕ

1

УВОД

1.1. Општа разматрања

Бука је последњих деценија један од основних узрока комплексног оштећења здравља становништва, посебно у индустријски развијеним земљама. Све већи обим индустријске производње, све бројније и брже саобраћајне везе и све шира примена машина и уређаја у комуналној средини, као и многи други фактори који људима омогућују удобнији живот, истовремено доводе и до своје негације која се испољава у облику озбиљног угрожавања човековог здравља. Борба против буке и њеног штетног дејства део су напора који се чине за побољшање услова живота и за заштиту животне и радне средине нарочито у густо насељеним подручјима.

Један од начина за смањење нивоа буке је примена апсорпционих материјала који апсорбују део енергије звука и карактеришу се коефицијентом апсорпције као фреквенцијски зависном величином. Коефицијент апсорпције порозних материјала зависи од дебљине слоја материјала, рељефа површине, фреквенције емитованих звучних таласа, отпора струјању и порозности материјала.

Осим потребе да се апсорбују различити делови фреквенцијског октавног спектра коју дају различити извори буке при избору апсорпционих материјала треба водити рачуна и о другим неакустичким захтевима као што су: изглед, животни век, безбедност, могућност одржавања, могућност коришћења рециклираних отпадних материјала, цена, могућност поновне рециклаже након истека периода коришћења и др.

Истраживања приказана у овој дисертацији су настала као континуитет у истраживањима која се обављају у оквиру пројекта TP37020 – „Развој методологија и средстава за заштиту од буке урбаних средина“ (UrbaNoise) финансиран од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије (2011-2014).

1.2. Предмет докторске дисертације

Предмет дисертације је истраживање и систематизација параметара који утичу на апсорпциона својства материјала и анализа критеријума за избор оптималне комбинације материјала и утицајних параметара. Утицајне параметре је потребно идентификовати и квантификовати њихов утицај а затим селектовати параметре чији је утицај сигнификантан. За селектоване параметре је неопходно проучити како делују на коефицијент апсорпције материјала и добијене резултате исказати математичким зависностима.

Циљ је формирање ефикасног Модела одлучивања за избор оптималне комбинације параметара који би кориснику олакшао избор материјала и конструкционих параметара за израду и уградњу производа за заштиту од буке у сваком конкретном случају, било да је у питању решење проблема буке у индустријским погонима, концертним дворанама или на отвореном простору поред друмских и железничких саобраћајница итд.

1.3. Циљеви истраживања

У нашој земљи се веома мали број истраживача и институција бави заштитом од буке урбаних средина. Придружење Европској унији ће неминовно условити и усвајање Директива које се баве заштитом од буке а тиме и потребу да се огромна средства уложе у ову област.

Научни циљ дисертације је:

- истраживање могућности примене рециклираних отпадних материјала за заштиту од буке
- формирање базе података звучно-апсорпционих материјала
- истраживање и систематизација параметара који утичу на апсорпциона својства материјала
- испитивање апсорпционих и других својстава смеше више разнородних зрнастих материјала и добијање функционалне зависности ових својстава од процентуалног удела појединачних компоненти смеше
- формирање базе знања о међузависности утицајних параметара и акустичких и неакустичких својстава материјала
- анализа и класификација акустичких и неакустичких критеријума (функција циља) који се могу користити за конкретно решење проблема заштите од буке
- развој ефикасног модела одлучивања помоћу којег је могуће, за сваки конкретан случај, из расположиве базе знања одабрати комбинације материјала и конструкционих параметара који ће најбоље апсорбовати делове фреквенцијског спектра који дају различити извори буке.

Практични циљеви истраживања су:

- једноставан, разумљив и ефикасан модел за избор оптималне комбинације параметара и звучно апсорпционих материјала који треба да буде флексибилан и применљив за решење широког спектра конкретаних случајева у пракси
- постојање јединствене базе података и базе знања о апсорпционим материјалима
- употребом рециклираних производа као што су: грануле рециклиране гуме и рециклиране пластика решава се проблем отпада, уштеде енергије и заштите животне средине
- упознавање окружења са досадашњим резултатима истраживања и могућим путевима за решење конкретних проблема заштите од буке урбаних средина,
- примена резултата истраживања у производним предузећима која се баве производњом и уградњом звучно-апсорпционих материјала и повећање њихове конкурентности на тржишту.

1.4. Основне хипотезе

Основна хипотеза:

Н0: Могуће је развити Модел одлучивања, заснован на примени вишекритеријумске анализе за избор оптималне смеше звучно-апсорпционих материјала и њихових конструктивних параметара, у циљу заштите од буке, уз задовољење критеријума (функција циља) и узимања у обзир карактера буке звучног извора израженог преко фреквенцијског спектра буке.

Допунске хипотезе:

Н1: За различите врсте порозних апсорпционих материјала могуће је дефинисати функционалне зависности његових апсорпционих својстава од конструкционих параметара као што су: дебљина, редослед слојева код вишеслојних материјала, одстојање од подлоге и сл.

Н2: За вишеккомпонентне знане материјале као што су композитни материјали, могуће је дефинисати функционалну зависност апсорпционих својстава смеше од процентуалног удела појединачних компоненти.

1.5. Методе истраживања

У основи, рад чини спрега теоријских и експерименталних истраживања.

Теоријска истраживања обухватају:

- аналитичко и стохастичко моделирање зависности апсорпционих и других својстава материјала од конструкционих параметара
- аналитичко и стохастичко моделирање зависности својстава смеше више разнородних зрнастих материјала од процентуалног удела појединачних компоненти смеше
- развој вишекритеријумског модела одлучивања за избор оптималне комбинације апсорпционих материјала и конструкционих параметара
- Сумарни аналитички и критички осврт на изабране методе и технике, као и на предложена и конципирана решења.

Експериментална истраживања обухватају:

- избор експерименталног плана
- реализацију експеримента
- анализу експерименталних резултата, и
- експерименталну верификацију развијеног модела одлучивања на физичким објектима.

1.6. Значај истраживања

У оквиру истраживања су развијени:

- Аналитички и стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине материјала по терцама за 11 врста полиуретанских пена мале густине расположивих на домаћем тржишту
- Аналитички и стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине материјала по терцама за зрнасте материјале: песак, рециклирану гуму и рециклирану пластику
- Аналитички и стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине материјала по терцама за зрнасте материјале: песак, рециклирану отпадну гуму и рециклирану пластику
- Стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине материјала и процентуалног удела појединачних компоненти смеше састављене од песка, гранула рециклиране гуме и гранула рециклиране пластике
- Стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине слоја и редоследа комбинације материјала по терцама за вишеслојне зрнасте материјале
- Аналитички и стохастички модели зависности коефицијента апсорпције од дебљине материјала и висине уградње по терцама за влакнасте материјале

Развијен је модел за избор врсте, дебљине и параметара уградње апсорпционих материјала заснован на вишекритеријумском одлучивању. У оквиру модела су дефинисани критеријуми одлучивања за избор алтернатива са уграђеном анализом осетљивости.

Формиране су нове јединствене базе података и базе знања о акустичким својствима пенастих, зрнастих и влакнастих материјала.

Дисертацијом је остварен значајан допринос у области заштите од буке. Очекивани ниво сазнања доприноси фундаменталном богаћењу науке кроз откривање и оригинално тумачење односа између акустичких својстава испитиваних материјала и конструкционих параметара и откривању законитости дејства селектованих параметара на акустичка и неакустичка својства материјала.

1.7. Приказ по поглављима

Докторска дисертација приказана је кроз осам поглавља:

1. Уводна разматрања
2. Преглед стања у области истраживања
3. Истраживање апсорпционих својстава материјала
4. Развој модела одлучивања
5. Верификација модела
6. Закључна разматрања

Литература

Прилог

У уводном делу приказана су општа разматрања и опис проблема истраживања. Изложена је основна идеја, предмет и основни циљеви рада, полазне хипотезе, методе истраживања, значај и допринос истраживања. Поред тога, дат је и сажет приказ свих поглавља рада.

Друго поглавље обухвата преглед најзначајнијих теоријских и експерименталних истраживања која су битна за подручје истраживања. Кроз анализу доступне литературе дат је приказ резултата везаних за процесе који настају при простирању звучних таласа кроз порозне материјале, досадашња искуства у примени апсорпционих акустичких материјала и методе за мерење акустичких и неакустичких параметара који се користе у системима звучне апсорпције. Као посебан део дат је преглед развијених модела за одређивање отпорности струјању ваздуха и теоријских и емпиријских модела за одређивање акустичких особина порозних материјала.

У трећем поглављу су приказани резултати истраживања апсорпционих својстава материјала. Дат је план истраживања, детаљан приказ коришћених метода и опреме и методологија за формирање стохастичких и макроскопских емпиријских модела. Испитано је 11 врста полиуретанских пена са по десет различитих дебљина, три врсте зрнастих материјала са по пет различитих дебљина и један влакнасти материјал за две различите дебљине. Испитано је 4 смеше зрнастих материјала са по пет различитих дебљина. Истраживане су трокомпонентне смеше зрнастих материјала у којима је процентуални удео сваке компоненте вариран у интервалу од 0% до 100% према Simplex centroid design, комбинован са процесним параметрима. Истарживани су вишеслојни зрнасти материјали са различитим распоредима и дебљинама материјала у оквиру вишеслојне структуре. За све врсте материјала је описан поступак припреме узорака, дат је приказ експерименталног плана, резултата мерења, обраде и анализе експерименталних података. Развијени су емпиријски макроскопски модели и стохастички модели за предвиђање акустичких својстава појединачних материјала, смеша (композиата) зрнастих материјала и вишеслојних структура зрнастих материјала.

Четврто поглавље се бави процесом одлучивања и методологијом вишекритеријумског одлучивања. Развијен је модел за избор материјала или смеше материјала за заштиту од буке који се састоји од четири основне фазе: дефинисање проблема, креирање модела

одлучивања, решавање проблема и имплементација модела. У оквиру дефинисања проблема обрађене су фазе: Идентификација проблема, мерење нивоа буке и фреквенцијска анализа, класификација проблема, декомпозиција проблема и дефинисање надлежности. Фаза креирања модела се спроводи кроз дефинисање критеријума одлучивања, генерисање алтернатива и формирање модела одлучивања. Обрађени су основни критеријуми одлучивања који се односе на све типове и врсте буке. Посебан акценат је дат на специфичности у процесу избора алтернатива у зависности да ли се ради о уско појасној или тоналној буци, широкопојасној саобраћајној буци или о буци у зградама, и на поштовање стандарда и директива које односе на ову област. Решавање проблема је декомпоновано на: оцену и рангирање алтернатива, анализу осетљивости и избор најпогодније алтернативе.

Верификација модела је извршена у петом поглављу на примеру заштите од саобраћајне буке ОШ „Димитрије Туцовић“ у Краљеву. Решење је базирано на изради звучне баријере између школе и саобраћајнице. Предложени модел је искоришћен за избор најповољнијег материјала ради заштите ученика и наставника и довођења нивоа буке у дозвољене границе. На основу спроведене свеобухватне вишекритеријумске анализе и анализе осетљивости одабран је материјал који који обезбеђује смањење ниво буке на фасади школе за 12 dB. На крају поглавља је дат и технички опис пројектоване баријере и дискусија резултата.

Последње, шесто поглавље, садржи критички осврт на остварене теоријске и експерименталне резултате, формулисани су закључци у односу на постављене циљеве рада и дефинисани правци даљих истраживања.

На крају дисертације дат је преглед коришћене литературе и прилози са резултатима мерења и анализе апсорпционих својстава комбинације вишеслојних материјала.

ПОГЛАВЉЕ

2

**ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ
ИСТРАЖИВАЊА**

2.1. Увод

Најновији подаци о угрожености становништва буком у животној средини добијени након првог круга израде стратешких карата буке за агломерације у земљама Европске уније указује да је у урбаним срединама 54% популације (56 милиона становника) изложено целодневним нивоима буке већим од 55 dB(A) а 15% популације (15.7 милиона становника) целодневним нивоима буке већим од 65 dB(A). Поред тога ван агломерација додатних 33.4 милиона становника живи у зонама где је целодневни ниво буке већи од 55 dB(A), односно 7.6 милиона становника у зонама у којима је целодневни ниво већи од 65 dB(A). Од укупно 89.4 милиона становника који су изложени целодневним нивоима буке већим од 55 dB(A) чак близу 89 милиона је изложено буци коју генерише саобраћај (друмски, железнички и авионски). Број људи који су изложени целодневним нивоима буке већим од 55 dB(A) који потичу од друмског саобраћаја је близу 68 милиона, што указује на друмски саобраћај као доминантни извор буке [1].

Често је потребно користити технике које смањују ниво буке. У ту сврху користе се пасивни и активни медијуми. Активни медијуми се разликују од пасивних јер је неопходно коришћење спољашње енергије у редукционом процесу буке. Апсорпциони материјали представљају пасивни медијум за смањење буке. Они се постављају на путу преноса звучног таласа од извора буке до пријемника.

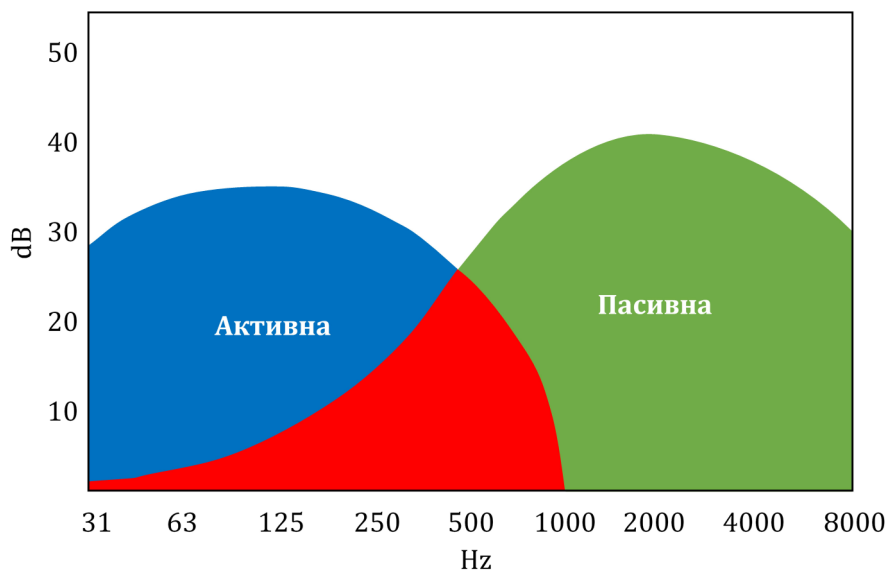
Апсорпциони материјали, као пасивни медијуми смањују буку ширећи таласни фронт звучне енергије и претварајући је у топлоту. Акустичка апсорпција зависи од фреквенције звучних таласа. Код порозних материјала на високим фреквенцијама, одвија се један адијабатски процес, при чему долази до губитка енергије услед трења, када звучни талас прелази преко и кроз неправилне поре. Са друге стране, на ниским фреквенцијама, порозни еластични материјали апсорбују звук губитком енергије изазване разменом топлоте. То је изотермски процес. Уопштено, ефикасност порозних еластичних материјала је ограничена на подручје високих фреквенција.

Феномен апсорпције разликује се од изолације или апсорпције удара. Овај процес изазива стварање пригушених вибрација, чије порекло може варирати: због трења између две површине, као резултат унутрашњег трења или хистерезиса самог материјала, итд. [2].

Током година порозни материјали који апсорбују звук су еволуирали и унапредили се. У поређењу са старијом групом апсорбујућих материјала произведених 1960. нови материјали су постали безбеднији, лакши и технолошки оптимизовани. Осим тога, еколошки концепт, одржив, рециклирани и зелени грађевински материјал ће ускоро имати важну улогу у маркетингу звучно-апсорбујућих материјала. Ови нови правци ће подстаћи развој нових материјала и/или побољшање постојећих. С обзиром на интензитет истраживања и развој у производним процесима, очекује се да ће се распон нових звучно-апсорпционих материјала брзо проширити у наредних неколико година [3].

Постоје и други пасивни медијуми, као што су резонатори који смањују буку претварајући је у вибрацију самог резонатора. Резонаторска бука није ништа друго него систем који почиње да вибрира због варијација у звучном притиску. Резонатор почиње да вибрира и производи губитке у облику топлоте.

Познато је да је пасивни медијум даје ефекат смањења буке на високим фреквенцијама, док смањење буке на ниским фреквенцијама захтева увођење активних техника за контролу буке. Ефикасност сваког медијума на различитим фреквенцијама је приказана на слици 2.1.



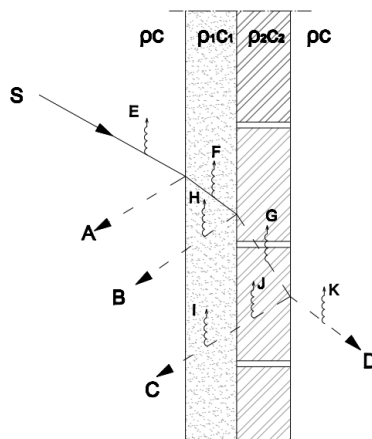
Слика 2.1. Ефекат пасивних и активних метода у процесу смањења буке [4]

2.2. Коефицијент апсорпције

При наиласку звучних таласа на средине са различитим специфичним импедансама (слика 2.1.) део енергије звука се рефлектује на свим дисконтинуитетима (А, В и С). Део енергије се неповратно губи услед дисипације и претварања у топлотну енергију при простирању таласа кроз ваздушну средину (Е+К) и при простирању таласа кроз слојеве материјала и наиласка на њихове граничне површине (F+G+H+J+I) узимајући у обзир све рефлектоване и преломљене таласе. Део енергије се преноси на другу страну граничне површине путем трансмисионог таласа (D).

Коефицијент апсорпције се дефинише као однос апсорбоване енергије у јединици времена, P_a и укупне (инцидентне) енергије у јединици времена P_u коју донесе прогресивни талас на граничну површину:

$$\alpha = \frac{P_a}{P_u} \quad (2.1)$$



Слика 2.2. Процеси који настају при наиласку звучних таласа на препреку [5]

Према закону о одржавању енергије, укупна енергија једнака је збиру рефлектоване енергије, P_r , и апсорбоване енергије у јединици времена, тако да постоји веза између коефицијента апсорпције и коефицијента рефлексије, r :

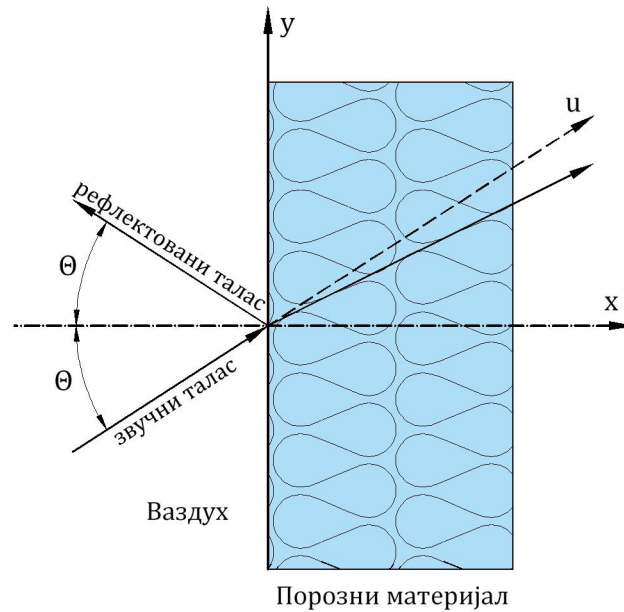
$$r = \frac{P_r}{P_u} = \frac{P_u - P_a}{P_u} = 1 - \alpha \quad (2.2)$$

Коефицијент апсорпције порозних материјала се може одредити на основу теоријских принципа за различите начине уградње уз услов да су њихови основни параметри познати. „Прорачунавање коефицијента апсорпције порозног материјала је врло компликован поступак, а посебно зато што треба познавати низ карактеристика самог материјала“ [6].

Прорачунавање се најчешће може избећи користећи резултате мерења за сличне материјале. И у једном и у другом случају направиће се грешка, али се она лакше може оценити упоређивањем вредности. Посебно је значајно познавати поступак прорачуна када је за неки материјал познат коефицијент апсорпције за одређену дебљину и врсту потконструкције при његовој уградњи а потребна је његова примена у другим условима уградње.

Прорачунавање се може избећи одређивањем коефицијента апсорпције експерименталним путем, применом неке од метода мерења, или применом резултата мерења за сличне материјале. Међутим, експериментална испитивања су обимна, дуготрајна и скупа, и као таква често не могу имати практичну примену у решењима заштите од буке.

Звучни талас долази на површину порозног материјала која представља граничну површину. Од импедансе материјала на граничној површини зависи који ће се део инцидентне енергије рефлектовати а који ће бити апсорбован. Импеданса зависи не само од карактеристика самог материјала, чиме је одређена његова (специфична акустичка) карактеристика импеданса Z_{sc} , него и од његове дебљине d , од импедансе свега што се налази иза порозног материјала и од упадног угла звучног таласа (види слику 2.3.) [6].



Слика 2.3. Простирање звучног таласа кроз порозни материјал [6]

Осим тога коефицијент апсорпције зависи и од низа других фактора, као што је маса и еластичност носеће структуре (костура) порозног материјала, величине његове површине и места уградње.

Међусобна зависност звучног притиска p и брзине честица v [6] дата је једначинама:

$$\begin{aligned} \text{grad } \underline{p} &= -\frac{\rho}{\sigma}(\chi - j\eta) \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} \\ \text{div } \underline{v} &= -\frac{\sigma}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.3)$$

где је

$$\eta = R'_s \sigma / (\omega \rho) \quad (2.4)$$

а даље је R'_s подужна отпорност струјања порозног материјала, ρ густина ваздуха ($1,2 \text{ kg/m}^3$), χ фактор структуре материјала (вредности између 1 и 4), σ порозност материјала и c брзина простирања звука (за адијабатске промене узима се обично 340 m/s), v брзина честица у ваздуху испред граничне површине материјала.

Узимајући у обзир да се талас простира по оси u у равни xu (слика 2.3.), једначина (2.3) се може трансформисати у облик:

$$\text{div grad } \underline{p} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -\frac{\omega^2}{c^2}(\chi - j\eta) \underline{p} = \underline{\gamma}^2 \underline{p} \quad (2.5)$$

Чије је решење за прогресивни талас $\underline{p} = \underline{p}_+ e^{-\left(\underline{\gamma}_x x + \underline{\gamma}_y y\right)}$. Константа $\underline{\gamma}$ односи се на правац простирања по оси u .

Узимајући да се инцидентни талас дуж y -осе простира без губитака, коефицијент простирања по тој оси износи $\underline{\gamma}_y = j\frac{\omega}{c}\sin\theta$, тако да се компонента коефицијента простирања дуж x -осе може изразити као:

$$\underline{\gamma}_x = \sqrt{\underline{\gamma}^2 - \underline{\gamma}_y^2} = j\frac{\omega}{c}\sqrt{\chi - \sin^2\theta - j\eta} \quad (2.6)$$

Узимајући у обзир вредности компонената константе $\underline{\gamma}$, простирање таласа звучног притиска се може представити изразом:

$$\underline{p} = \underline{p}_+ e^{-j\frac{\omega}{c}\left(x\sqrt{\chi - \sin^2\theta - j\eta} + y\sin\theta\right)} \quad (2.7)$$

Коефицијент апсорпције зависи само од тзв. нормале (зидне) импедансе материјала [6], а то је однос $\underline{p}/\underline{v}_x$ на граничној површини. Компонента брзине нормална на граничну површину, дакле \underline{v}_x , добија се, изједначавајући $\partial \underline{p}/\partial x$ из једначине (2.4) и опште једначине (2.3), као:

$$\frac{\partial \underline{p}}{\partial x} = -j\frac{\omega \rho}{\sigma}(\chi - j\eta)\underline{v}_x = -j\frac{\omega}{c}\sqrt{\chi - \sin^2\theta - j\eta} \underline{p} \quad (2.8)$$

Из овог израза следи да је нормална импеданца бесконачно дебелог слоја порозног материјала, када талас долази под углом θ , и коефицијент простирања могу изразити у облику:

$$\underline{Z}_{n\infty} = \frac{\underline{p}}{\underline{v}_x} = \frac{\rho c}{\sigma} \sqrt{\frac{\kappa}{1,4}} \frac{\chi - j\eta}{\sqrt{\chi - \sin^2\theta - j\eta}} \quad (2.9)$$

$$\underline{\gamma}_n = j\frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1,4}{\kappa}} \sqrt{\chi - \sin^2\theta - j\eta} \quad (2.10)$$

Где је k однос специфичних топлота при сталном притиску и сталној запремини.

За прорачун коефицијента апсорпције треба познавати пре свега нормалну импедансу \underline{Z}_n на спољашњој граничној површини материјала. Нормална импеданца $Z_{n\infty}$, важи само за бесконачно дебео (у пракси врло дебео) слој материјала. Знајући $\underline{Z}_n = R_n + jX_n$, коефицијент апсорпције α_θ за таласе који долазе под углом θ налази се [7] по обрасцу:

$$\alpha_\theta = 1 - \frac{\left| \frac{\underline{Z}_n - \frac{\rho c}{\cos\theta}}{\underline{Z}_n + \frac{\rho c}{\cos\theta}} \right|^2}{\left(1 + \frac{\rho c}{R_n \cos\theta} \right)^2 + \left(\frac{X_n}{R_n} \right)^2} = \frac{\frac{4\rho c}{R_n \cos\theta}}{\left(1 + \frac{\rho c}{R_n \cos\theta} \right)^2 + \left(\frac{X_n}{R_n} \right)^2} \quad (2.11)$$

За одређивање средњег коефицијента апсорпције за све углове θ у дифузионом и хомогеном звучном пољу, израз (2.9) треба помножити фактором $\sin(2\theta)d\theta$ који узима у обзир и вероватноћу угла θ и пондерацију у вези са расположивом звучном енергијом при датом упадном углу [7], па интегралити у границама од 0 до $\pi/2$.

$$\alpha = \int_0^{\pi/2} \alpha_{\theta} \sin(2\theta) d\theta \quad (2.12)$$

Вредност коефицијента апсорпције је бездимензионална величина, фреквенцијски зависна чије се вредности крећу се у опсегу $0 \div 1$. Мале вредности коефицијента апсорпције имају материјали код којих се специфична импеданса знатно разликује од специфичне импедансе ваздуха. Велике вредности коефицијента апсорпције имају материјали код којих је специфична импеданса блиска специфичној импеданси ваздуха. Такви материјали називају се апсорпциони материјали, њихов коефицијент апсорпције је већи или једнак 0,3.

2.3. Апсорпциони материјали

Asdrubali, F. [8] и остали су истраживали акустички одрживе материјале, било природне или направљене од рециклираних материјала. Ови материјали су често алтернатива традиционалним синтетичким материјалима. Доказано је да израда звучне изолације од природних материјала, као што су влакна лана или рециклираних целулозних влакана исто добра као и изолација од стаклене вуне. Многи природни материјали (бамбус, кенаф, кокосова влакна) показују добру апсорпцију звука. Плута или рециклирана гума могу бити веома ефикасни као звучна изолација. Ови материјали показују и добре топлотне карактеристике и нису штетни за људско здравље и околину. Ayub и остали [9] су анализирали звучну апсорпцију од природног кокосовог влакна, применом модела Delany-Vazley. Повећање дебљине материјала од кокосовог влакна побољшава апсорпцију звука и помера максимум апсорпције према ниским фреквенцијама. Такође је анализиран утицај ваздушног простора у комбинацији са материјалом од кокосовог влакна и закључено је да повећање дебљине ваздушног простора помера максимум коефицијента апсорпције ка нижим фреквенцијама. Navaserrada [10] и остали су представили природни влакнасти материјал од лишћа дрвета као еколошку алтернативу која се може користити у грађевинарству у циљу заштите од буке. ALRahman [11] и остали су проучавали влакна природних материјала у правцу звучне апсорпције и заштите загађења животне средине. Ова студија представља експериментално истраживање о чистим микропорозним материјалима: палмино влакно и влакна кокосовог ораха. Истраживања су показала да дебљина и густина знатно утичу на апсорпционе карактеристике ових материјала. Мерења су вршена у импедансној цеви. Доказано је да мешавина палминих и кокосових влакана има могућност да замени синтетичке влакнасте материјале, као што су стаклена вуна, камена вуна, азбест. Повећањем дебљине слоја, као и густине, повећаће се и апсорпција ове мешавине при нижим фреквенцијама.

Порозне пене се могу производити од великог броја различитих материјала. Због тога је тешко дати уопштени приступ за проучавање акустичких особина пена [12]. Особине полиуретанских (PU) пена, као што су еластичност, релативно мала тежина, различита тврдоћа као и отпорност на механичка оптерећења су раширила подручја њихове употребе на врло широку лепезу различитих грана индустрије: аутомобилска, индустрија намештаја, текстилна, обућарска, производња амбалаже и грађевинарство [13]. Полиуретанске пене су доступне у широком спектру густина и дебљина па су као такве нашле широку примену у наведеним гранама индустрије и системима заштите од буке. ПУ пене су све чешће замена за минералну и камену вуну које су штетне по здравље човека

[14,15]. Jin [16] и остали су испитивали апсорпцију звука карактеристичних алуминијумских пена третираних плазма анодизацијом (електрохемијским површинским процесом). Отворене једноћелијске алуминијумске пене направљене су са различитим величинама пора. Утврђено је да је коефицијент апсорпције значајно побољшан увођењем ваздушног простора између испитиваног узорка и задње површине. Овај коефицијент је већи са повећањем броја пора. Максимални коефицијент апсорпције звука је порастао за 5,5% након плазма анодизације. Ово побољшање се приписује микропорама и грубој површини, односно површинској обради узорка. Kino, Nakano & Suzuki су истраживали акустичка и неакустичка својства умрежених и делимично умрежених полиуретанских пена. Посебну пажњу су посветили истраживању фактора структуре и дали његову зависност од температуре [17]. Pompoli & Bonfiglio [18] су спровели експериментално истраживање полиуретанских пена са отвореним ћелијама. Материјали су показали различите акустичке перформансе, углавном због нехомогености тестираних узорка. „Ваља истаћи да због непостојања адекватне контроле процеса производње пена, ови материјали могу да показују велику варијабилност акустичких особина, чак и када су номинално идентични“. Вуковић и остали у свом раду [19] наводе да промена састава реактанта и услова синтезе полимера омогућава добијање ПУ за различите намене, као што су израда премаза, влакана, тврдих и меких пена, умрежених еластомера и линеарних – термопластичних еластомера. Lauriks и остали [20] су представили звучну апсорпцију са апроксимацијом да се у влакнастом апсорберу простире један талас. Ова теорија је потврђена само на високопорозним еластичним пенама са отвореним ћелијама. Ghaffari Mosanenzadeh и остали [21] су истраживали звучну апсорпцију дво модалне биоразградиве пене. Циљ је био да се развије отворена ћелијска структура, као еколошки производ за заштиту од буке. Теоријско предвиђање акустичких својстава порозних материјала је тежак задатак због компликоване структуре ћелија ових материјала. Kino и остали [17] су представили акустичка и неакустичка својства умрежених и делимично умрежених полиуретанских пена. Мерења су извршена на 4 врсте полиуретанских пена са отвореним порима ћелијске структуре и порима које су делимично затворене мембранама.

Истраживања различитих аутора су показала да се од рециклиране гуме могу направити материјали са жељеним акустичким својствима. Pfretzschner & Rodríguez [22], су доказали да гумене грануле могу бити добар звучни апсорбер, за широкопојасну апсорпцију, што је веома погодно за заштиту од саобраћајне буке. Swift и остали [23], су утврдили да ови материјали могу ефикасно да апсорбују звук, ако су величина гранула гуменог агрегата и садржај везивног средства пажљиво одабрани. Погодним избором дебљине материјала може се остварити жељена звучна апсорпција на одговарајућој фреквенцији. Hong и остали [24], су представили могућност апсорпције звучне енергије за материјале од рециклиране гуме, истичући их као јефтине широкофреквентне апсорбере, са релативно једноставним начином израде и обраде. Nogoshenkov & Swift [25], су показали да примена везива има велики утицај на акустичка својства у мешавини са рециклираном гумом. Раје и остали [3], су показали да акустичке перформанце коловозних површина направљених као мешавина асфалта и рециклиране гуме дају ниво буке који је за 2 dB нижи у односу на чист асфалт. Нап и остали [26], су утврдили да грануле рециклиране гуме представљају одличан материјал за комбиновање са бетоном за израду звучних баријера поред фреквентних саобраћајница, на местима где оне пролазе кроз стамбена подручја. У раду Радичевић и Ристановић [27] приказани су резултати истраживања акустичких особина материјала на бази рециклиране гуме. Пошто ову област прати и одговарајућа законска регулативе, у

раду су такође приказана законска ограничења у том домену која постоје у свету и Србији. Приказани су подаци о количинама отпадне гуме у свету и у Србији, са процењеним могућим обимом коришћења рециклиране гуме. Анализа је извршена да би се утврдила потенцијална сировинска база, потребна за производњу нових производа. Када се звук распростире у међусобно повезаним порам порозног материјала, он губи своју звучну енергију. Овај губитак енергије настаје због сложене хетерогене микроструктуре и вискозних ефеката граничног слоја, тако да се звучна енергија расипа путем трења са зидовима пора. Као и вискозни ефекти постоје губици услед топлотне проводљивости из ваздуха до порозног материјала, који су изражени на ниским фреквенцијама. У раду [28] су приказани еколошки проблеми који настају као последица складиштења и прераде коришћених аутомобилских гума. У земљама где је питање коришћених гума решено на безбедан начин, део коришћених гума се директно или после обнављања поново користи на возилима, а остатак се прерађује у полупроизоде и готове производе или се користи као енергент. У процесу безбедног управљању отпадним гумама у свету предњаче Норвешка и Швајцарска са 95%, следе Јапан са 91% и САД са 89% рециклираног отпада те врсте. Акустичка својства гуме била су предмет многих истраживања [23,27,29–36] са циљем да се испита могућност употребе гумених баријера и панела за редуковање буке. Показало се да су прелиминарни резултати коефицијента апсорпције ових гумених узорака, у условима нормалне инциденције, прилично велики. Будући да се ти узорци праве од гранула рециклиране гуме, промена конструкционих параметара (величина гумених гранула, компактност узорка, дебљина) ће утицати на акустичка и механичка својства узорка. У раду [27] су приказана апсорпциона својства материјала од рециклираног гуменог отпада. Утврђено је да ови материјали испољавају висок ниво звучне апсорпције у подручју средњих фреквенција што није својствено већини апсорпционих материјала.

Недавне студије показују да се растресито гранулисани узорци рециклираних материјала мешају са везивом и постају добро уједначени, еластични, порозни медији комбинујући добра механичка и акустичка својства. Различитим методама анализе су пронађене зависности између неколико параметара. Експериментални резултати су повољни у односу на нумеричка предвиђања која се заснивају на једноставном моделу за порозне еластичне плоче. Код консолидованих рециклираних пена мале густине, уочена су високо изолациона својства као и велика отпорност струјању ваздуха. Ови материјали нуде добре апсорпционе и изолационе перформансе, релативно су ниске густине и имају високу чврстоћу [37]. Ана Gheorghe [38] приказује акустичка својства изражена коефицијентом звучне апсорпције на примеру нових композитних структура. У том смислу су направљени материјали са гуменим честицама, материјали од рециклиране гуме и полиуретанског везива. Композитни материјали се све више користе за звучну изолацију. Посебно су значајни композити који се могу окарактерисати као „зелени“ који укључују различите рециклиране материјале као што су. рециклирана гума, рециклирана пластика, и материјали из отпада индустријских процеса. Zainulabidin [39] и остали су проучавали акустичке особине две врсте материјала: гумене сунђере и влакна стаклене вуне. Утврђено је да гумени сунђер има добру апсорпцију звука при нижим фреквенцијама (око 1000 Hz). Влакна стаклене вуне имају добру апсорпцију звука на вишим фреквенцијама, (око 3500 Hz). Комбиновањем ове две врсте материјала, добија се узорак који је добар при апсорпцији звука у средњем опсегу фреквенција. Hasan [40] и остали су испитивали материјале на бази цемента. Мешане су епоксидне смоле и полимери, као учвршћивачи, у односу 2:1.

Акустичка испитивања су вршена у импедансној цеви на узорцима дебљине 150 mm која одговара реалним условима примене испитиваних материјала. Theophilus [41] и остали су испитивали и анализирали апсорпциона својства мешавине пиљевине, гипса, блата и песка, помешаних у различитим количинама. Оваквим испитивањем су одређени коефицијент звучне апсорпције и акустичка импеданса за све врсте мешавина. Mahzan [42] и остали су проучавали природна влакна. Конкретно, ова студија истражује употребу пиринчане љуске као потенцијалног елемента за упијање звука. Пиринч се прво очисти и осуши а затим се комина осушеног пиринча меша са полиуретанском пеном (PU) која служи као везиво. Резултат је показао најбоља апсорпциона својства узорака са 25% комине. Када је реч о коефицијенту апсорпције звука, закључено је да ова мешавина има веома добра акустичка својства када су ниске фреквенције у питању. Резултати су такође показали да ова мешавина има бољи коефицијент апсорпције звука у односу на друге природне материјале. Soleimani [43] и остали испитивали акустичке особине мешавине влакана дрвета и рециклиране пластике. Узорци се суше и стоје у калупима одређено време. Испитивањем је утврђено да је додавањем нано глине у композит, упијање воде опало и да пластика има занемарљиво упијање воде. Perná [44] и остали су испитивали коефицијент апсорпције материјала који настаје мешањем геополимера и песка. Геополимер се користи као замена за епоксидну смолу. Такође, ова студија истражује и количине песка и његове фракције у мешавинама. Поред коефицијента апсорпције, фракције гранулата, говори се и о дебљини мешавине. Истраживан је коефицијент звучне апсорпције у опсегу од 100 Hz до 2500 Hz. Као резултат испитивања показало се да мешавина геополимер-песак има добра апсорпциона својства. Комбинација две различите фракције честица песка изазива побољшање коефицијента апсорпције до 0,87. Овај коефицијент опада нагло од 1600 Hz. Mahzan [45] и остали су истраживали како се кокос може користити као основна а рециклирана гума као секундарна сировина у мешавини која ће имати добре акустичке особине. Ове две врсте материјала су помешане додавањем полиуретана као везива. Резултати испитивања су добијени за различите узорке са 25% и 35% полиуретана респективно. Обе врсте узорака су показале веће вредности коефицијента апсорпције за средње и високе фреквенције у опсегу од 1400 Hz до 6300 Hz. Узорци са 25% полиуретана показују супериорне перформансе у односу на узорке са 35%. Gayathri [46] и остали су вршили испитивања полиуретанских пена. Механичке особине PU пена су показале значајно побољшање са додатком пуниоца. Полиуретанска пена са 1,4% тежине нано силицијум-диоксида, гуме или нано глине може побољшати звучну апсорпцију у доњем фреквенцијском опсегу од 100-200 Hz, поред већ побољшаних термичких и механичких особина. М. Ramesh Kumar [47] и остали су испитивали одрживе грађевинске материјале и њихова акустичка својстава. Већина ових материјала има велику густину па се може користити у аутомобилској индустрији. Истраживани су материјали од јуте, индустријског чаја, иверице мале и средње густине, багрема, конопље, гуме и других материјала. Yilmazer, S. и остали [48] су вршили испитивања да ли влага утиче на акустичке особине 4 врсте плоча које су направљене од експандираног перлита. Вршено је тестирање које се односило на густину, порозност, пропустљивост ваздуха а затим и коефицијент апсорпције. За одређивање коефицијента апсорпције коришћена је импедансна цев са два микрофона. Ову методу су предложили Seybert & Ross [49] а развијена је од стране Chung & Blaser-a [50]. Са повећањем влажности смањује се коефицијент звучне апсорпције.

2.4. Методе за мерење отпорности струјању ваздуха

Отпорност струјању ваздуха је један од главних неакустичких параметара који показује понашање порозних материјала који се користе у системима звучне апсорпције.

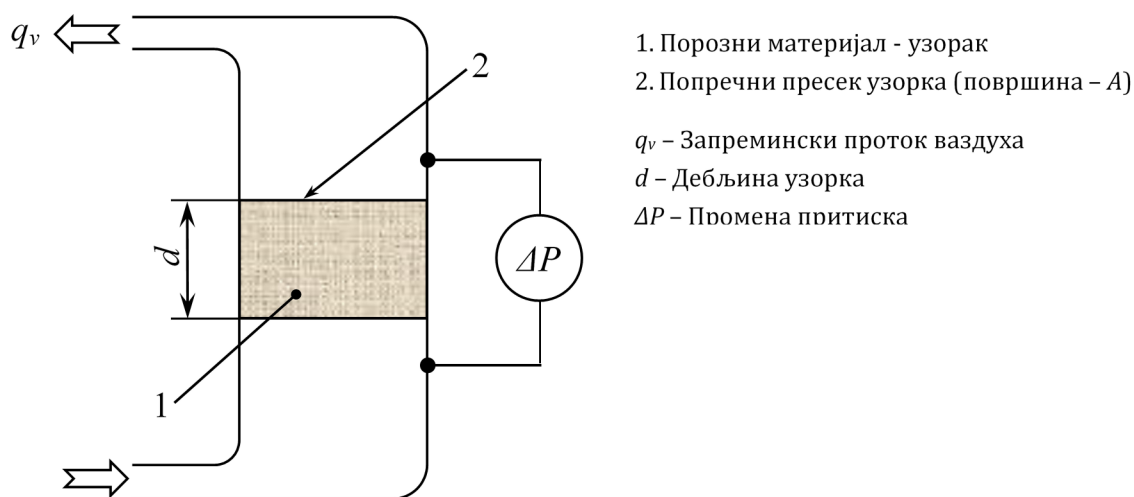
Мерни системи за одређивање отпорности струјању ваздуха омогућавају тестирање узорака у циљу истраживања и развоја порозних апсорпционих материјала као и контролу квалитета ових материјала у процесу производње. Стандард SRPS ISO 9053 предвиђа две методе за мерење отпорности струјању ваздуха, као што је приказано на слици 2.4.



Слика 2.4. Методе за мерење отпорности струјању ваздуха

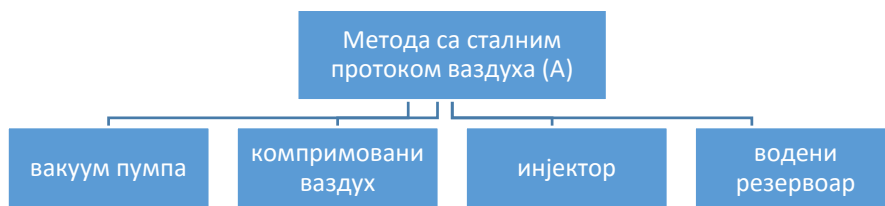
2.4.1 Метода са сталним протоком ваздуха

Метода се заснива на проласку једносмерног ваздушног протока кроз узорак за испитивање у облику кружног цилиндра или правоуглог паралелопипеда и мерење резултујућег пада притиска између две слободне површине узорка.



Слика 2.5. Метода са сталним протоком ваздуха (метода - А) - Основни принцип

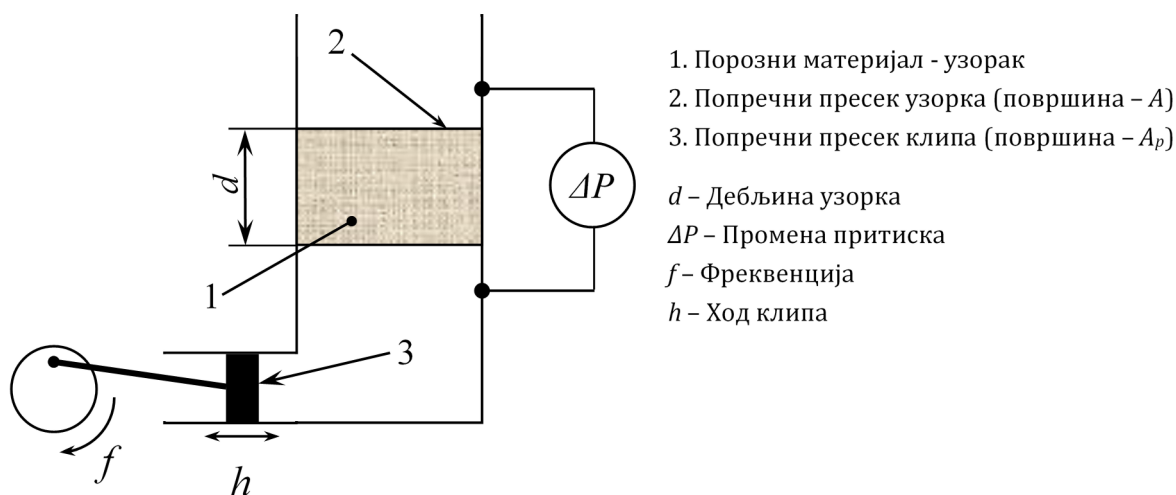
У зависности од начина обезбеђења ваздушног протока, метода са константним протоком ваздуха се може реализовати на више начина. Стварање ваздушног протока може се реализовати помоћу: вакуум пумпе, компримованог ваздуха, воденог резервоара и ињектора (слика 2.6.). Пад притиска се мери помоћу диференцијалног мерача притиска.



Слика 2.6. Начини обезбеђења ваздушног протока код методе са сталним протоком ваздуха

2.4.2 Метода са променљивим протоком ваздуха

Метода се заснива на проласку споро променљивог ваздушног протока кроз узорак за испитивање у облику кружног цилиндра или правоуглог паралелопипеда и мерење наизменичних компонента притиска у испитној запремини коју затвара узорак.



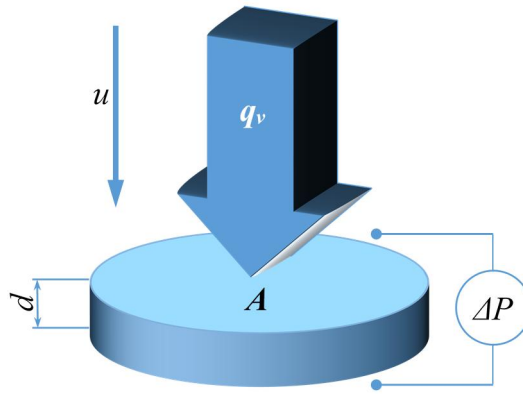
Слика 2.7. Метода са променљивим протоком ваздуха (метода - В) - Основни принцип

Наизменична брзина (запреминског) ваздушног протока производи се помоћу клипа који се креће синусоидно приближном фреквенцијом 2 Hz.

Наизменични притисак у држачу узорка мора се мерити бочно монтираним кондензаторским микрофоном који је повезан са једним мерним појачивачем. Опрема за мерење притиска мора да буде калибрисана помоћу пистонфона везаног на држач узорка.

2.4.3 Основне величине и услови испитивања

Кроз површину узорка од порозног материјала ламинарно струји ваздух одређене брзине и запреминског протока. Са предње и задње стране узорка се мери разлика притиска. Шематски приказ процеса мерења је приказан на слици 2.8.



Слика 2.8. Шематски приказ мерења отпорности струјању ваздуха [51]

Отпорност струјању ваздуха представља однос између разлике притиска и запреминског протока.

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.13)$$

где је:

- Δp – разлика ваздушног притиска испред и иза узорка за испитивање у односу на атмосферу, у [Pa].
- q_v – (запремински) ваздушни проток кроз узорак за испитивање, у [m^3/s].

У акустици се чешће користи специфична отпорност струјању ваздуха (R_s), која у ствари представља акустичку импедансу. Специфична отпорност струјању ваздуха (R_s) је посебно корисна за упоређивање акустичких материјала јер не зависи од површине. Варијације у дебљини материјала и величини пора ће мењати вредност специфичне отпорности струјању ваздуха.

Специфична отпорност струјању ваздуха се израчунава према изразу:

$$R_s = R \cdot A \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right] \quad (2.14)$$

где је:

- R – отпорност струјању ваздуха узорка за испитивање, у [$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$]
- A – површина попречног пресека узорка за испитивање управна на правац протока, [m^2]

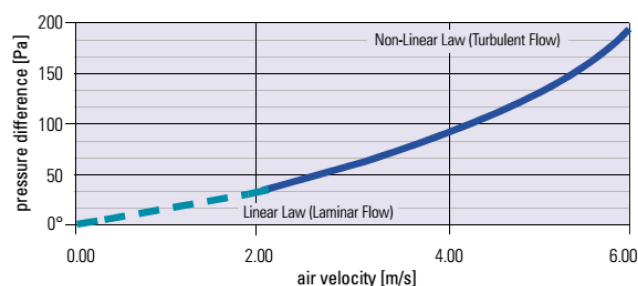
Подужна (специфична) отпорност струјању ваздуха је величина која је погодна за избор дебљине апсорпционог материјала. Ово је посебно значајно за пенасте материјале јер се они могу производити у много различитих дебљина. Подужна (специфична) отпорност струјању ваздуха се одређује према изразу:

$$r = \frac{R_s}{d} \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.15)$$

где је:

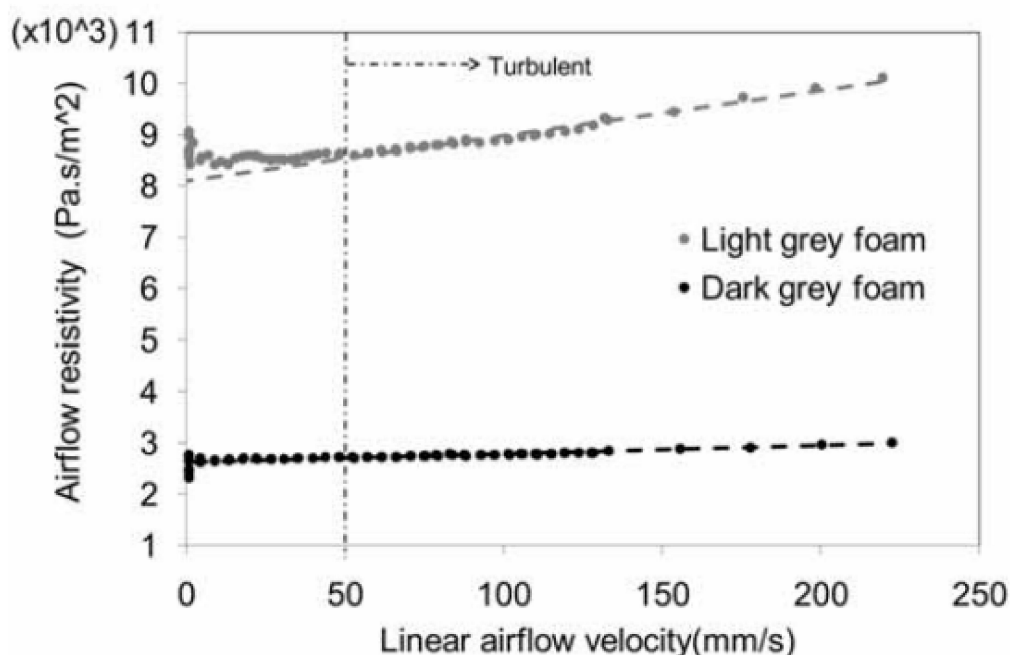
– d – дебљина узорка за испитивање у правцу протока, у [m].

У случају поступка који користи стални проток ваздуха, пад притиска Δp се може измерити или директно при брзини $0,5 \text{ mm/s}$ или постепено снижавањем до најниже могуће границе брзине ваздуха. При постепеном смањењу брзине ваздуха, за сваки узорак даје се графички приказ специфичне отпорности струјању у функцији брзине ваздуха. Из дијаграма се одређује специфична отпорност струјању ваздуха при брзини струјања од $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, графичким усредњавањем или ако је то потребно екстраполацијом.



Слика 2.9. Вредности пада притиска које обезбеђују ламинарно струјање [52]

Како би се извршило прецизно мерење отпорности струјању ваздуха, проток ваздуха мора бити линеаран, и не може да се обезбеди са типичном опремом која нема могућност подешавања веома малих протока. На слици 2.9. је приказано подручје вредности пада притиска које обезбеђује ламинарно струјање ваздуха.



Слика 2.10. Гранична вредност брзине при ламинарном струјању ваздуха у мерној ћелији [53]

На слици 2.10. која је преузета из рада [53] приказано је подручје брзина струјања, као и гранична вредност, при којима се постиже ламинарно струјање ваздуха.

У раду Коларевић, Радичевић и остали [51] приказана је методологија пројектовања и реализације мерног система за мерење отпорности струјању ваздуха. Примењена је метода са сталним протоком ваздуха према стандарду SRPS ISO 9053. Новоразвијена мерна ћелија

у комбинацији са постојећом лабораторијском опремом чини комплексни мерни систем који има вишеструко нижу цену у односу на комерцијална решења. Tomczyk & Niemas [54] су представили начин анализе мерне несигурности и прорачуна специфичне отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха, кроз анализу поновљивости и репродуктивности. У раду Allan J. Zuckerwar-a [55] је приказан инструмент на бази мерења отпорности струјању ваздуха за *in situ* теренска мерења изнад земљине површине. Метода се може користити и у ситуацијама где се садржај влаге мења, рецимо као што су травнате површине. Schiavi и остали [56] су истраживали утицај статичког оптерећења на подужну отпорност струјању порозних материјала. Основни циљ овог рада је био да се предложи усклађивање захтевима стандарда, да би се спречиле значајне грешке у одређивању динамичке крутости и нетачне оцене акустичког понашања.

2.5. Методе за мерење коефицијента апсорпције

2.5.1 Мерење коефицијента звучне апсорпције у Кунтовој цеви (SRPS U.J6.224)

Мерења у Кунтовој цеви се примењују најчешће приликом истраживања нових апсорпционих материјала и њихове израде када апсорпционе карактеристике зависе од више променљивих параметара. Време и трошкови испитивања су далеко мањи у односу на реверберациону комору. Не постоји једнозначна веза између резултата добијених мерењем коефицијента апсорпције у цеви и добијених у реверберационој комори (SRPS U.J6.224). Време реверберације се не може израчунати на основу резултата мерења коефицијента апсорпције у цеви. Ако импеданса не зависи од упадног угла и бочних димензија узорка резултати коефицијента апсорпције су применљиви и за дифузно звучно поље.

Коефицијент апсорпције прорачунава се из добијеног коефицијента рефлексије:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.16)$$

Коефицијент рефлексије (r) представља однос звучних притисака рефлектованог таласа и упадног таласа (p_a). Коефицијент рефлексије је у општем случају комплексана величина која се одређује према изразу:

$$r = \frac{P_r}{P_a} = r_e^{j\gamma} \quad (2.17)$$

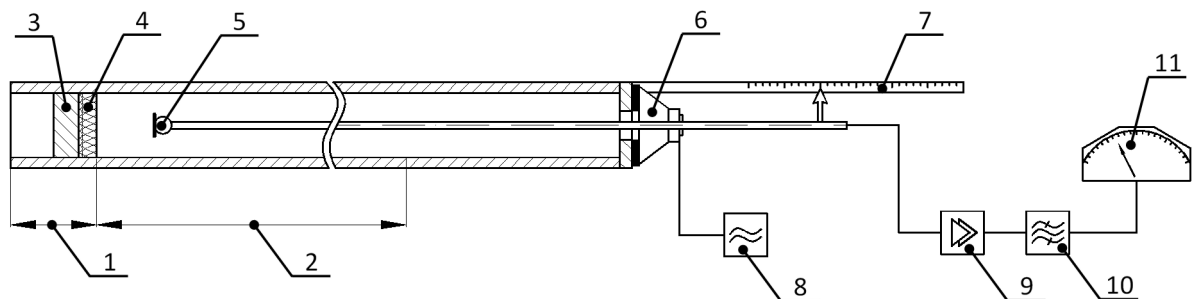
При нормалној инциденцији модуо коефицијента рефлексије се одређује на основу количника притиска код стојећег таласа на месту максимума односно минимума p_{\max}/p_{\min} према изразу:

$$r = \frac{\frac{P_{\max}}{P_{\min}} - 1}{\frac{P_{\max}}{P_{\min}} + 1} \quad (2.18)$$

Промена фазе услед рефлексије инцидентног и рефлектованог таласа одређује се мерењем растојања Δx у односу на произвољно одабрану референтну раван која је нормална на осу цеви и таласне дужине λ која се одређује као двоструко растојање два суседна минимума.

$$\gamma = \left(\frac{\Delta x}{\lambda/4} - 1 \right) \cdot \pi \quad (2.19)$$

Мерну опрему чине цев, звучни извор, тон-генератор и апаратура за мерење притиска. Цев се састоји из дела за узорак, мерног дела и цевног завршетка. Димензије мерног дела цеви се утврђују на основу фреквенцијског опсега. Дужина мерног дела цеви мора бити већа од једне половине таласне дужине. Дужина мерног дела цеви одређује доњу граничну фреквенцију. Из услова да у мерном делу цеви смеју да настану само равански таласи, одређује се горња гранична фреквенција. Попречни пресеци цеви могу бити кружни и квадратни. Да би се задовољио критеријум горње граничне фреквенције, код квадратног попречног пресека ширина цеви мора да буде мања од половине таласне дужине а при кружном пресеку пречник цеви мора да буде мањи од $0,6\lambda$.



- | | |
|-----------------------------|------------------|
| 1. Мерни део цеви | 7. Мерна скала |
| 2. Део за узорак | 8. Топ-генератор |
| 3. Завршна плоча (затварач) | 9. Појачавач |
| 4. Узорак | 10. Филтар |
| 5. Пресиони микрофон | 11. Индикатор |
| 6. Звучник | |

Слика 2.11. Пример распореда мерне опреме са звучником постављеним на крају мерне цеви у правцу осе: део за узорак је са помичном завршном плочом

Унутрашњост цеви мора да буде глатка и без пора. Зидови цеви и завршни делови цеви морају да буду довољно тешки и крути да би се отклонила могућност вибрације зидова цеви које могу реметити звучно поље у цеви. Држач узорка не сме да сузи слободни пресек цеви за више од 5%. Део за узорак мора имати толику дужину да иза узорка остане простор од $\lambda/4$, при најнижој мерној фреквенцији. Поклопац цеви мора да има масу која одговара површинској маси од 220 kg/m^2 и по ободу мора бити добро заптивен.

Звучник мора да се постави у правцу осе у кутији на крају цеви и да буде изолован на структурни звук. Као пријемник звучног притиска може се применити сваки пресиони микрофон. При мерењу се одређује релативни однос два притиска а не њихове појединачне апсолутне вредности. Да се звучно поље не би пореметило, микрофон, његов држач и уређај за померање не смеју смањити површину попречног пресека цеви за више од 5%. Микрофон мора бити добро изолован од мерне цеви и звучника у погледу структурног звука. Мора бити омогућен систем за читавање позиције микрофона у односу на

референтну раван. За мерење звучног притиска потребан је појачавач са октавним или терцним филтрима. За тачнија испитивања морају се мерити више максимума и минимума, као и њихова одстојања од референтне равни.

Контрола мерне апаратуре се врши мерењем односа p_{\max}/p_{\min} за варијанту када је мерна цев затворена само завршном плочом. Овај однос мора бити најмање 100 за све мерне фреквенције. На основу измерене вредности добија се горња граница за могућу грешку мерења услед губитка у цеви и бочног провођења структурног звука.

За порозне материјале је најчешће довољно да се мерење изврши по терцама. Код ових материјала нехомогености могу да наступе услед више фактора, па је због тога потребно испитивати више узорака, посебно ако је попречни пресек цеви мањи. Узорак мора да попуни пресек цеви равномерно и без сабијања. Узорак мора да буде причвршћен на одговарајући начин.

2.5.2 Мерење коефицијента апсорпције у импедансној цеви - Метода помоћу стојећих таласа (SRPS EN ISO 10534-1:2008)

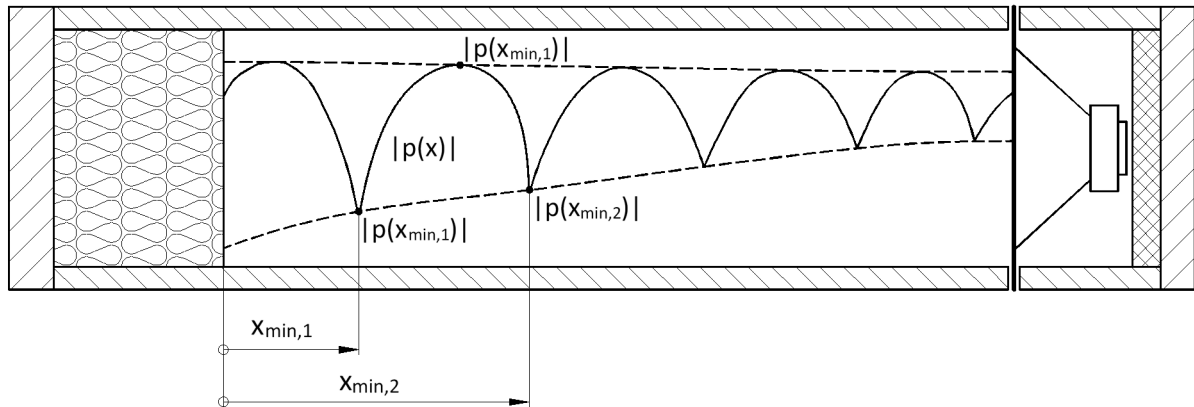
Овај стандард прецизира метод за одређивање коефицијента звучне апсорпције, коефицијента рефлексије површинске импедансе или површинске адмитансе материјала или апсорбера. Вредности су одређене за нормалну звучну инциденцију за стојећи талас у цеви који је формиран суперпозицијом инцидентног таласа и таласа који је рефлектован од површине материјала који се испитује.

Овај поступак се може користити за одређивање коефицијента апсорпције звучних апсорбера за нормалну звучну инциденцију. Поступак се може користити за одређивање акустичке импедансе звучно апсорпционих материјала. Поступак је погодан за случај анализе и пројектовања звучних апсорбера зато што су потребни мали узорци материјала, што га чини релативно једноставним, економичним и практичним за примену.

Стандард SRPS EN ISO 10534-1 утврђује методе за одређивање коефицијента звучне апсорпције фактора рефлексије и површинске импедансе или површинске админтансе материјала и објеката. Вредности су одређене за нормалну инциденцију звука а процењује за модел стојећег таласа.

Мерења у импедансној цеви описују методе где се мери звучно поље унутар цеви. Узорак материјала је постављен на једном крају круте и глатке цеви а звучник се налази на другом крају цеви. Микрофон је везан тако да може бити померан унутар цеви. Звучник генерише звучно поље које се затим мери и анализира. Вредности коефицијента апсорпције су одређене за нормалну инциденцију звука.

Инцидентни синусоидни талас p_i се генерише у звучнику који је постављен на једном крају цеви. Суперпозицијом инцидентног таласа и рефлектованог таласа p_r у цеви настаје стојећи талас $p = p_i + p_r$. За овако формиран талас могуће је измерити максималне и минималне вредности амлитуде звучног притиска, било на линеарној или логаритамској скали. Осим тога, у односу на референтну раван може се одредити положај узастопних минимума и максимума звучног притиска. Ови подаци су довољни за одређивање коефицијента звучне апсорпције.



Слика 2.12. Одређивање коефицијента звучне апсорпције – Метода стојећих таласа

Импеданса на површини материјала дефинише се као однос између звучног притиска и брзине честица према изразу.

$$Z_n(f) = \frac{p(f)}{u(f)} \quad (2.20)$$

Звучни притисак се помоћу микрофона може измерити веома прецизно, међутим мерење брзине честица још увек није интегрисано у ову методу, иако постоје системи за овакву врсту мерења. Брзина честица може да се израчуна на основу мерења звучног притиска унутар цеви [57].

$$u_i(x) = \frac{1}{Z_0} p_i(x) \quad (2.21)$$

$$u_r(x) = -\frac{1}{Z_0} p_r(x) \quad (2.22)$$

Где је Z_0 импеданса равног таласа. Рефлектовани равни талас се може написати као функција коефицијента рефлексije према изразу [57].

$$p_r(x) = r p_0 e^{-jk_0 x} \quad (2.23)$$

Где је $p_i(x) = p_0 e^{-jk_0 x}$ комплексни израз инцидентног таласа. За инцидентни талас се претпоставља да је раван, хармоник од фреквенције, и да нема пригушења унутар цеви. Када је $x=0$ [57],

$$Z = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \quad (2.24)$$

и

$$r = Z_0 \frac{(Z - Z_0) - 1}{(Z - Z_0) + 1} \quad (2.25)$$

Акустичка апсорпција може се израчунати према изразу:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (2.26)$$

Постоје неке карактеристичне разлике између овог метода и мерења звучне апсорпције у реверберационој комори. Поступак у импедансној цеви се може користити за одређивање коефицијента рефлексije, импедансе и адмитансе. Звук је нормалне инциденције у односу на површину објекта. Мерењем у реверберационој комори одређује се коефицијент звучне апсорпције за случајну звучну инциденцију.

Метод импедансне цеви ослања се на постојање равног инцидентног звучног таласа и даје веома тачне вредности коефицијента звучне апсорпције под условом да не постоје грешке мерења и монтаже узорка. Овај метод захтева величине узорака које су једнаке попречном пресеку цеви. Мерење у реверберационој комори захтева узорке који су прилично велики и може се применити и за тестирање узорака са израженим структурама у нормалном или бочним правцима. Мерења са таквим објектима у импедансној цеви се морају узети са опрезом. Резултати мерења се могу представити графички и нумерички а стандард даје предност нумеричким методама.

2.5.3 Мерење коефицијента апсорпције у импедансној цеви - Метода трансфер функције

Метода трансфер функције за мерење коефицијента апсорпције је детаљно описана у поглављу 3.2.1. у склопу описа метода и опреме које су коришћене у овом раду. У раду Ристановић, Мијић [33] је дат опис једне реализације импедансне цеви која се користи за мерење коефицијента апсорпције и импедансе материјала у условима нормалне инциденције. За конструкцију су искоришћене цеви једног старог фабрички произведеног система „Кунтове цеви“ које су прерађене за нову намену. У реализованом систему уведена је једна оригинална модификација у начину калибрације микрофона уз примену посебног механичког додатка. Такође је анализиран утицај механичке спреге између звучника као побуђивача и физичке структуре цеви на резултат мерења коефицијента апсорпције. У раду је описана и софтверска апликација којим се аутоматски обављају мерења и приказују резултати. Chung & Blaser [50] су представили метод трансфер функције за мерење акустичких особина у цеви, за случј нормалне инциденције, мерењем звучног притиска на две локације у цеви.

2.5.4 Мерење звучне апсорпције у реверберационој комори према методи EN ISO 354

Реверберационе просторије треба пројектовати тако да нема паралелних зидова који су обрађени са материјалима који имају веома велики коефицијент рефлексije. На тај начин се у просторији формира дифузно и хомогено звучно поље које је последица веома великог броја рефлексija. На овај начин се обезбеђује да ниво звука у просторији у свим тачкама буде исти. У оваквим просторијама највећи део звучне енергије се рефлектује од граничних површина а само мали део бива апсорбован. На овај начин је омогућено веома дуго задржавање звучне енергије у просторији након престанка њеног генерисања. Време реверберације оваквих просторија је веома велико.

Реверберационе собе се пре свега користе за одређивање коефицијента звучне апсорпције апсорпционих материјала као и за одређивање изолационе моћи преграде.

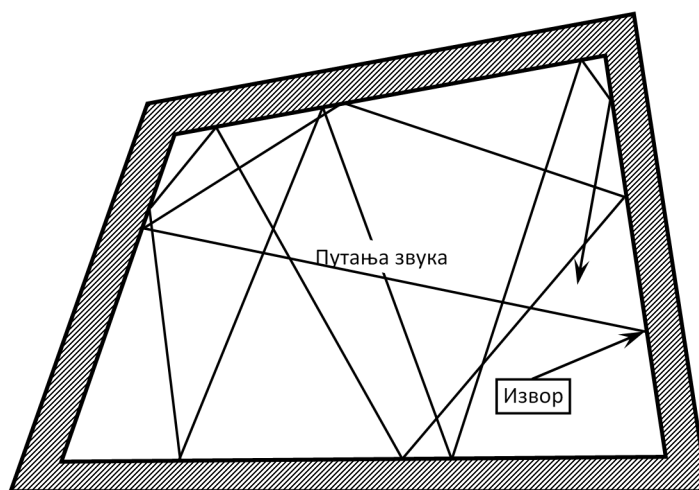
На основу оваквих испитивања могу се анализирати различите врсте материјала и њихови коефицијенти апсорпције и анализирати могућности примене за израду звучних апсорбера. Реверберационе коморе морају задовољити одређене стандардне захтеве по питању димензија, резидуалног нивоа звука и времена реверберације. Процедура испитивања коефицијента апсорпције је такође стандардизована, како би добијене вредности у различитим реверберационим просторијама биле упоредиве.

Просторија се у акустици уобичајено посматра као преносни систем који се описује његовим акустичким одзивом [58]. Просторије представљају тродимензионалне геометријске форме, у којима је импулсни одзив дефинисан просторним координатама извора и пријемника звучног сигнала. Сваки пар ових координата дефинише одговарајући импулсни одзив.

Временски импулсни одзив у просторијама је развучен у току времена, због коначне брзине простирања звука. Импулсни одзив има карактеристичан, приближно експоненцијални ток опадања своје обвојнице у току времена. Физички процес који се јавља у затвореним просторима након побуде звучном енергијом назива се реверберација и може се рећи да је она доминантни физички феномен који карактерише акустички одзив просторије као преносног система.

Темеље акустичке теорије затвореног простора, практично је поставио Sabine почетком прошлог века, када је звучно поље описао временом реверберације које показује брзину опадања обвојнице импулсног одзива просторије у току времена. Овај параметар као и једноставан израз за његово израчунавање све до данас су остали основа за оцену стања акустичког дизајна просторија.

Дифузно звучно поље и реверберациона теорија су међусобно повезане. Због тога се процес реверберације директно ослања на концепт дифузног звучног поља, који се базира на две полазне хипотезе: да је густина звучне енергије униформна у звучном пољу, и да је просторна дистрибуција звучне енергије такође униформна. У практичним околностима полазне хипотезе су испуњене само приближно, а потпуно дифузно звучно поље се остварује у посебним просторијама које се називају реверберационе коморе. Због немогућности остваривања полазних хипотеза, одступања између израчунатих и измерених вредности су практично неминовна.



Слика 2.13. Препоручени изглед реверберационе коморе

За остваривање хомогеног звучног поља, поред пожељног облика реверберационе коморе, потребно је да буде задовољен и однос димензија коморе $1:\sqrt[3]{2}:\sqrt[4]{2}$, да би се спречила појава интерференције таласа.

На структуру импулсног одзива просторије њена геометрија утиче на микроплану и макроплану. На макроплану тај утицај се остварује преко саме геометријске форме. Глобалне геометријске карактеристике, величине запремине и унутрашње површине, утичу на укупан ток криве обвојнице импулсног одзива, па промена геометријског облика и при истој запремини показује промене структуре импулсног одзива. На микроплану геометрија просторије утиче на структуру импулсног одзива кроз ефекте који се јављају на геометријским облицима граничних површина, јер од њих зависе законитости по којима се одвијају процеси рефлексije звука. За обим утицаја на микроплану релевантан је однос геометрије граничних површина, њихових димензија и величине таласне дужине звучних таласа [58].

Генерално посматрано, у затвореним просторијама део инцидентне звучне енергије упијају граничне површине у зависности од угла инциденције. Да би се смањило ниво буке у просторијама потребно је познавати податак о просечном коефицијенту апсорпције материјала са којима су обложене граничне површине за све углове инциденције. Дистрибуција звучних таласа у типичним просторијама обухвата широк и непредвидив низ углова, чија се равномерна дистрибуција узима као основ за потребе стандардизације. Уколико је интензитет звука независан од локације у затвореном простору, звук формира дифузно звучно поље, а звучни таласи пристижу на граничне површине са случајном инциденцијом. Звучно поље формирано у реверберационој просторији приближно одговара дифузном звучном пољу. Циљ стандарда који дефинишу методе и услове испитивања у реверберационој комори је да се обезбеди једнообразност како би резултати истраживања добијени у различитим лабораторијама били упоредиви.

Међународни стандард EN ISO 354:2003 утврђује методе за мерење коефицијента звучне апсорпције материјала који се користе за облагање зидова и плафона просторија, за одређивање еквивалентне звучне апсорпције објеката и особа или просторних апсорбера. Ове методе нису намењене за мерење апсорпције слабо пригушних резонатора. Добијени резултати се могу користити за прорачун и пројектовање акустике просторија и заштиту од буке.

Један од најважнијих параметара у акустици просторија је време реверберације. То је време за које ниво звука у просторији опадне за 60 dB од тренутка престанка побудног сигнала. Овај параметар одређује акустичке особине просторије. У зависности од намене просторије постоје препоручене границе за време реверберације. Време реверберације у просторијама је основни параметар за одређивање других акустичких параметара, као што је на пример коефицијент звучне апсорпције.

Често је нерационално а некада и немогуће, пратити опадање нивоа звука за свих 60 dB, па се региструје пад нивоа од 30 dB а у неким случајевима и за само 20 dB. Добијено време реверберације у оваквим случајевима се множи са односом нивоа од 60 dB (према дефиницији времена реверберације) и оствареног пада нивоа (најчешће 30 dB или 20 dB). Поред тога првих 5 dB опадања нивоа буке се обично не користе, јер врло често ток криве у том делу није карактеристичан.

Постоји више поступака за одређивање времена реверберације. Сви они се свде на побуђивање просторије широкопојасним сигналом или импулсном побудом и праћењем брзине нестанка звучног поља у просторији. Према стандарду ISO 3382 комора се побуђује електричним варничарем или широкопојасним шумом.

Коефицијент звучне апсорпције је фреквенцијски зависна величина, па се поступак мерења заснива на филтрирању импулсног одзива коморе по фреквенцијама. Уношењем материјала у реверберациону комору време реверберације се смањује, јер већа количина звучне енергије бива апсорбована а стандардом је дефинисано минимално потребно време реверберације по октавама. Време реверберације зависи од запремине коморе.

Табела 2.1. Уобичајено време реверберације реверберационе просторије [5]

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T_R [s]	29.9	23.3	17.5	15.6	9.7	4.5	2.9

Потребно је да звучни извор на свим фреквенцијама [59,60] генерише звучну снагу са задовољавајућом динамиком, која је прихватљива уколико је ниво звука 35 dB или 45 dB изнад позадинског шума [61]. Мерење акустичких параметара у просторији је дефинисано стандардима [61,62]. Мерење коефицијента апсорпције у реверберационој соби је дефинисано стандардом EN ISO 354.

Овај део стандарда утврђује методе за мерење времена реверберације у обичним просторијама. Он описује процедуру за мерење, потребне апаратуре, захтевани број мерних положаја и метода за процену података и представљање резултата мерења. Резултати мерења могу да се користе за исправку других акустичких мерења, тј. нивоа звучног притиска из звучних извора или мерења звучне изолације и за поређења са захтевима за време реверберације у просторијама.

Процена коефицијента звучне апсорпције у реверберационој комори заснива се на одређеном броју поједностављења и претпоставки о звучном пољу и величини апсорбера. Због тога се може десити да вредности коефицијента апсорпције прелазе вредност 1.

Принцип мерења коефицијента апсорпције материјала се заснива на мерењу времена реверберације празне коморе и поређење са мерењем када се у комору унесе одређена количина апсорпционог материјала.

На смањење нивоа звука након искључења побудног сигнала, поред површинске апсорпције граничних површина утиче и дисипација у ваздуху. Њен утицај значајно варира са променом температуре, релативне влажности ваздуха и посебно фреквенције. У литератури се могу наћи различити предлози за минимизацију утицаја дисипације у ваздуху. Један од њих је исушивање водене паре [63]. Да би се елиминисали утицајни фактори на дисипацију, повећање брзине мерења, може бити једно од решења, јер су у краћем временском интервалу промене температуре и релативне влажности далеко мање [64]. У том случају време реверберације се може израчунати према Sabine-овом обрасцу:

$$T_1 = 0,162 \frac{V}{A + A_d} \quad (2.27)$$

У изразу (2.27) са T_1 је означено време реверберације празне коморе, тј. пре уношења апсорпционог материјала чија се апсорпција испитује, V је запремина коморе; укупна апсорпција граничних површина коморе је означена са A , а апсорпција услед дисипације са A_d .

Уношењем апсорпционог материјала, еквивалентна апсорпциона површина се повећава за укупну површину ΔA

$$T_1 = 0,162 \frac{V}{A + \Delta A + A_d} \quad (2.28)$$

На основу израза (2.27) и (2.28) може се одредити апсорпција унетог материјала ΔA .

$$\Delta A = 0,162V \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.29)$$

Где T_2 представља време реверберације након уношења апсорпционог материјала у комору.

Коефицијент апсорпције унетог материјала се може одредити на следећи начин:

$$\alpha = \frac{\Delta A}{S} \quad (2.30)$$

Где је S – површина унетог узорка.

Теоријски, време реверберације не зависи од положаја извора звука и од места на којем се налази микрофон у просторији. Међутим, у пракси постоје извесне разлике у резултатима, до којих долази из разних разлога, као на пример раније наведена дисипација. Због тога се, мерење понавља за више позиција извора и микрофона, па се онда налази средња вредност.

Време реверберације се мери у новоизграђеним или реновираним просторијама које имају посебну намену, за које је потребна одређена акустичка обрада, како би се на време училе евентуалне неправилности. Пошто је мерна опрема усавршена и лако преносива, оваква врста мерења је постала рутинска и крајње једноставна.

2.6. Модели

2.6.1 Модели за одређивање отпорности струјању ваздуха

“Подужна отпорност струјању ваздуха је основни опредељујући параметар за звучну апсорпцију порозних материјала” [65]. Поједини аутори [18,66] су указивали на проблем превеликих грешака приликом одређивања подужне отпорности струјању ваздуха, које настају пре свега као последица нехомогености узорака од полиуретанске пене. М.Р. Joshi и остали [15] су закључили да варијације коефицијента апсорпције полиуретанских пена потичу због одступања вредности подужне отпорности струјању ваздуха које настаје због нехомогености и анизотропности узорака. Dragonetti и остали [65] су развили методу за мерење отпорности струјању ваздуха, заснованој на наизменичном протоку ваздуха, која не захтева калибрацију, тако да се може реализовати помоћу инструмената и алата који су доступни у већини акустичких лабораторија. Ingard & Dear [67] су предложили мерење

отпорности струјању у цеви са звучним извором. Кроз порозни узорак пролази звучни талас, а звучни притисак се мери непосредно испред узорка и иза узорка на одређеном растојању. Alesandro Schiavi и остали [56] су истраживали утицај статичког оптерећења на специфичну подужну отпорност струјању еластичних порозних материјала.

Отпорност струјању ваздуха се обично повећава са повећањем густине. У научној литератури налази се мало радова посвећених предвиђању отпорности струјању ваздуха порозних влакнастих материјала [34]. Ситуација са пенастим материјалима у овој области је још лошија. Bies и Hansen [68] су представили модел који омогућава израчунавање подужне отпорности струјању ваздуха влакнастих материјала полазећи од густине и пречника влакана порозног материјала. Врсте материјала за које овај модел даје најбоље резултате су углавном хомогени влакнасти материјали и пенести материјали са отвореним ћелијама. Полазећи од модела Biesa & Hansena, Kino & Ueno [69] су развили нови однос између подужне отпорности струјању и густине за меламинаске пене, користећи еквивалентни пречник влакна. Garai & Pompoli [34] су представили једноставан модел који омогућава израчунавање подужне отпорности струјању у зависности од густине материјала од полиестер влакана. Ограничења овог модела су прилично униформни пречник влакна и занемарен утицај везивног средства. Viggo Tarnow [70] је представио нови начин прорачуна подужне отпорности струјању ваздуха за скуп насумично постављених паралелних цилиндара. Поступак прорачуна код једнодимензионалног и дводимензионалног модела је исти: линеаризована Navije-Stoksova једначина за брзину је решена у потпуности или приближно са граничним условима које даје геометрија проблема. Narang [71] је у свом истраживању полиестер влакана уочио да отпорност струјању ваздуха за ове материјале не прати емпиријске релације које су раније развијене за стаклена влакна. Ballagh K.O. [72] је предложио емпиријски модел за одређивање подужне отпорности струјању у зависности од густине и пречника влакна вуне. Yang & Chen [73] су представили модел у коме отпорности струјању ваздуха зависи од средњег размака између стаклених влакана, смоле као везивног средства и физичких особина ваздуха.

Yang & Chen [73] су испитивали подужну отпорност струјању ваздуха филца од стакленог влакна. Према овом моделу подужна отпорност струјању ваздуха зависи од средњег размака између влакана, удела смоле као везивног средства и физичких особина ваздуха. Влакнасти материјали су анизотропни, тако да подужна отпорност струјању ваздуха зависи од смера протока кроз материјал. Модел даје прогнозе које су релативно близу директних мерења. Alba и остали [74] су представили инверзни модел за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха, пречника влакна и порозности на бази мерења коефицијента звучне апсорпције у импедансној цеви. Mills [75] је у свом раду претпоставио да пропустљивост PU пене вероватно јесте функција површине највећег отвора у ћелији.

Mirowska & Czyzewski [76] у свом раду приказују теоријске и емпиријске односе између коефицијента звучне апсорпције и уздужне специфичне отпорности струјању ваздуха и дебљине слоја порозног материјала. Коефицијент звучне апсорпције порозног материјала је израчунат у складу са процедуром коју препоручује стандард EN 12354-6:2003. Израчунат на овакав начин, коефицијент звучне апсорпције може се упоредити са резултатима мерења апсорпције у импедансној цеви и реверберационој комори. Развијени номограми омогућавају да се одреди коефицијент апсорпције звука за изабрану фреквенцију на основу знања специфичне подужне отпорности струјању и дебљине

порозног материјала. „Они такође омогућавају одређивање оптималне вредности подужне отпорности струјању ваздуха, након чега коефицијент звучне апсорпције не расте“ [76].

2.6.2 Модели за одређивање акустичких особина порозних материјала

Теоријски модели

Акустичке особине порозних материјала се могу проучавати коришћењем теоријских и емпиријских модела. Теоријски или такозвани феноменолошки приступ састоји се у замени флуидом засићене порозне чврсте структуре са еквивалентним дисипативним флуидом. Овакав приступ је усвојен између осталих од Morse & Ingard-a [77]. Hamet [78] је предложио проширени феноменолошки модел, узимајући у обзир вискозно и топлотно расипање. Основни напредак у развоју ове теорије је дао Biot [79]. Он је развио општу теорију простирања таласа у флуидом засићеној порозној структури са еластичним оквиром. Lambert [80] је користећи резултате Biotа развио аналитички модел за високопорозне полиуретанске пене и то је проверио са мерењем неких структурних параметара. Уобичајена слабост ових феноменолошких модела је да неки параметри, на пример фактор структуре материјала, не може се израчунати унутар модела, већ треба да се одреди мерењем неких акустичких карактеристика.

Приступ више фундаменталне природе, назван и микроструктурни приступ састоји се у извођењу простирања таласа унутар појединих пора, а затим се резултати генерализују на макроскопској скали. Zwikker & Kosten [81] применили су ову процедуру на неповезане кружне цеви. Attenborough [82,83] је извео модел узимајући претпоставку да се ради о крутом оквиру структуре са сложенијим порама микроструктуре и показао да се могу применити како код влакнастих, тако и код зрнастих материјала. Ови модели захтевају пет независних параметара укључујући и динамички и статички фактор облика. Број параметара се може свести на 4 користећи „фактор односа облика пора“ који је фреквенцијски зависна величина. Allard и остали [84] су написали критику Biotove теорије, са фокусом на случај где је ваздух засићен флуид. Они су описали модел користећи функцију динамичке густине коју је дао Biot [82,83]. Детаљни преглед овог рада се може наћи у уџбенику [85]. Champoux & Stinson [86] су предложили још пет параметара модела, укључујући два различита фактора облика за вискозне и термичке ефекте и утврдили на моделу порозних материјала који имају исту познату геометрију. Wilson [87] је развио општи модел користећи три параметра вискозних и термичких својстава и добио задовољавајуће подударане са претходним моделима.

Генерално микроструктурни модели обезбеђују дубоки физички увид механизма дисипације звучне енергије, али су сами по себи сложенији и садрже неке параметре који се одређују из детаљног познавања микроструктуре материјала.

Емпиријски модели

У научној литератури су доступни многи радови посвећени предвиђању акустичке импедансе и константе простирања влакнастих материјала [34]. Вероватно најпознатији емпиријски модел је модел Delany-Bazley [88], који је дефинисан једноставним законитостима за одређивање акустичке импедансе и коефицијента простирања. Као улазни параметар за модел користи се подужна отпорност струјању ваздуха, која се може

релативно лако измерити. Ово су засигурно разлози који су утицали на успех овог модела. Исти аутори су представили зависност отпорности струјању ваздуха у функцији од густине материјала. Dunn & Davern [89] су задржали исти облик једначина који су развили Delany & Bazley а израчунали су нове вредности регресионих константи за полиуретанске пене. Wu [90] се надовезао на претходни рад (Dunn i Davern-а) користећи више узорака порозних пластичних пена, које покривају шири опсег вредности подужне отпорности струјању ваздуха. Voronina [91,92] употребљава упоредну анализу експерименталних резултата, пречника влакна од 1 до 10 μm за израчунавање карактеристичне импедансе и константе простирања у функцији од пречника влакна и порозности материјала. Приближни израз за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха Voronina даје у раду [91]. Gardner и остали [93] су користили неуронске мреже за одређивање емпиријског модела за полиуретанске пене, користећи један улазни параметар, подужну отпорност струјању ваздуха.

Поуздано одређена акустичка импеданса је основ за израчунавање коефицијента звучне апсорпције са високом тачношћу [34,88–90,94,95]. Oliva & Hongisto [96] су представили тачност предикције модела за одређивање звучне апсорпције порозних материјала. Радом су обухваћени углавном емпиријски модели за предикцију звучне апсорпције влакнастих порозних материјала. Аутори истичу да постојећа литература не обезбеђује одговарајућу информисаност о тачности предвиђања ових метода. Акустичка својства полиуретанских пена се могу предвидети помоћу неуронских мрежа. Алгоритам уграђен у неуронске мреже замењује емпиријски модел чији је улазни параметар подужна отпорност струјању ваздуха [93]. Микроструктурни параметри PU пена мале густине као што су средњи пречник ћелија и пречник решетке ћелијске структуре (струт тхицкнес) утичу на звучну апсорпцију [14]. Посебно је мали број радова који даје везу између микроструктуре PU пена и њихових акустичких особина. Doutres и остали [97,98] у својим радовима дају везу између геометријских параметара микроструктуре и неакустичких параметара као што су подужна отпорност струјању ваздуха и порозност, на основу којих се могу одредити површинска импеданса и коефицијент апсорпције потпуно умрежених полиуретанских пена.

Delany & Bazley [88] су представили емпиријски модел на основу истраживања акустичких особина низа влакнастих апсорпционих материјала. Вредности карактеристичне импедансе и коефицијента простирања су приказани као нормализоване вредности функције која зависи од густине, фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха. У раду је представљен и начин одређивања подужне отпорности струјању ваздуха у зависности од густине порозног материјала.

Garai & Pompoli [34] су развили нов модел за одређивање акустичких особина полиестер влакана. Мерења обављена на полиестерним материјалима различите густине, дебљине и пречника влакна у распону од 18 до 48 μm , су у доброј сагласности са предвиђањима новог модела. Закључено је да нови модел може да предвиди основне заједничке акустичне особине полиестер влакнастих материјала са било којом практичним комбинацијом дебљине и густине.

Komatsu [99] је дао побољшање Delany & Bazley и Miki модела за влакнасте звучно апсорпционе материјале. Испитивани су узорци од стаклене вуне и камене вуне. Овај модел је ефикаснији од конвенционалних модела, посебно за велике и мале густине влакнастих

материјала. Коматсу је закључио да коефицијенти и степени у претходним моделима нису константе, већ променљиве које зависе од специфичне подужне отпорности струјању ваздуха.

Fernandez и остали [100] су дали упоредни приказ различитих емпиријских модела и грешака које настају за исту вредност улазног параметра. Аутори предлажу прилагођавање коефицијената емпиријских модела само за домен нормализоване фреквенције где модел важи, како би се остварила лакша упоредивост са другим моделима.

Емпиријски модели за утврђивање акустичких својстава порозних материјала се одликују својом једноставношћу, јер имају један улазни параметар, подужну отпорност струјању ваздуха, која се може лако измерити. Емпиријски модели Dunn & Davern [89] и Wu Qunli [90] су доживели широку примену у научним круговима за израчунавање акустичке импедансе полиуретанских пена. Полазећи од модела Delany & Bazley [88] Dunn & Davern [89] су задржали исти облик једначина и израчунали нове регресионе константе за полиуретанске пене користећи узорке који имају ниске вредности отпорности струјању ваздуха. Kino & Ueno [69] су представили идеју о “еквивалентном пречнику” меламинаске пене. На основу овога, може се претпоставити да се поједини емпиријски модели за влакнасте материјале [34,69,88,94,95,99], могу користити за предвиђање акустичких својстава пена, уколико су задовољени одређени услови. Garai & Pompoli [34] су у свом раду представили модел за одређивање акустичке импедансе полиестер влакана користећи методу најмањих квадрата. У раду Jones-a [53] приказан је поступак формирања прилагођених модела за одређивање акустичке импедансе и коефицијента простирања на основу Delany-Bazley модела, за две врсте пене. За пројектовање система заштите од буке потребно је познавати акустичке особине материјала који се примењују за узраду различитих врста апсорбера. Неколико аутора су приметили да предвиђања акустичких својстава одређених порозних материјала применом модела Delany-Bazley, не дају добре резултате [89,90,94]. Ове разлике подржавају претходне налазе да предвиђања помоћу оригиналних Delany-Bazley коефицијената нису тачна, посебно када се примењују на порозне еластичне материјале и када су коефицијенти јединствени за сваку врсту порозног материјала [82]. Jones & Kessissoglu [101] су представили могућност поједностављења приступа Delany & Bazley за моделирање акустичких својстава еластичних порозних пена. У раду је приказан прилагођен Delany-Bazley модел који олакшава акустичку карактеризацију без потребе познавања подужне отпорности струјању ваздуха.

Предвиђање акустичких особина материјала од рециклиране гуме и полиуретанске смоле је извршено помоћу модела Alard-Champroux-a. Примена овог модела захтева детаљно познавање геометрије пора што генерално није доступано. Овај модел, представљају добро средство у циљу креирања новог порозног апсорбера. Нови иновативни звучни апсорбери имају изгледну будућност јер су јефтинији и еколошки бољи у поређењу са другим доступним материјалима [102]. У раду Радичевић, Ристановић, Коларевић [103] је приказано експериментално истраживање акустичких и неакустичких својстава материјала од рециклиране гуме, на основу којих је формиран емпиријски модел за предвиђање акустичких особина ових материјала. Грануле рециклиране гуме повезане полиуретанским смолама чине једну зрнасту структуру чија су акустичка својства истраживана. Предвиђања новог модела се у доброј мери уклапају са експерименталним резултатима коефицијента апсорпције измереног у импедансној цеви. Просечна апсолутна грешка новог модела је око 10% у односу на измерене вредности коефицијента звучне

апсорпције. На основу тога, нов модел се може сматрати као задовољавајући за процену акустичких особина смеша рециклиране гуме и полиуретанских смола у процентима који су наведени у овом раду. Модел је формиран на бази испитивања малог броја узорака, а циљ је био да се прикаже методологија формирања модела. Претпоставља се да се повећањем броја испитиваних узорака и корекцијом коефицијената модела може повећати тачност одређивања коефицијента апсорпције материјала од рециклиране гуме.

Први модели који су се користили за предвиђање акустичких особина порозних материјала били су модели засновани на емпиријским законима које су развили Delany i Bazley 1970. године, истражујући површинску импедансу камене вуне, узимајући у обзир претпоставку да се ради о чврстом скелету материјала.

Постоје и други модели који преузимају хипотезу чврстог скелета, јер он поседује велику крутост у односу на флуид који струји кроз порозни материјал. Ови модели су познати као модели еквивалентног флуида.

Детаљнији теоријски модели који узимају у обзир кретање обе фазе, коришћењем бројних параметара који су карактеристика скелета и флуида, могу се наћи у радовима Biot [79,104]. Општа теорија коју је развио Biot је комплексна а прорачунски нумерички модели су често неопходни.

Сврха ових модела је да акустички окарактерише влакнасте апсорпционе материјале преко коефицијента простирања таласа, Γ_c и карактеристичне импедансе Z_c .

$$\Gamma_c = jk_c \quad (2.31)$$

Где је: k_c - карактеристични таласни број за одређени материјал

Утврђивање Γ_c и Z_c за порозне материјале омогућава потпуно дефинисање њиховог акустичког понашања и описивање звучних таласа у њиховој унутрашњости.

$$Z_c = Z'_c + jZ''_c \quad (2.32)$$

$$\Gamma_c = \Gamma'_c + j\Gamma''_c \quad (2.33)$$

Где су: Γ'_c - коефицијент слабљења, Γ''_c - фазни експонент, Z'_c - акустички отпор и Z''_c - акустичка реактанса.

Коефицијент слабљења, Γ'_c , је параметар који се може мерити помоћу мерног микрофона. Мери се смањење звучног притиска равног звучног таласа у некој дебљини слоја материјала. Фазни експонент, Γ''_c , одерђује се променом фазе са растојањем. Комплексна карактеристична импеданса, Z_c , мери се у импедансној цеви.

Уопштени начин посматрања ове две импедансне променљиве је преко функције модула стишљивости, густине и угаоне фреквенције, исказане преко израза (2.34 и 2.35):

$$Z_c = \sqrt{K(\omega)\rho(\omega)} \quad (2.34)$$

$$k_c = \omega \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)}} \quad (2.35)$$

Помоћу различитих модела се покушава да се утврди модул стишљивости и еквивалентна густина за различите врсте порозних материјала.

Емпиријски модели процењују импедансу и комплексну константу простирања у материјалу путем познавања секундарних својстава материјала. Емпиријски модел који су дефинисали Delaney-Bazley [88] приказује вредности карактеристичне импедансе и коефицијента простирања у функцији од подужне отпорности струјању ваздуха. Модели Mechel-Vér [95] и Allard-Champroux [105] су надоградња модела Delany-Bazley [88], проширујући његову тачност у граничним случајевима.

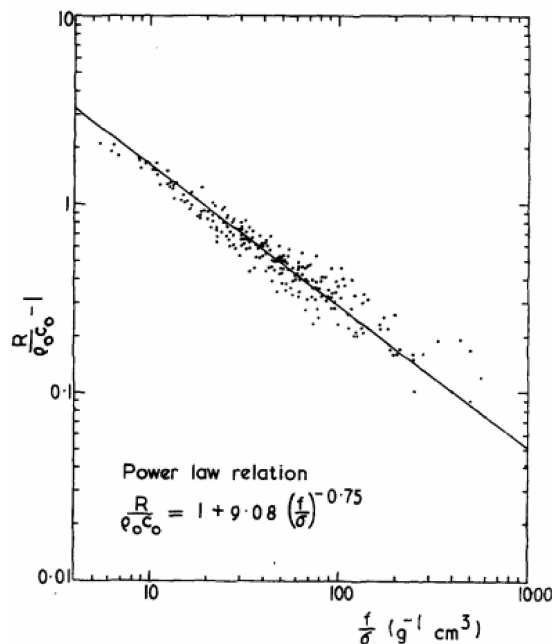
Модел Delany-Bazley

Delany & Bazley [88] су 1970. године представили модел за одређивање карактеристичне импедансе, Z_0 , и коефицијента простирања γ , у зависности од подужне отпорности струјању ваздуха порозног материјала.

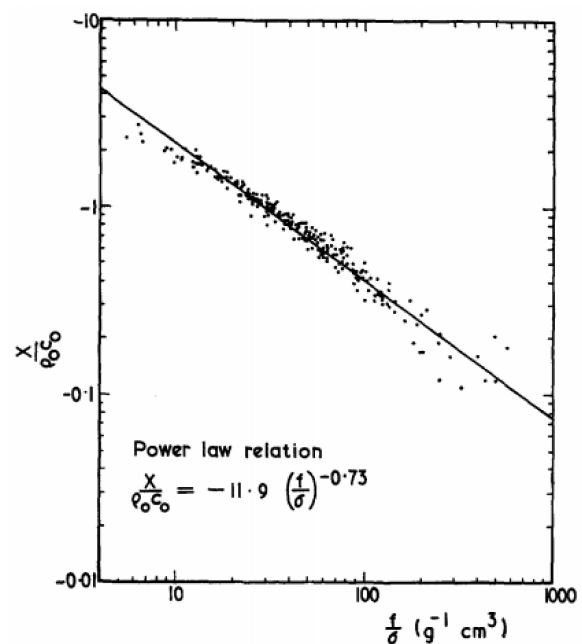
$$Z_0 = R + jX \quad (2.36)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.37)$$

Након великог броја мерења у Кунтовој цеви за материјале различите отпорности струјању ваздуха и специфичном фреквенцијском опсегу, Delany & Bazley [88] су поставили законитости промене импедансе и коефицијента простирања као комплексне величине у функцији односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха.



Слика 2.14. Нормализована реална компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [88]



Слика 2.15. Нормализована имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [88]

Ове законитости Delany & Bazley су описали у свом раду [88], дајући следећи графички приказ експерименталних тачака и апроксимативне праве линеарне регресије, као што је приказано на сликама 2.14.-2.17. На сликама (2.14. и 2.15.) са R и X су означени реални и имагинарни део карактеристичне импедансе Z_0 респективно. На сликама (2.16. и 2.17.) са α и β су означени реални и имагинарни део коефицијента простирања.

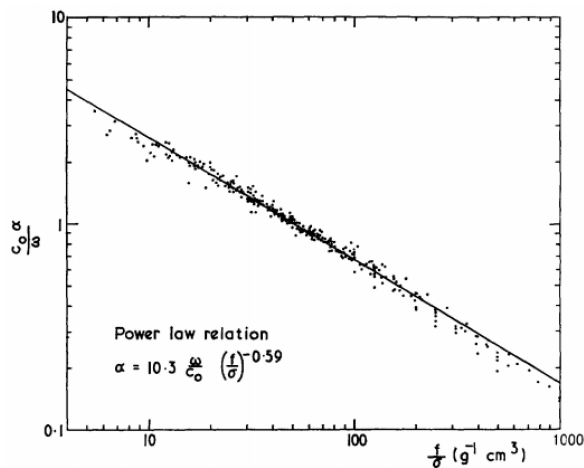
$$Z_0 = R + jX \quad (2.38)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.39)$$

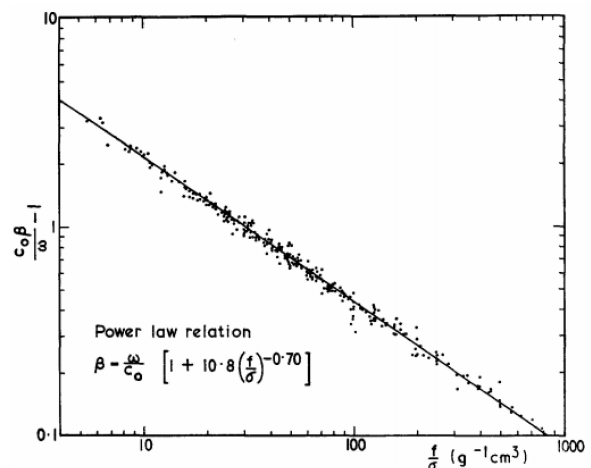
Ове законитости се могу написати као функција бездимензионог члана, који се добија када се однос фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха помножи са густином флуида, $\rho_0 f / \sigma$, који Delany & Bazley [88] називају нормализовани бездимензиони параметар. Законитости које су утврдили Delany & Bazley [88], узимајући у обзир међународни систем јединица могу се исказати у облику:

$$Z_c = \rho_0 c \left[1 + 0.0571 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.574} - j0.087 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.732} \right] \quad (2.40)$$

$$k_c = \frac{\omega}{c} \left[1 + 0.0978 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.7} - j0.189 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-0.595} \right] \quad (2.41)$$



Слика 2.16. Нормализована реална компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [88]



Слика 2.17. Нормализована комплексна компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [88]

Модел претпоставља да је апсорпциони материјал влакнаст и да су влакна равномерно распоређена. Delany & Bazley [88] су дефинисали домен функција у свом емпиријском моделу:

$$10 \leq f/\sigma \leq 1000,$$

где је фреквенција f изражена у Hz а подужна отпорност струјању ваздуха, σ , у gr/cm^3s .

Опсег важења модела се може изразити преко бездимензионог параметра у облику: $0,01 \leq \rho_0 f / \sigma \leq 1$.

Треба имати на уму, да сви влакнасти материјали разматрани у овом моделу имају порозност близу јединице. У моделу Delany-Bazley [88] је објашњено да треба да се врши још један поступак нормализације за материјале са нижом порозношћу.

Модел Mechel-Vér

Модел Mechel-Vér [95] описује акустичко понашање камене вуне и стаклених влакана. Акустичке особине ове две фамилије порозних влакнастих материјала се на тачнији начин предвиђају помоћу модела Mechel-а [95] у односу на модел Delany-Bazley [88]. Нормализован бездимензиони параметар E , аутори називају нормализовани параметар фреквенција.

$$E = \rho_0 f / \sigma \quad (2.42)$$

$$Z_c = \rho_0 c \left[1 + b' E^{-\beta'} - j b'' E^{-\beta''} \right] \quad (2.43)$$

$$\Gamma_c = \frac{\omega}{c} \left[a' E^{-\alpha'} + j (1 + a'' E^{-\alpha''}) \right] \quad (2.44)$$

$$k_c = -j \frac{\omega}{c} \left[a' E^{-\alpha'} + j (1 + a'' E^{-\alpha''}) \right] \quad (2.45)$$

Вредности коефицијената који су одређени експериментално приказани су у табели 2.2. Основна предност модела Mechel-Vér [95] у односу на модел Delany-Bazley [88] је у томе што даје прецизнија предвиђања вредности акустичких параметара, посебно на ниским фреквенцијама.

Табела 2.2. Вредности коефицијената у моделу Mechel-Vér за две врсте материјала

Материјал	Област	a'	α'	a''	α''	b'	β'	b''	β''
Камена вуна	$E \leq 0.025$	0.322	0.502	0.136	0.641	0.081	0.699	0.191	0.556
	$E > 0.025$	0.179	0.663	0.103	0.716	0.0563	0.725	0.127	0.655
Стаклена влакна	$E \leq 0.025$	0.396	0.458	0.135	0.646	0.0668	0.707	0.196	0.549
	$E > 0.025$	0.179	0.674	0.102	0.705	0.0235	0.887	0.0875	0.77

Модел Allard-Champoux

У овом моделу се претпоставља да термални ефекти зависе од фреквенције. Једначине модела Allard-Champoux [105] имају боље резултате на ниским фреквенцијама у односу на претходне моделе.

Allard-Champoux [105] модел дефинише динамичку густину и модул стишљивости према изразима:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - j \left(\frac{\sigma}{\rho_0 \omega} \right) G_1 \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right) \right] \quad (2.46)$$

$$K(\omega) = \gamma P_0 \left[\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 - \left(\frac{j}{4P_r} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_0 \omega} \right) G_2 \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right)} \right]^{-1} \quad (2.47)$$

Функције $G_1(\rho_0 \omega / \sigma)$ и $G_2(\rho_0 \omega / \sigma)$ су дефинисане изразима:

$$G_1 \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right) = \sqrt{1 + \frac{j}{2} \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right)} \quad (2.48)$$

$$G_2 \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right) = G_1 \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right) \left(4P_r \left(\frac{\rho_0 \omega}{\sigma} \right) \right) \quad (2.49)$$

Где су: ρ_0 – густина ваздуха, γ – однос специфичних топлота флуида при константном притиску и константној запремини, ω – кружна учестаност, σ – подужна отпорност струјању ваздуха, P_0 – ваздушни притисак, P_r – Прантлов број.

Ови емпиријски модели се користе за процену карактеристичне импедансе и коефицијента простирања са веома добром прецизношћу. Провера тачности оваквих модела се најчешће врши помоћу импедансне цеви.

Емпиријски модели процењују акустичку импедансу и коефицијент простирања који су карактеристика материјала. Мерењем у импедансној цеви, материјал се обично ставља према крутом зиду или са слојем ваздуха између материјала и зида. Дебљина узорка је углавном мала.

Да би се одредила импеданса коначне дебљине материјала Z_l , испред крутог зида, знајући вредности процењене површинске импедансе помоћу различитих модела користи се следећи израз:

$$Z_l = Z_c \coth(jk_c d) \quad (2.50)$$

Где је: d – дебљина узорка.

Процене импедансе и коефицијента апсорпције израчунате према различитим емпиријским моделима упоређују се са вредностима ових величина измерених у импедансној цеви.

Модел Garai-Pompoli

Овај емпиријски модел даје могућност предвиђања акустичке импедансе и звучне апсорпције полиестер материјала. Нов модел је развијен за полиестер влакна пречника 18 до 48 μm , полазећи од добро познатих законитости које су развијене у моделу Delany & Bazley [88]:

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_2} \right] \quad (2.51)$$

$$Z_l = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_4} \right] \quad (2.52)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_6} \right] \quad (2.53)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-C_8} \right] \quad (2.54)$$

Где су: Z_R и Z_I реални и имагинарни делови карактеристичне акустичке импедансе Z_c , а α и β су реални и имагинарни делови коефицијента простирања, ρ_0 - густина ваздуха, c_0 - брзина звука у ваздуху и f је фреквенција.

$$Z_l = (Z_R + iZ_I) \rho_0 c \left[\coth(\alpha + i\beta) l \right] = Z_{lR} + iZ_{lI} \quad (2.55)$$

$$\alpha_n = \frac{4Z_{lR}\rho_0 c_0}{|Z_{lI}|^2 + 2\rho_0 c_0 Z_{lR} + (\rho_0 c_0)^2} \quad (2.56)$$

Коефицијенти C_1, \dots, C_8 у једначинама (2.51)-(2.54) су варирани а њихове оптималне вредности су одређене методом најмањих квадрата, тако да одступања коефицијента апсорпције израчунати помоћу израза (2.55) и (2.56) имају минималне вредности у односу на вредности измерене у импедансној цеви.

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.078 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.623} \right] \quad (2.57)$$

$$Z_I = -\rho_0 c_0 \left[0.074 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.660} \right] \quad (2.58)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[0.159 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.571} \right] \quad (2.59)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + 0.121 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.530} \right] \quad (2.60)$$

Ово је другачији приступ у одређивању акустичке импедансе и коефицијента простирања у коначној дебљини порозног материјала, у односу на оно што се може наћи у већини дотадашње литературе. Обично се најбоље уклапање коефицијената C_1, \dots, C_8 одређивало из једначина линеарне регресије за реални и имагинарни део акустичке импедансе и реални и имагинарни део таласног броја, онако како су то у свом раду представили Delany & Bazley [88].

Модел Dunn-Davern

Модел Dunn-Davern [88] дефинише методу за израчунавање укупне акустичке импедансе вишеслојних апсорбера. Добијена је добра сагласност између вредности измерених у импедансној цеви и израчунатих вредности. Програми за израчунавање акустичке импедансе се користе да би се размотрили аспекти пројектовања равних зидова композитних облога.

Укупна импеданса вишеслојног система може се израчунати поновљеном применом импедансне једначине за један слој. Zwicker & Kosten су 1949. године закључили „Могуће... у принципу... рачуница је компликована и заморна“ [81].

Применом рачунара може се постићи добро поклапање са вредностима измереним у импедансној цеви. Предуслов за то је постојање базе података о акустичкој импеданси и коефицијенту простирања за сваки материјал. Предност таквог поступка је што се на веома брз начин може доћи до акустичких особина, за разлику од дуготрајног процеса мерења појединих комбинација материјала. Акустичне особине вишеслојних апсорбера који представљају коначно решење за акустички дизајн могу се проверити у импедансној цеви.

Импеданса једног хомогеног слоја

Zwicker & Kosten [81] су показали да се при нормалној инциденцији акустичка импеданса Z_i на предњој страни слоја хомогеног материјала дебљине L , може одредити према изразу:

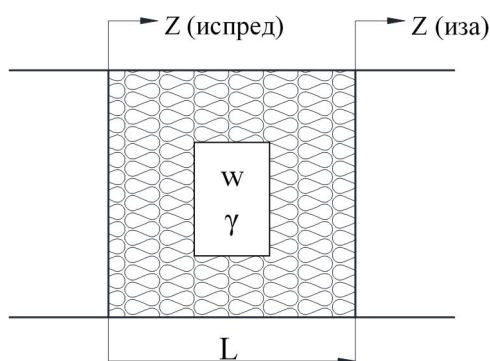
$$Z_i = W \frac{Z_0 \cosh \gamma L + W \sinh \gamma L}{Z_0 \sinh \gamma L + W \cosh \gamma L} \quad (2.61)$$

Где је Z_0 - импеданса ослонца слоја материјала, W - таласна импеданса (карактеристична импеданса) слоја и γ - коефицијент простирања материјала. Карактеристична импеданса и коефицијент простирања су комплексне и фреквенцијски зависне величине, а Dunn & Davern [89] су изразили као:

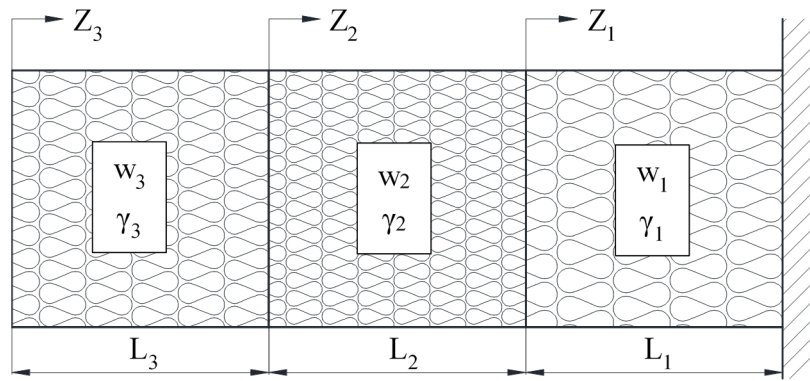
$$W = A + jB \quad (2.62)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.63)$$

У изразима (2.62) и (2.63), A , B , α и β су реалне функције које зависе од фреквенције.



Слика 2.18. Ознаке коришћене за израчунавање импедансе једнослојног материјала; адаптирано према [89]



Слика 2.19. Означавање у вишеслојном систему; адаптирано према [89]

Функције A и B немају јединствен физички значај али апсолутна вредност функције коју оне чине може се изразити као:

$$|W| = \frac{1+R}{1-R} \quad (2.64)$$

Где је R коефицијент рефлексије за нормалну инциденцију. Функција α је коефицијент слабљења амплитуде притиска. Функција β представља однос угаоне брзине и акустичке брзине таласа при фреквенцији f .

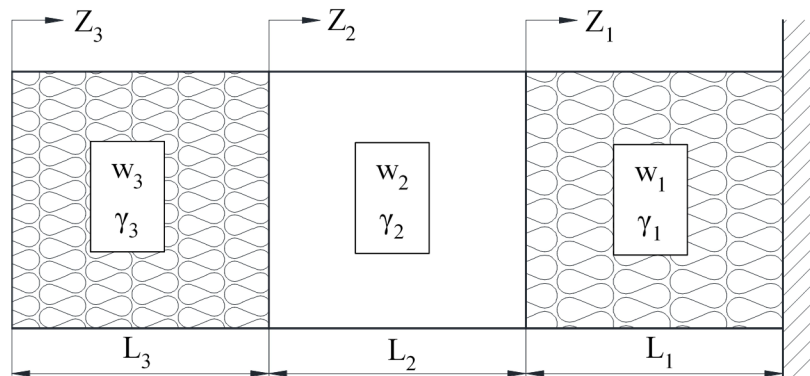
$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (2.65)$$

Импеданса вишеструког слоја

Импеданса на предњем делу композитног слојевитог материјала, у принципу се израчунава исто као и за једнослојни материјал, само се sukcesивно прорачунава слој по слој. Према моделу Dunn & Davern [89] импеданса слоја вишеслојног композитног материјала се одређује на следећи начин:

$$Z_i = W_i \frac{Z_{i-1} \cosh \gamma_i L_i + W_i \sinh \gamma_i L_i}{Z_{i-1} \sinh \gamma_i L_i + W_i \cosh \gamma_i L_i} \quad (2.66)$$

Ознака i се односи на i -ти слој, започињући од слоја најближег чврстој подлози. Овакав начин израчунавања импедансе посебно је поједностављен у случају да неки од слојева представља ваздушни међупростор, као што је приказано на слици 2.20.



Слика 2.20. Вишеслојни систем са ваздушним међупростором

Одређивање таласне импедансе и константе простирања

Како би се одредила акустичка импеданса (W) и коефицијент простирања (γ), за сваку фреквенцију, потребно је извршити по два независна мерења. Комплексне једначине (2.62) и (2.63) морају бити решене да се добије вредност реалних параметара A , B , α и β . Овај поступак мора бити поновљен за сваки узорак на много различитих фреквенција, како би биле утврђене промене параметара у зависности од фреквенције.

Dunn & Davern [89] су за анализу одабрали узорке дужине L и $2L$, да би се смањило број мерења на различитим фреквенцијама. Једначине (2.67) и (2.68) треба решити по W и γ заменом у једначине за импедансу једнослојног материјала и узимајући да је $Z_0 = \infty$ за чврсту подлогу.

$$Z_L = W \coth \gamma L \quad (2.67)$$

$$Z_{2L} = W \coth 2\gamma L \quad (2.68)$$

Експлицитно решење једначина (2.67) и (2.68) даје:

$$W = \sqrt{(Z_L(2Z_{2L} - Z_L))} \quad (2.69)$$

$$\gamma = (1/2L) \ln[(Z_L - W)/(Z_L + W)] \quad (2.70)$$

Када се на претходне једначине примене стварне вредности података, налази се експлицитно решење за акустичку импедансу W . Решење за коефицијент простирања γ има бесконачан скуп вредности. Вредности фазне константе β се разликују за корак $\pi/2L$ радијана. Да би се изабрало одговарајуће физичко решење морају се увести додатни услови. Ово се може постићи уз претпоставке да је фазна константа β пропорционална брзини таласа и да су узорци пене само благо дисперзивни, тј. брзина таласа наспрам фреквенције је глатка функција [89].

Емпиријски модел за пене

Dunn & Davern [89] су проучавали 4 врсте пена, са различитим бројем хелија на дужини од једног инча. Густина испитиваних пена је била 32 до 38 kg/m³. Усвајајући исту методологију и облик једначина које су у свом моделу дефинисали Delaney & Bazley [88], Dunn & Davern [89] су одредили вредност непознатих коефицијената. Код модела Dunn & Davern [89] коришћене су пене са вредностима подужне отпорности струјању ваздуха од 380 до 3200 Pas/m².

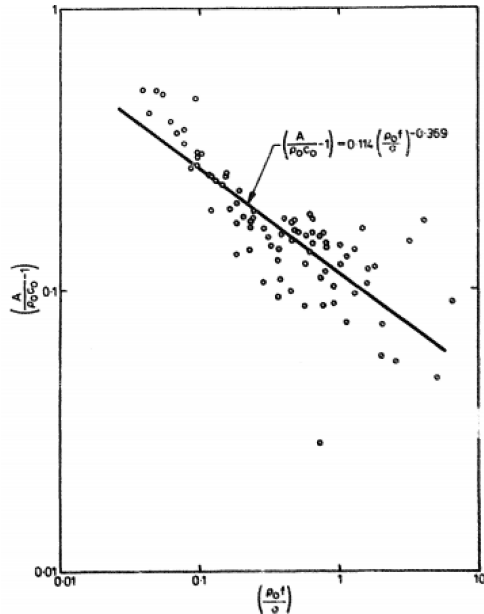
$$A = \rho c \left[1 + 0.114 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.369} \right] \quad (2.71)$$

$$B = \rho c \left[(-0.0985) \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.758} \right] \quad (2.72)$$

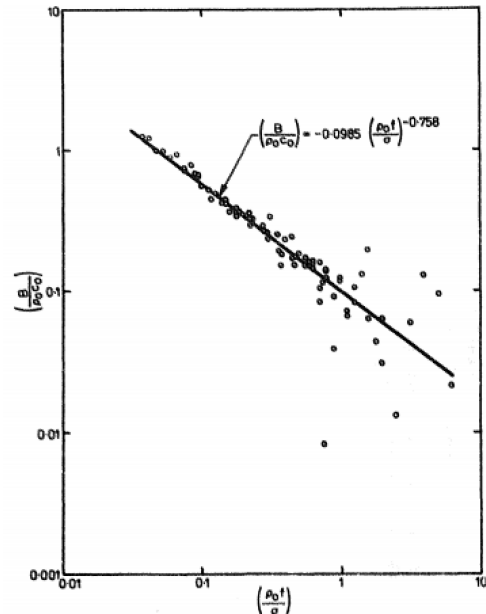
$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \left[0.168 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.715} \right] \quad (2.73)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \left[1 + 0.136 \left(\frac{\rho f}{\sigma} \right)^{-0.491} \right] \quad (2.74)$$

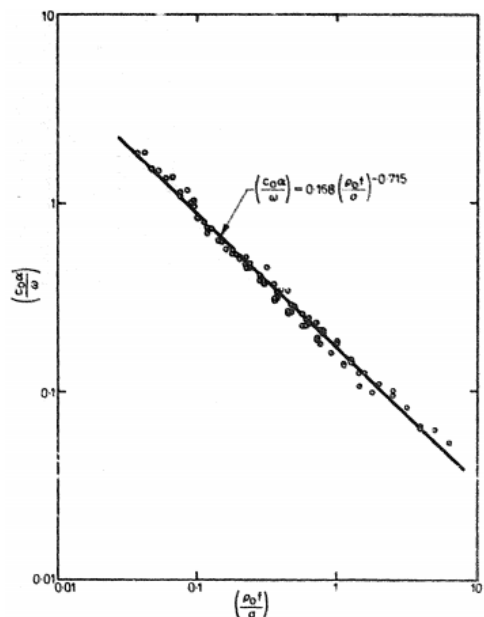
У једначинама (2.71)-(2.74) значење ознака је следеће: ρ - густина ваздуха, c - брзина звука у ваздуху, σ - подужна отпорност струјању ваздуха, $2\pi f$ - угаона брзина. У циљу нормализације података коришћене су вредности густине од 20 kg/m^3 и брзина звука у ваздуху од 340 m/s .



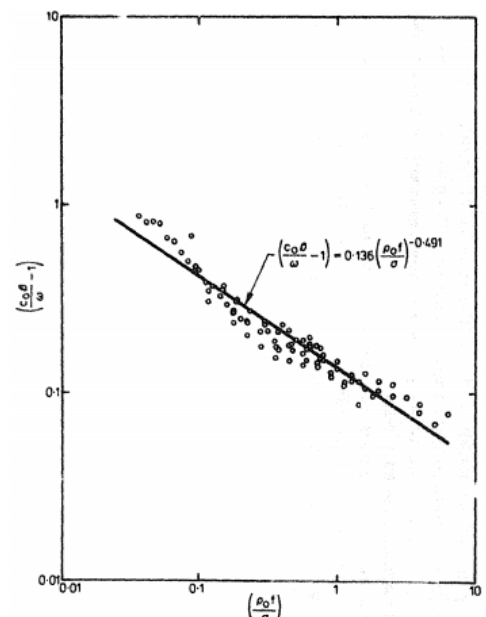
Слика 2.21. Нормализована реална компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [89]



Слика 2.22. Нормализована имагинарна компонента карактеристичне импедансе у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [89]



Слика 2.23. Нормализована реална компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [89]



Слика 2.24. Нормализована имагинарна компонента коефицијента простирања у функцији од односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха [89]

Dunn & Davern [89] су претпоставили да се специфична подужна отпорност струјању ваздуха може предвидети помоћу параметара структуре материјала, као што је већ урађено код влакнастих материјала.

Модел Wu Qunli

Истраживања која су довела до стварања овог модела су спроведена на 15 врста пластичних пена са отвореним ћелијама које покривају широк распон подужне отпорности струјању ваздуха. Дебљина узорка за испитивање је била од 13 до 51 mm. Импеданса је мерена у импедансној цеви за две варијанте постављања узорка. У првој варијанти узорци су постављани на круту подлогу а у другој варијанти иза узорка и круте подлоге направљен је ваздушни простор чија дебљина одговара једној четвртини таласне дужине.

Вредности карактеристичне импедансе Z_0 и коефицијента простирања Γ , могу се израчунати према изразима:

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (2.75)$$

$$\Gamma = (1/l) \tanh^{-1}(\sqrt{Z_2 / Z_1}) \quad (2.76)$$

Где су: Z_1 и Z_2 импедансе за случај када је узорак постављен на чврст ослонац и једну четвртину таласне дужине у односу на чврст ослонац, респективно. Дебљина узорка у изразу (2.76) је означена са l .

За око 90 узорка у фреквенцијском опсегу од 200-2000 Hz измерене су вредности подужне отпорности струјању ваздуха у дијапазону од 2900 до 24300 Pas/m².

Нормализоване вредности реалног и имагинарног дела импедансе, коефицијента слабљења и фазног коефицијента, приказани су у зависности од бездимензионог члана, $f\rho_0/r$, где је f - фреквенција, ρ_0 - густина ваздуха, r - подужна отпорност струјању ваздуха.

$$\frac{R}{\rho_0 c_0} = 1 + 0.212 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.455} \quad (2.77)$$

$$\frac{X}{\rho_0 c_0} = -0.105 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.607} \quad (2.78)$$

$$\frac{\alpha}{k} = 0.163 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.592} \quad (2.79)$$

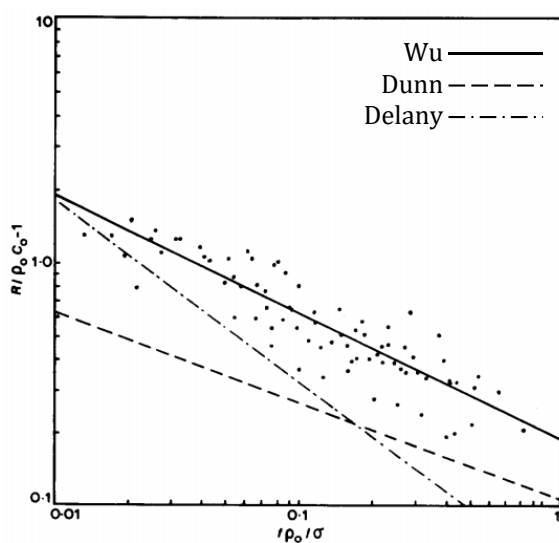
$$\frac{\beta}{k} = 1 + 0.188 \left(\frac{\rho_0 f}{r} \right)^{-0.544} \quad (2.80)$$

Карактеристична импеданса је изражена као $Z_0 = R + jX$, где су R и X њени реални и имагинарни делови. Коефицијент простирања је одређен изразом: $\Gamma = \alpha + j\beta$, где су α и β коефицијент слабљења и фазни коефицијент респективно.

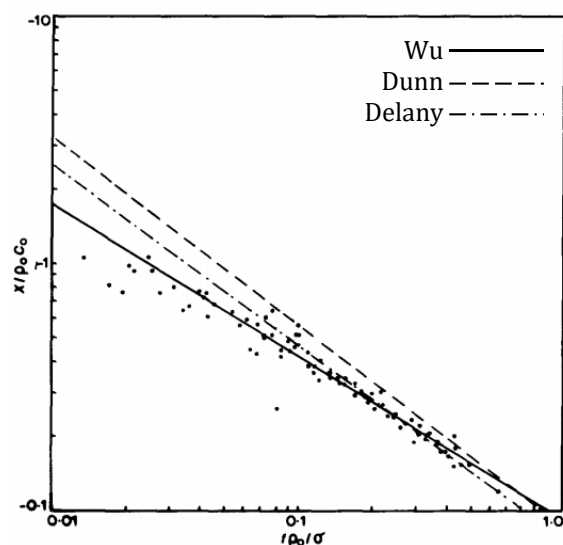
Према једначинама (2.77)-(2.80) могу се израчунати акустичка својства пластичне пене, познавањем само једног улазног параметра, подужне отпорности струјању ваздуха.

Експериментални резултати показују да се једначине регресионих правах код реалног и имагинарног дела акустичке импедансе, константе слабљења и фазне константе, одређених помоћу модела Dunn-Davern [89] и модела Wu Qunli [90], разликују. Помоћу ова два модела су анализирани пластичне пене са отвореним ћелијама а разлика се јавља, пре свега у подручју са ниским вредностима само у вредности специфичне подужне отпорности струјању ваздуха. Код модела Dunn-Davern [89] коришћене су само 4 врсте пене са вредностима подужне отпорности струјању ваздуха од 380 до 3200 Pas/m².

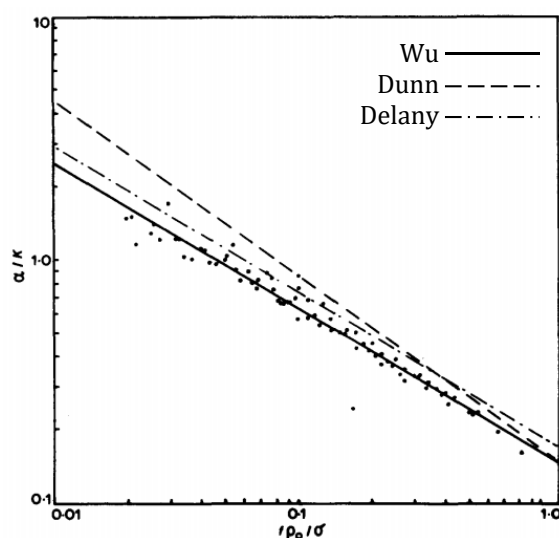
Модел Wu Qunli [90] је погодан за одређивање акустичких карактеристика пена са средњом вредношћу специфичне подужне отпорности струјању ваздуха. Модел Dunn-Davern [89] је погодан за одређивање акустичких својстава пластичних пена са ниским вредностима специфичне подужне отпорности струјању ваздуха.



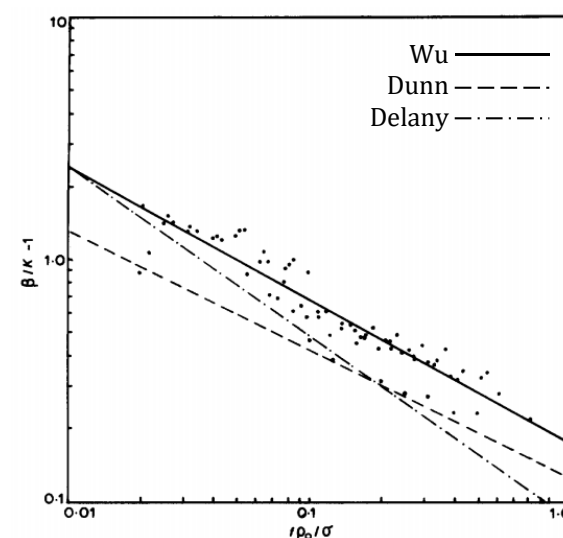
Слика 2.25. Нормализована реална компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=f\rho_0/\sigma$ [90];



Слика 2.26. Нормализована имагинарна компонента импедансе у функцији од бездимензионе променљиве $E=f\rho_0/\sigma$ [90];



Слика 2.27. Нормализована константа слабљења у функцији од бездимензионе променљиве $E=f\rho_0/\sigma$ [90];



Слика 2.28. Нормализована фазна константа у функцији од бездимензионе променљиве $E=f\rho_0/\sigma$ [90];

2.7. Вишекритеријумска оптимизација и друге методе у поступку избора апсорпционих материјала

Вишекритеријумска оптимизација за избор апсорпционих материјала је веома ретко заступљена у научној литератури. Основни проблем се састоји у немогућности поузданог генерисања великог броја алтернатива које задовољавају одређене акустичке захтеве за конкретне случајеве заштите од буке.

У раду [106] је приказана примена Taguchi методе у оптимизацији губитака преноса звука кроз сендвич гипсане конструкције и оне које се састоје од бетонских блокова за зидање и гипсаних плоча. Применом Taguchi методе испитиван је релативни утицај различитих параметара који утичу на губитке звучне трансмисије. У раду су коришћена аналитичка предвиђања софтвера „Инсул“ за различите сендвич материјале. Аутори истичу да је примена Taguchi методе за оптимизацију губитака звучне трансмисије ретко објављивана у научним радовима. Статистичка анализа варијансе (ANOVA) је спроведена да би се утврдили сигнификантни параметри. У раду су представљене две студије случаја које се односе на оптимизацију звучне изолације применом Тагучијеве методе за вишеслојне грађевинске елементе, користећи аналитичке резултате софтвера „Insul“.

Применом неуронских мрежа предложен је уопштени поступак за предвиђање коефицијента звучне апсорпције. Liu и његови сарадници [107] су предложили генерални поступак предвиђања коефицијента звучне апсорпције сендвич структура. Циљ је био да се утврде својства звучне апсорпције за сендвич структуре које би биле у стању да заштите од широкофреквенцијске буке. Појединачни апсорпциони материјали обично штите на средњим и високим фреквенцијама а не решавају проблем на ниским фреквенцијама. Предвиђање коефицијента апсорпције сендвич структура се врши помоћу неуронских мрежа. Gardner и остали [93] су представили студију о неуронским мрежама за предвиђање акустичких својстава полиуретанских пена. Модел неуронских мрежа као улазне податке користи подужну отпорност струјању ваздуха, фреквенцију и густину пене. Модел предвиђа вишеструка акустичка својства укључујући коефицијент звучне апсорпције и површинску импедансу. Модел је флексибилан и може се користити за различите врсте порозних материјала, са различитим улазним параметрима. Модел пружа корисну допуну постојећих аналитичких и нумеричких приступа. Guan и остали [108] су приказали процену ефеката структурних параметара на звучну апсорпцију алуминијумских пена са полуотвореним ћелијама на бази опште регресионе неуронске мреже (GRNN модел). Резултати показују да је утицај густине на апсорпцију алуминијумске пене ограничен. Анализа је показала да је GRNN модел моћан метод за предвиђање својстава звучне апсорпције. У раду Wang-а и осталих [109] коефицијент апсорпције PU пена је одређен применом вишеструке регресије.

ПОГЛАВЉЕ

3

**ИСТРАЖИВАЊЕ АПСОРПЦИОНИХ
СВОЈСТАВА МАТЕРИЈАЛА**

3.1. Планирање истраживања

Методологија истраживања је конципирана на експерименталним мерењима коефицијента апсорпције пенастих, зрнастих и влакнастих материјала и обради података ради добијања математичких модела зависности коефицијента апсорпције од анализираних параметара који ће представљати базу знања неопходну за формирање модела одлучивања за избор апсорпционог материјала за конкретне услове заштите од буке.

План истраживања садржи следеће фазе:

- Формулисање циља истраживања
- Анализа расположиве опреме и метода мерења
- План експеримента
- Припрема узорака
- Реализација експеримента и бележење података
- Математичка обрада експерименталних података и формирање математичких модела
- Анализа и интерпретација резултата
- Формирање базе знања

Циљ истраживања је да се добије знање о зависности апсорпционих својстава испитиваног материјала од утицајних параметара. У оквиру ове фазе, за сваку врсту материјала су посебно дефинисани параметри чији се утицај на апсорпциона својства материјала жели испитати и границе у којима параметар варира.

Избор утицајних параметара зависи и од расположивих материјала, расположиве опреме, и методе мерења што се анализира у другој фази. Методологија обраде експерименталних података и поступак добијања аналитичких и стохастичких математичких модела је описан у поглављу 3.3. План експеримента, припрема узорака и добијени подаци су обрађени за сваку групу материјала посебно.

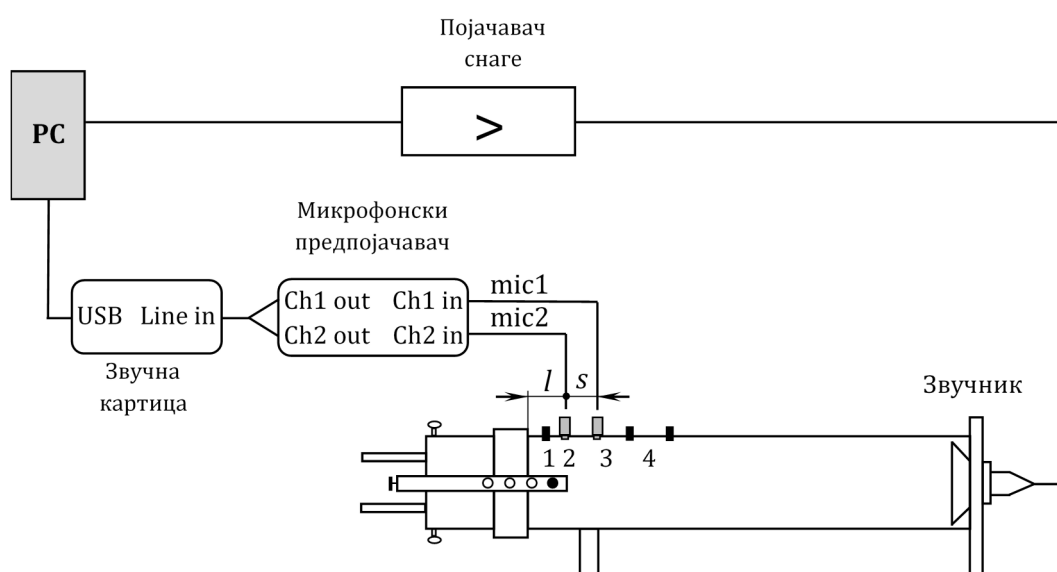
3.2. Методе и опрема

3.2.1 Одређивање коефицијента апсорпције звука и импедансе у Кунтовој цеви – Метода трансфер функције

Стандард EN ISO 10534-2:2001 описује поступак мерења апсорпције коришћењем функције преноса између микрофона. Амерички стандард ASTM E1050-12:2012 приказује овај поступак на скоро идентичан начин као и наведени ISO стандард. Широкопојасни побудни сигнал формира стојећи талас у цеви, који формирају две врсте компоненти. Прву врсту чине директни таласи који се крећу од звучника ка узорку а другу групу чине рефлектовани таласи који се крећу од површине узорка ка другом крају цеви на којој се налази звучни извор. Декомпозиција стојећег таласа се врши тако што се истовремено мери звучни притисак на две просторно раздвојене позиције на површини цеви а затим се рачуна њихова функција преноса. На основу израчунате функције преноса и конструктивних параметара цеви које су препоручене стандардом, врши се израчунавање коефицијента рефлексије. Подаци су приказани по фреквенцијама, са резолуцијом која је одређена фреквенцијом одабирања и бројем тачака у којима се рачуна спектар сигнала [33].

Радни опсег цеви зависи од пречника цеви и позиција микрофонског пара. На тај начин је дефинисан фреквенцијски опсег у коме се резултати мерења могу сматрати валидним.

На слици 3.1. приказан је блок дијаграм система за мерење звучне апсорпције на коме су извршена мерења коефицијента апсорпције ПУ пена мале густине и смеше звучноапсорпционих материјала од рециклиране гуме, рециклиране пластике и песка, где је као везивно средство коришћена полиуретанска смола. Практична реализација система за мерење коефицијента апсорпције у импедансној цеви помоћу два микрофона применом методе трансфер-функције, према стандарду EN ISO 10534-2:2001. изведена је у Лабораторији за акустику Електротехничког факултета у Београду.



Слика 3.1. Блок дијаграм система за мерење звучне апсорпције; адаптирано према [33]

Систем се састоји од рачунара где се помоћу софтверског пакета MATLAB генерише бели шум као тест сигнал који се појачава и шаље на звучник. У сваком мерењу се користе два микрофона на одабраним позицијама у зависности од тога који се фреквенцијски спектар жели покрити. Сигнали са микрофона се уводе у рачунар и софтверску апликацију где се врши њихова обрада и израчунавање коефицијента звучне апсорпције.

Мерни микрофони имају пречник $\frac{1}{4}$ " а постављају се у кућишта која на спољашњем пречнику имају нарезан навој за остваривање чврсте раздвојиве везе са зидом импедансне цеви. Микрофони се постављају тако да њихова површина буде у равни са унутрашњим зидом цеви а кућиште обезбеђује акустичку изолованост од окружења.

Доња гранична фреквенција (f_1) и горња гранична фреквенција (f_2) дефинишу радни опсег за одабрани пречник импедансне цеви. Доња гранична фреквенција је дефинисана међусобним растојањем између микрофона (s) према изразу:

$$f_1 > 0,05 \frac{c}{s} \quad (3.1)$$

Горња гранична фреквенција се бира као минимална вредност из два услова који су дефинисани изразима (3.2) и (3.3):

$$f_2 \leq 0,586 \frac{c}{d} \quad (3.2)$$

$$f_2 \leq 0,45 \frac{c}{s} \quad (3.3)$$

Из израза (3.2) и (3.3) се види да горња гранична фреквенција зависи од пречника цеви (d) и међусобног растојања између микрофона (s). Позиције микрофона се бирају према захтеву стандарда [110] о међусобном растојању микрофона дефинисане изразом (3.4) и препорукама да микрофони не буду превише близу узорка а ни превише далеко од другог краја цеви.

$$1\% \frac{c}{f_1} < s \leq 80\% \frac{c}{2f_2} \quad (3.4)$$

Растојање између микрофона дефинише ширину фреквенцијског опсега у коме импедансна цев одређеног пречника даје поуздане резултате коефицијента звучне апсорпције. Комбиновањем по две позиције мерних микрофона од 5 могућих на импедансној цеви, може се реализовати 10 различитих ширина фреквенцијских опсега, што олакшава постизање жељене вредности ширине фреквенцијског опсега.

За мерење коефицијента апсорпције у циљу израде ове дисертације на располагању је била импедансна цев пречника 100 mm. Потпуно искоришћење радног опсега цеви постигнуто је са две позиције микрофонског пара. Једна позиција је приказана на слици 3.1. (m2m3) а друга позиција која обезбеђује овај критеријум је (m2m4).

Табела 3.1. Фреквенцијски опсежи импеданских цеви пречника 100 mm и 30 mm [33]

Пречник цеви	Позиција микрофона	Међусобно растојање између микрофона, s	Доња гранична фреквенција, f_1	Горња гранична фреквенција, f_2	Укупна ширина фреквенцијског опсега
[d]	-	[mm]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
30	m2m3	24	718	6400	172÷6400
	m2m4	100	172	1552	
100	m2m3	80	216	1940	107÷1940
	m2m4	160	107	970	

За импедансну цев са два микрофона коефицијент рефлексије се рачуна према [33]:

$$R = \frac{H - e^{-jks}}{e^{jks} - H} e^{j2k(l+s)} = |R| e^{j\varphi_R} \quad (3.5)$$

Где је H коригована функција преноса, s растојање између микрофона, а l удаљеност ближег микрофона од узорка. Препорука је да та удаљеност буде бар величине пречника цеви за равне, хомогене узорке [33].

Таласни број k се одређује према изразу:

$$k = \omega / c = 2\pi f / c \quad (3.6)$$

Коефицијент апсорпције се одређује преко израчунатог коефицијента рефлексије:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.7)$$

Резултати се могу приказати по октавама или по опсезима од 1/3 октаве у фреквенцијском опсегу који се анализира.

Поступак калибрације микрофона

Пошто се за одређивање коефицијента апсорпције применом трансфер – функције истовремено користе два микрофона, потребно је пре почетка сваког мерења извршити њихову калибрацију. Поступак калибрације је дефинисан стандардом [110] а састоји се у рачунању функција преноса у стандардној и инверзној поставци микрофона. При поступку калибрације уместо узорка у цев се поставља високоапсорпциони материјал да би се спречиле јаке звучне рефлексије у цеви.

Микрофонски пар се поставља на жељену позицију на цеви а положаји микрофона чине тзв. стандардну поставку, при чему је микрофон који је ближи звучнику референтни, односно сигнал са њега представља улаз код рачунања функције преноса. Комплексна функција преноса рачуна се према изразу (3.8):

$$\bar{H}_{12} = \frac{G_{12}}{G_{11}} = |\bar{H}_{12}| e^{j\phi} = \bar{H}_r + j\bar{H}_i \quad (3.8)$$

где G_{12} и G_{11} представљају унакрсни спектар снаге и аутокорелациони (улазни) спектар снаге сигнала са микрофона, респективно.

Заменом места микрофона на истим мерним позицијама добија се тзв. инверзна поставка микрофона. За обе наведене поставке одређују се функције преноса из којих се рачуна калибрациона функција преноса.

Комплексна функција преноса се рачуна према истом изразу (3.8) а исти микрофон се задржава као референтни. За овако добијене функције преноса рачуна се корелациони фактор према изразу (3.9) [33].

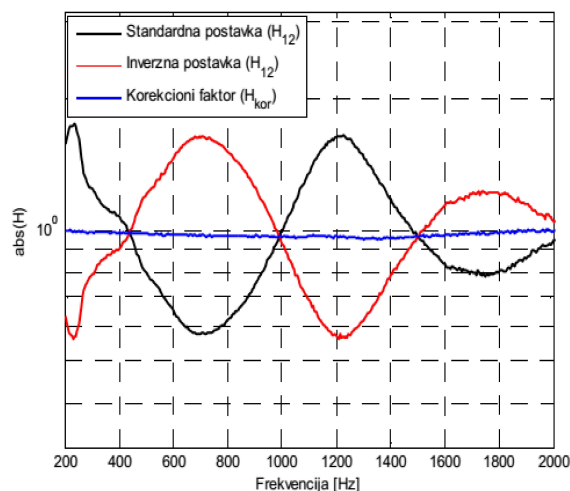
$$\bar{H}_{kor} = (\bar{H}_{12}^{st} \times \bar{H}_{12}^{inv})^{1/2} = |\bar{H}_{kor}| e^{j\phi_{kor}} \quad (3.9)$$

Где су \bar{H}_{12}^{st} и \bar{H}_{12}^{inv} функције преноса у стандардној и инверзној поставци, респективно.

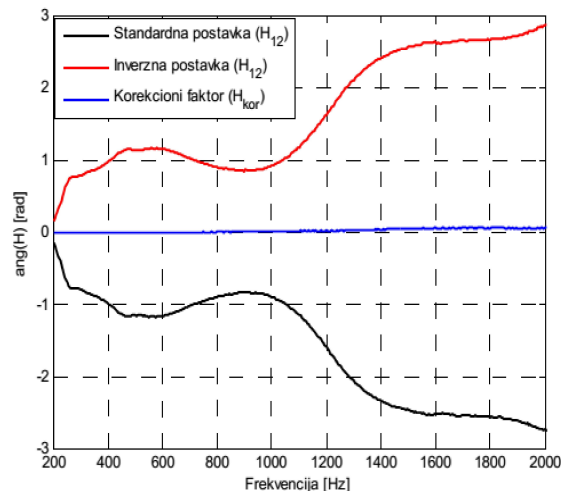
Израчунавање кориговане функције преноса се врши тако што се одређује однос функције преноса добијене у поступку мерења и корелационог фактора

$$H = \bar{H}_m / \bar{H}_{kor} \quad (3.10)$$

За поступак одређивања коефицијента апсорпције, када је узорак који се тестира постављен на место за испитивање у цеви, користи се стандардна поставка мерних микрофона. Као звучни извор у току испитивања се користи сигнал шума који има униформну спектралну густину у читавом фреквенцијском опсегу у коме се врши испитивање.



Слика 3.2. Амплитудске карактеристике функција преноса у стандардној и инверзној поставци и корекционе функције преноса [33]



Слика 3.3. Фазне карактеристике функција преноса у стандардној и инверзној поставци и корекционе функције преноса [33]

На сликама (3.2.) и (3.3.) приказане су амплитудска и фазна карактеристика функције преноса добијених поступком калибрације према захтевима стандарда [110]. Корекциона функција преноса је израчуната према изразу (3.10). Резултати су приказани за импедансну цев пречника 100 mm за позиције микрофона m2m3 и фреквенцијски опсег од 216 Hz до 1940 Hz.

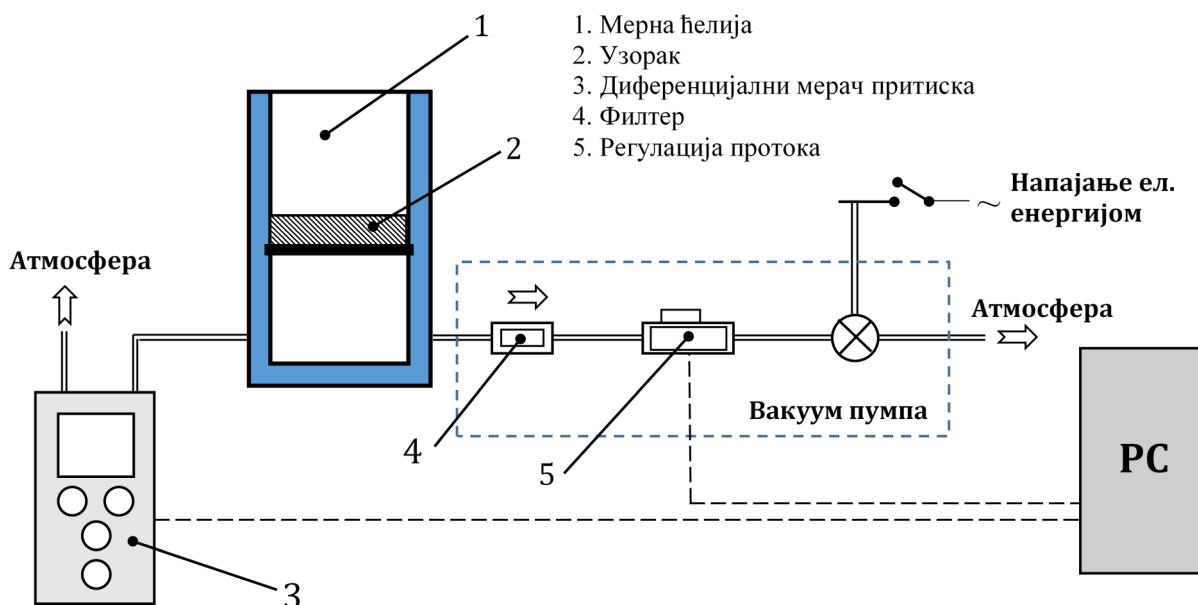
3.2.2 Одређивање отпорности струјању ваздуха

За произвођаче звучно апсорпционих материјала и пројектанте система заштите од буке важно је да имају могућност процене звучне апсорпције на основу познавања структурних и техничких својстава ових материјала. Мерењем отпорности струјању ваздуха за порозне материјале може се одредити коефицијент звучне апсорпције у зависности од фреквенције за различите густине и дебљине порозних материјала.

Стандардне методе за одређивање отпорности струјању ваздуха захтевају посебне инструменте који су доступни само у специјализованим лабораторијама. Мерни систем за одређивање отпорности струјању ваздуха се може, уз одговарајућу допуну, добити комбиновањем постојеће лабораторијске опреме која се може наћи у већини лабораторија за флуидну технику и акустику. Један такав мерни систем је реализован на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву

Пројектовање мерног система

За мерење отпорности струјању ваздуха одабрана је *метода са константним протоком ваздуха*, код које се ваздушни проток обезбеђује помоћу вакуум пумпе. Ова метода се заснива на проласку једносмерног ваздушног протока кроз узорак за испитивање у облику кружног цилиндра или правоуглог паралелопипеда и мерење резултујућег пада притиска између две слободне површине узорка. Структура мерног система који користи методу са сталним протоком ваздуха који се обезбеђује помоћу вакуум пумпе, приказана ја на блок дијаграму на слици 3.4.



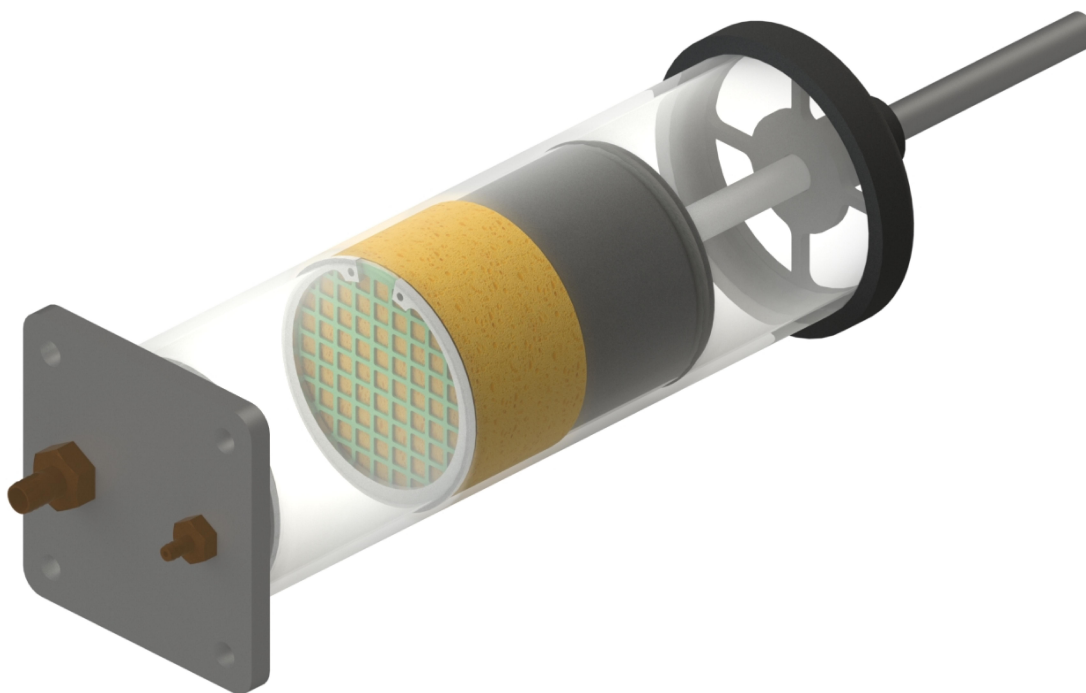
Слика 3.4. Блок дијаграм система са сталним протоком ваздуха

Као уређај за стварање ваздушног протока користи се вакуум пумпа марке ZAMBELLI, типа ZB1. Пумпа је мале тежине (7 kg) и као таква је погодна како за лабораторијска тако и за теренска мерења. Пумпа је мембранског типа и може остварити максималан слободан проток од 30 l/min. Подпритисак који пумпа даје је већи од 0,773 bar (580 mmHg). Пумпа поседује два мерача протока ваздуха, који раде на принципу ротаметра са куглицом. Мањи

протоци ваздуха у опсегу од $0,2 \div 6 \text{ l/min}$ се мере помоћу мањег ротаметра а већи протоци у опсегу од $5 \div 30 \text{ l/min}$ се мере помоћу већег ротаметра. Максимална грешка мерења протока је $\pm 2\%$. Пумпа омогућава фину контролу протока и стабилност протока у делу мерне ћелије који се налази иза узорка. Пумпа са својим карактеристикама обезбеђује довољно малу брзину ваздуха како измерена отпорност струјању ваздуха не би зависила од брзине ваздуха. Пумпа омогућава брзину струјања ваздуха у мерној ћелији од $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, што у потпуности одговара препорукама стандард SRPS ISO 9053 ($0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$).

У мерној ћелији са једне стране узорка је атмосферски притисак а са друге стране узорка је подпритисак који ствара вакуум пумпа. Да би се обезбедили услови за одржавање подпритиска мерна ћелија на једној страни мора бити добро заптивена. За мерење разлике притисака са једне и друге стране узорка за испитивање користи се диференцијални мерач притиска TESTO 512. Овај мерач има мерни опсег од 0 до 200 Pa са резолуцијом од 0,1 Pa. Употребљена опрема дозвољава мерење диференцијалног притиска до тачности $\pm 5\%$ од назначене вредности.

Мерна ћелија (слика 3.5.) је облика кружног цилиндра, а направљена је од плексигласа како би се могло визуелно пратити постављање узорка. Унутрашњи пречник мерне ћелије је 100 mm, чиме је задовољен захтев стандарда SRPS ISO 9053, да унутрашњи пречник мора бити већи од 95 mm.



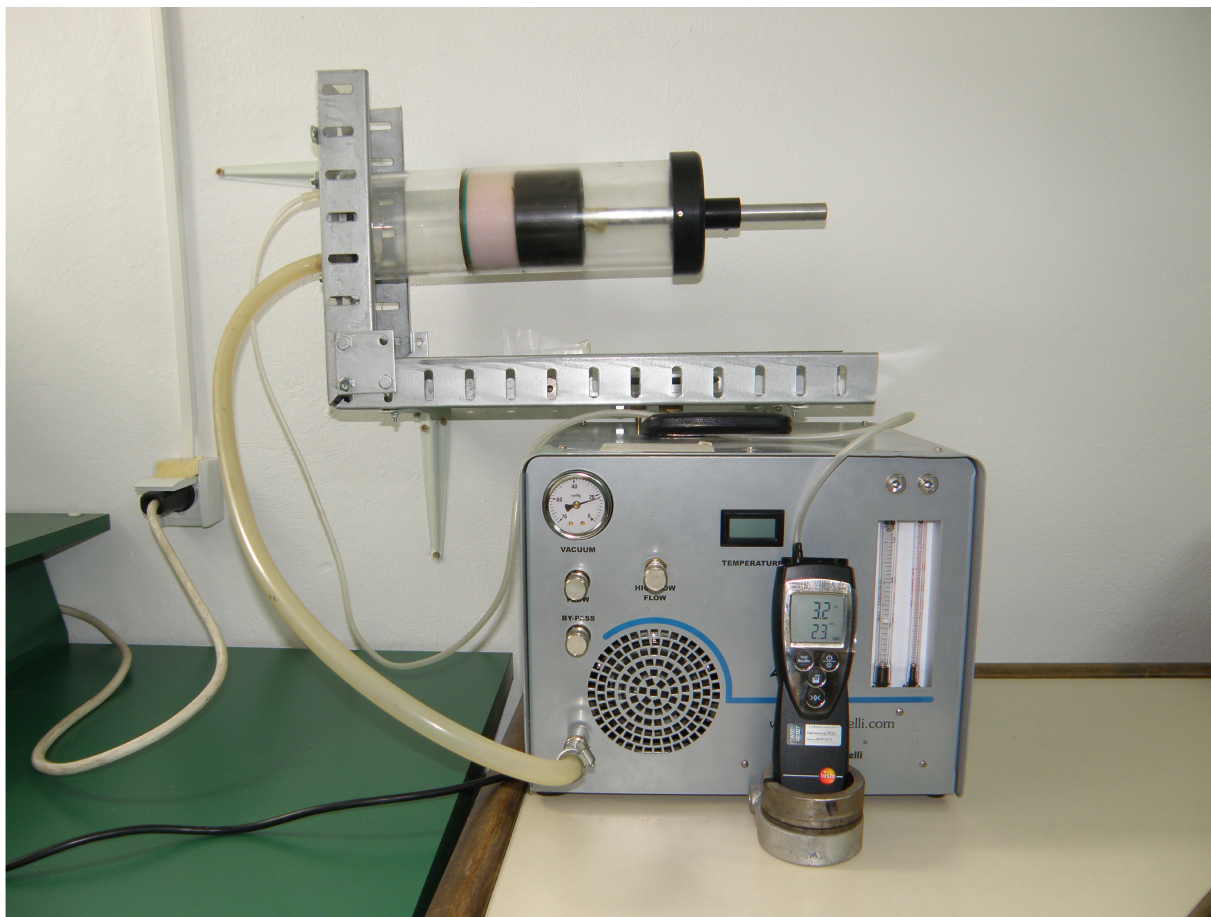
Слика 3.5. Мерна ћелија за одређивање отпорности струјању ваздуха

Висина (дужина) ћелије је 300 mm тако да проток ваздуха који улази и који излази из узорка за испитивање буде ламинаран. Висина (дужина) мерне ћелије треба да буде бар 100 mm већа од дебљине узорка. Узорак за испитивање мора да се постави у мерну ћелију, изнад и довољно далеко од основице ћелије да би се постигли горе наведени захтеви. Ослонац за узорак треба да има равномерно распоређене отворе на најмање 50%

површине. Минимални пречник отвора је такође прописан (3 mm). Минималан проценат отвора је прописан да се не би ограничио проток ваздуха кроз узорак. Отпорност струјању ваздуха оваквих елемената (измерених са брзином ваздуха већом од највеће брзине која се користи при испитивању узорака) мора да буде мања од 1% отпорности струјању измерене при испитивању узорка.

Мерна ћелија је постављена на прирубницу која се може везати за носач мерне ћелије опционо у хоризонтални или вертикални положај. Мерна ћелија се може користити и без везивања на носач, па је као таква погодна и за рад на терену или директно у процесу производње и контроле акустичких материјала.

Изглед реализованог мерног система, са мерном ћелијом постављеном на носач у хоризонталном положају, са свом потребном апаратуром за одређивање отпорности струјању ваздуха приказан је на слици 3.6. Приказан мерни систем је реализован у Лабораторији за мерење буке на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву.



Слика 3.6. Изглед реализованог мерног система за одређивање отпорности струјању ваздуха

Поступак испитивања и одређивање вредности отпорности струјању

Поступак испитивања и одређивање вредности отпорности струјању ваздуха је приказан на примеру полиуретанске пене HR 3536.

Поступак испитивања

1. У мерну ћелију се постави узорак за испитивање
2. Провери се да ли су ивице добро заптивене. За влакнасте и пенасте апсорпционе материјале најчешће није потребно никакво додатно заптивање. За заптивање крутих узорака мора се обезбедити заптивање које се може извести применом различитих заптивних материјала. Стандард препоручује масе на бази битумена. Када је у питању избор масе за заптивање мора се водити рачуна да се након заптивања та маса може лако скинути, како својим присуством на зидовима мерне ћелије не би ометала наредна мерења. Осим тога мора се водити рачуна за колико та маса отврдне и чиме се може скинути са зидова мерне ћелије. Гребане отврдле заптивне масе може оштетити зид мерне ћелије. Употреба додатних хемијских средстава за скидање заптивне масе успорава процес мерења и доводи до непотребних трошкова. Због тога је у зависности од материјала узорка важно одредити заптивни материјал који се лако наноси и скида.
3. Уколико није позната дебљина узорка који се испитује, помоћу мерног уређаја који је саставни део мерне ћелије се врши мерење дебљине у тзв. слободном стању узорка где се помоћу клипа са решетком узорак само лагано дохвати.
4. Забележи се дебљина узорка и ово мерење се употреби за одређивање запремине у слободном стању
5. Мерна ћелија је тако пројектована да омогућава и мерење отпорности струјању ваздуха на узорцима од влакнастих и пенастих материјала, чија се дебљина може мењати. Промена дебљине се врши помоћу притиска клипа са решетком и фиксирања клипа, чиме узорак остаје у сабијеном стању.
6. Забележи се дебљина узорка и ово мерење се употреби за одређивање запремине у сабијеном стању
7. Пошто специфична отпорност струјању ваздуха код многих апсорпционих материјала расте са порастом брзине ваздуха у одређеном опсегу брзина, мора се мерити при најмањој могућој брзини ваздуха. За доњу границу препоручује се брзина ваздуха од $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Ова вредност брзине честице одговара притиску звука од 0,2 Ра.

Узорци за испитивање

Облик мерне ћелије условљава облик узорка. Када се испитују меки, стишљиви материјали, као што су влакнасти и пенасти материјали, при припреми узорака мора се обратити пажња да се у што већој мери смањи могућност пропуштања ваздуха дуж њихових ивица. Овај проблем се решава тако што се припремају узорци чији је пречник мало већи од пречника мерне ћелије. Узорци од крутих материјала морају имати исте мере као и мерна ћелија.

Што се тиче дебљине узорка, држач узорка мора да буде опремљен микрометром или неким другим показивачем којим се мери дебљина узорка са тачношћу $\pm 2,5\%$ од назначене вредности. Дебљина узорка за испитивање се бира тако да се добије мерљив пад притиска. Ако су узорци за испитивање недовољне дебљине да се створи мерљив пад притиска, испитани узорци могу да буду наслагани један на други и то највише пет узорака. Овако наслагани узорци морају бити одабрани на исти начин.

Број узорака за испитивање се мора узети из најмање три производа и из сваког од њих се морају исећи по три пробна узорка за испитивање.



Слика 3.7. Узорак за испитивање

Пример одређивања вредности отпорности струјању ваздуха

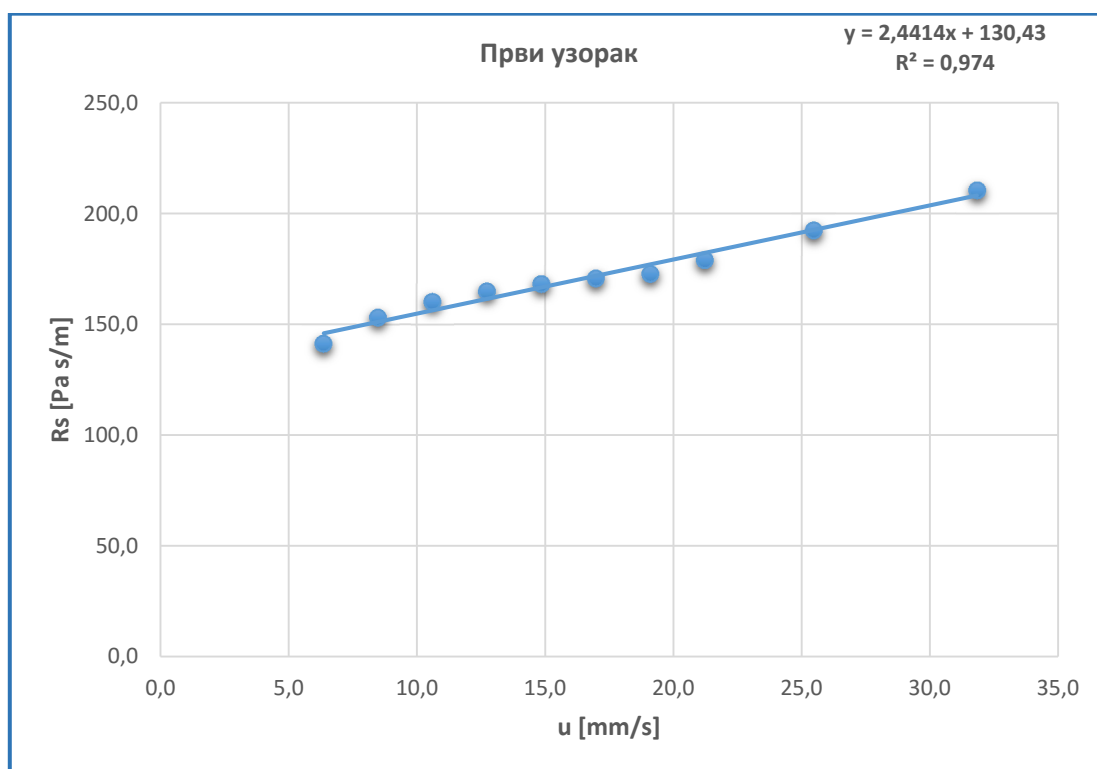
Да би се одредила специфична отпорност струјању ваздуха потребно је одабрати 10 вредности запреминског протока и за њих измерити пад притиска преко узорка. Ламинарну брзину струјања ваздуха потребно је смањивати све до вредности 0,5 mm/s, уколико то проток пумпе омогућава. При најмањем могућем протоку ваздуха, пад притиска мора бити мерљив. Уколико није могуће измерити пад притиска на граничној вредности брзине струјања од 0,5 mm/s, вредност специфичне отпорности струјању ваздуха се одређује екстраполацијом. Отпорност струјању ваздуха линеарно зависи од запреминског протока ваздуха, односно брзине струјања. Таква линеарна зависност је дефинисана једначином линеарне регресије. Коефицијент детерминације (R^2) дефинише јачину остварене везе. За сваки узорак се одређује једначина линеарне регресије. Вредност отпорности струјању се одређује из једначине линеарне регресије за граничну вредност брзине струјања ваздуха од 0,5 mm/s.

Као материјал за проверу тачности мерне методе одабрана је високоеластична полиуретанска пена HR 3536, густине 35 kg/m³. Мерење је извршено на 30 узорака чије су дебљине: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 mm. Свака дебљина је садржала по 3 узорка. У табели 3.2. су приказане одабране вредности запреминског протока (q_v), којима према једначини континуитета одговарају брзине струјања (u) у мерној ћелији. За такве брзине струјања измерен је пад притиска који представља разлику атмосферског притиска са једне стране узорка и подпритиска који ствара вакуум пумпа са друге стране узорка. Отпорност струјању ваздуха (R) се израчунава као однос измереног пада притиска и запреминског протока који тај пад изазива.

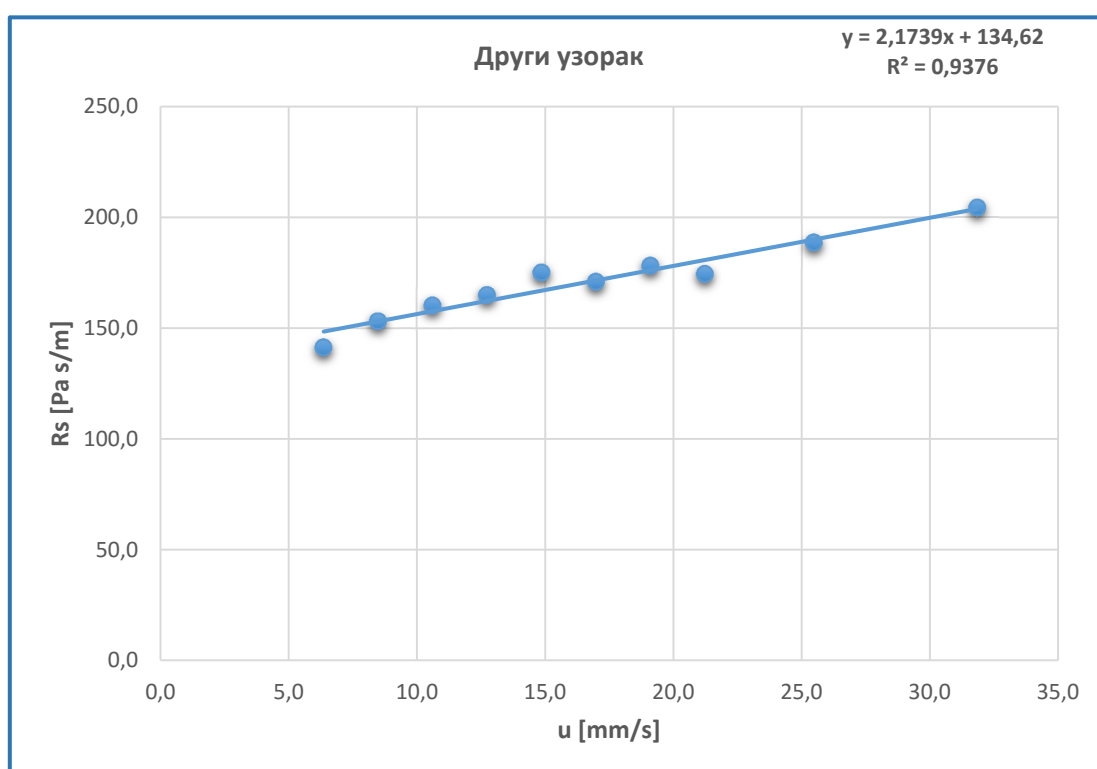
Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха пене HR 3536 приказано је на дијаграмима на сликама 3.8., 3.9. и 3.10. на три узорка дебљине 60 mm. Оваква процедура је спроведена на свих 30 узорака а резултати су приказани у табели 3.2. Права линеарне регресије је добијена на основу 10 вредности протока ваздуха у распону од 15÷3 [l/min]. Након утврђивања једначине линеарне регресије, за сваки од узорака, екстраполацијом је одређена вредност отпорности струјања ваздуху за брзину од 0,5 mm/s. На основу вредности коефицијената детерминације (R^2) види се да је корелација између специфичне отпорности струјању ваздуха и брзине струјања веома висока.

Табела 3.2. Резултати мерења отпорности струјању ваздуха за ПУ пену HR 3536 (дебљина узорка 60 mm)

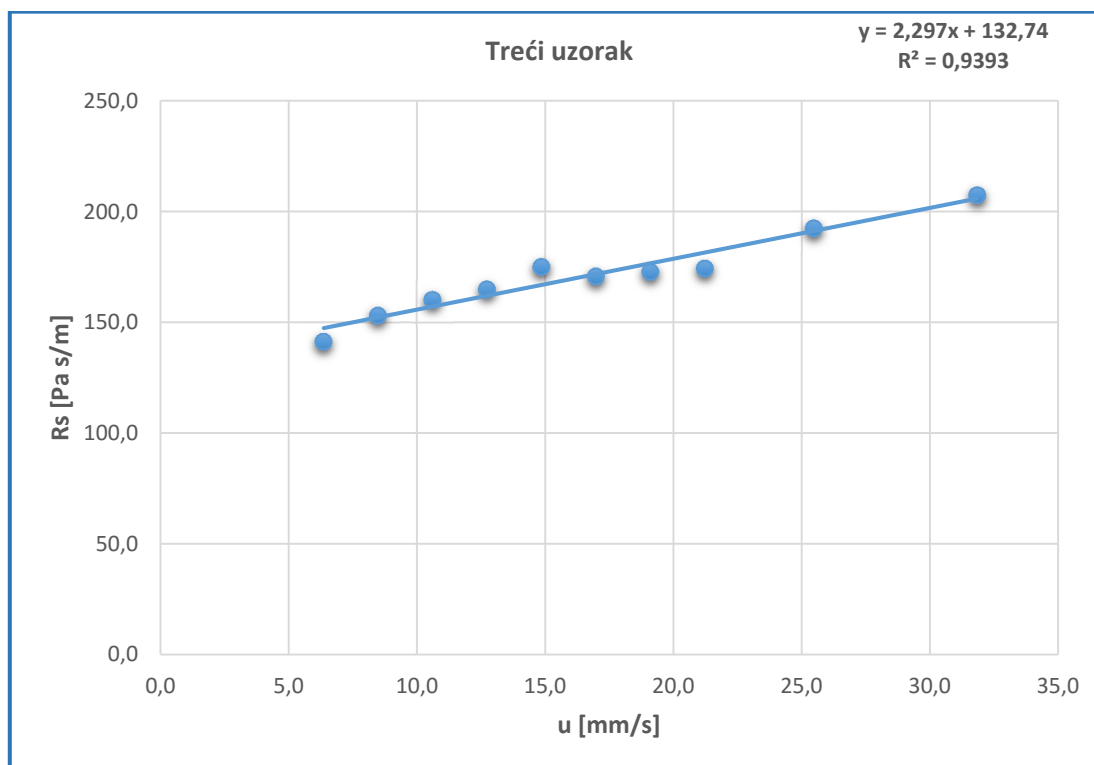
	q_v	u	Δp	R	R_s	r
	[lit/min]	[mm/s]	[Pa]	[Pa·s/m ³]	[Pa·s/m]	[Pa·s/m ²]
Први узорак	15	31.8	6.7	26800	210.5	3508.1
	12	25.5	4.9	24500	192.4	3207.0
	10	21.2	3.8	22800	179.1	2984.5
	9	19.1	3.3	22000	172.8	2879.8
	8	17.0	2.9	21750	170.8	2847.1
	7	14.9	2.5	21429	168.3	2805.0
	6	12.7	2.1	21000	164.9	2748.9
	5	10.6	1.7	20400	160.2	2670.3
	4	8.5	1.3	19500	153.2	2552.5
	3	6.4	0.9	18000	141.4	2356.2
Други узорак	15	31.8	6.5	26000	204.2	3403.4
	12	25.5	4.8	24000	188.5	3141.6
	10	21.2	3.7	22200	174.4	2906.0
	9	19.1	3.4	22667	178.0	2967.1
	8	17.0	2.9	21750	170.8	2847.1
	7	14.9	2.6	22286	175.0	2917.2
	6	12.7	2.1	21000	164.9	2748.9
	5	10.6	1.7	20400	160.2	2670.4
	4	8.5	1.3	19500	153.2	2552.5
	3	6.4	0.9	18000	141.4	2356.2
Трећи узорак	15	31.8	6.6	26400	207.3	3455.8
	12	25.5	4.9	24500	192.4	3207.0
	10	21.2	3.7	22200	174.4	2906.0
	9	19.1	3.3	22000	172.8	2879.8
	8	17.0	2.9	21750	170.8	2847.1
	7	14.9	2.6	22286	175.0	2917.2
	6	12.7	2.1	21000	164.9	2748.9
	5	10.6	1.7	20400	160.2	2670.4
	4	8.5	1.3	19500	153.2	2552.5
	3	6.4	0.9	18000	141.4	2356.2



Слика 3.8. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – I узорак)



Слика 3.9. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – II узорак)



Слика 3.10. Одређивање специфичне отпорности струјању ваздуха за HR 3536 (дебљина узорка 60 mm – III узорак)

Вредности специфичне отпорности струјању ваздуха - R_s (табела 3.3.) представљају аритметичку средину за три узорка за одговарајућу дебљину. На основу средње специфичне подужне отпорности струјању ваздуха, израчуната је средња вредност подужне специфичне отпорности струјању $r_{sr,d}$ за одговарајућу дебљину узорка. Подужна отпорност струјању ваздуха (r), за полиуретанску пену HR 3536 је израчуната као аритметичка средина подужних отпорности струјању ваздуха, узимајући у обзир све дебљине узорка.

Табела 3.3. Вредности отпорности струјању ваздуха и подужне отпорности струјању ваздуха за пену HR 3536

d [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R_s [Pa·s/m]	13,6	41,6	67,0	89,0	105,5	133,8	165,2	196,6	219,7	245,9
$r_{sr,d}$ [Pa·s/m ²]	1360,0	2080,0	2234,4	2225,8	2110,0	2229,2	2360,0	2457,5	2441,2	2458,7
r [Pa·s/m ²]	2195,7									

Одређивање коефицијента звучне апсорпције према стандарду EN 12354-6: 2003

Стандард EN 12354-6: 2003 препоручује прорачун дифузног коефицијента апсорпције звука порозних материјала. За дифузно акустичко поље, коефицијент апсорпције α_s може се одредити као:

$$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi \quad (3.11)$$

$$\alpha_{\varphi} = 1 - \left| \frac{Z' \cos \varphi - 1}{Z' \cos \varphi + 1} \right|^2 \quad (3.12)$$

$$Z' = Z'_c \coth \gamma d \quad (3.13)$$

где је:

- φ - упадни угао, у радијанима
- α_{φ} - коефицијент апсорпције равног звучног таласа, везан за угао φ
- $Z'/\rho_0 c_0$ – нормализована површинска импеданса слоја
- $Z'_c/\rho_0 c_0$ – нормализована карактеристична импеданса апсорпционог материјала
- γ - коефицијент простирања у апсорпционом материјалу у rad/m
- d – дебљина слоја, m

Нормализована карактеристична импеданса Z'_c и коефицијент простирања γ , могу се одредити ако се познаје подужна отпорност струјања порозних материјала r , користећи теоријске моделе које предлаже стандард EN 12354-6: 2003:

Табела 3.4. Модели за прорачун коефицијента апсорпције влакнастих и пенастих материјала

Модел Delaney & Bazley (за влакнасте материјале)		Модел Dunn & Davern (за пене са отвореним ћелијама)	
$Z'_c = (1 + 0.0571 \cdot C^{0.754}) - i(0.087 \cdot C^{0.732})$	(3.14)	$Z'_c = (1 + 0.114 \cdot C^{0.369}) - i(0.0095 \cdot C^{0.758})$	(3.15)
$\gamma = k_0 (0.189 \cdot C^{0.595}) + ik_0 (1 + 0.0978 \cdot C^{0.7})$	(3.16)	$\gamma = k_0 (0.168 \cdot C^{0.715}) + ik_0 (1 + 0.136 \cdot C^{0.494})$	(3.17)

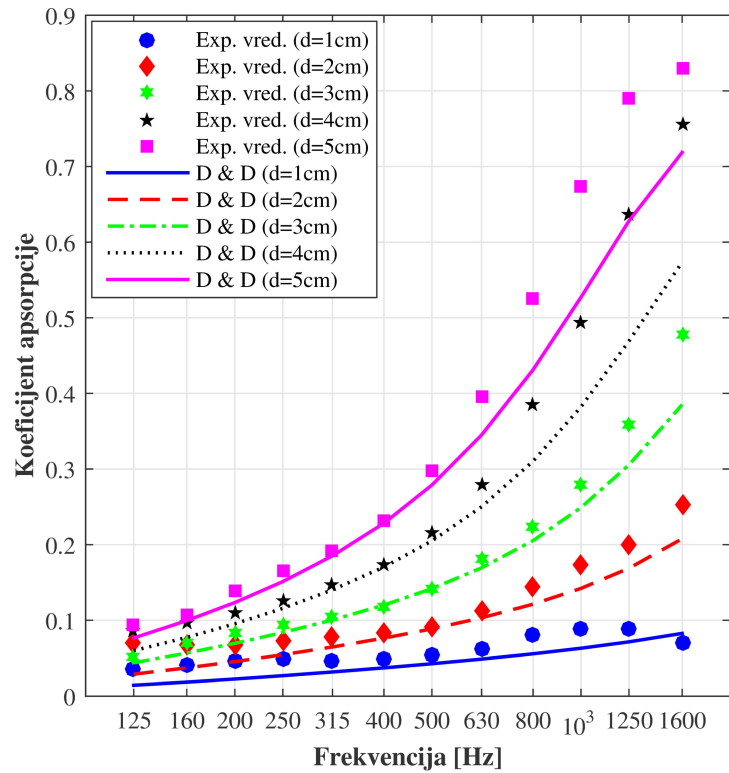
где је:

$$C = \frac{r}{\rho_0 f} \quad (3.18)$$

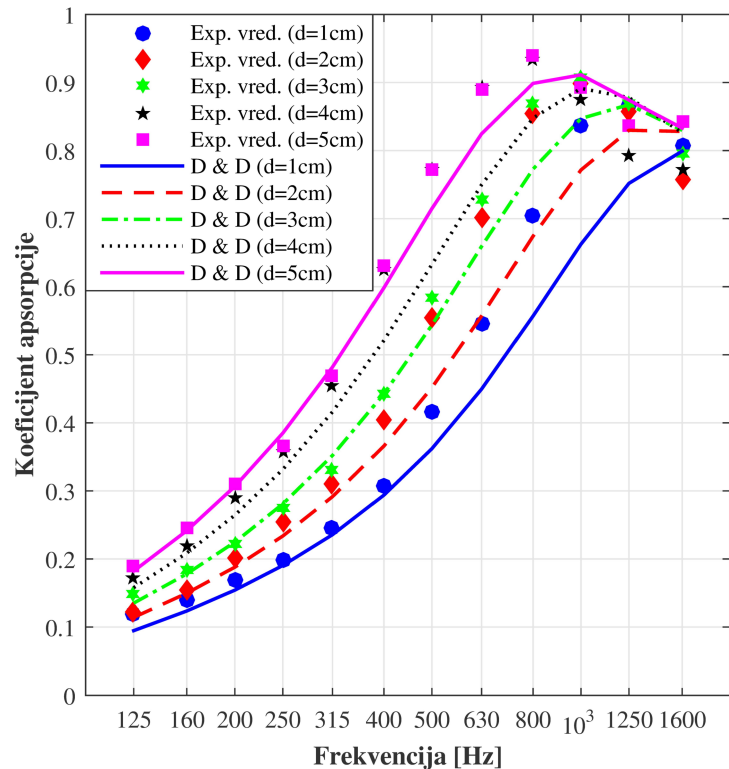
- r – подужна (специфична) отпорност струјању ваздуха, [Pa·s/m²]
- f – фреквенција [Hz]
- ρ_0 – густина ваздуха, [kg/m³] (≈ 1.2 kg/m³)

Велика предност емпиријских модела, када је у питању одређивање акустичке импедансе и коефицијента простирања, је у томе што ови модели за разлику од других имају само један улазни параметер, подужну отпорност струјању ваздуха. Један улазни параметер може бити и недостатак емпиријских модела, уколико се подужна отпорност струјању ваздуха не одреди са довољном тачношћу.

За одређивање акустичке импедансе и коефицијента простирања, одабран је емпиријски модел Dunn & Davern, јер он према прегледу литературе [90,96] даје најбоље резултате за пене са отвореном ћелијском структуром и мале вредности подужне отпорности струјању ваздуха. Узорци високоеластичне полиуретанске пене HR 3536 припадају групи пена са отвореном структуром а измерена вредност подужне отпорности струјању од 2196 Pa·s/m², спада у категорију ниских вредности.



Слика 3.11. Упоредни приказ коефицијента апсорпције ПУ пене HR 3536 измереног у импедансној цеви и одређеног помоћу емпиријског модела Dunn & Davern за дебљине од 1 cm до 5 cm



Слика 3.12. Упоредни приказ коефицијента апсорпције ПУ пене HR 3536 измереног у импедансној цеви и одређеног помоћу емпиријског модела Dunn & Davern за дебљине од 6 cm до 10 cm

Одређивање грешака коефицијента апсорпције

Коефицијент апсорпције неког од узорака пене може се приказати у облику α_{ijk} , где су:

- i – променљива броја узорака исте дебљине ($l = 3$)
- j – променљива броја различитих дебљина узорака ($m = 10$)
- k – променљива броја терци при мерењу коефицијента апсорпције у импедансној цеви ($p = 12$)

Коефицијент апсорпције је израчунат према моделу Dunn & Davern и упоређен са вредностима резултата мерења који су за те исте узорке добијени у импедансној цеви. Тачност предвиђања коефицијента апсорпције је одређена статистички, прорачуном апсолутне и релативне грешке.

Средња вредност апсолутне грешке за неку терцну фреквенцију, може се одредити према изразу:

$$\Delta \bar{\alpha}_k = \frac{1}{l} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m |\alpha_{ij,D\&D,n} - \alpha_{ij,meas}| \quad (3.19)$$

Где су:

- $\alpha_{ij,D\&D,n}$ - коефицијент апсорпције одређен према моделу Dunn & Davern при нормалној инциденцији таласа
- $\alpha_{ij,meas}$ - средња вредност коефицијента апсорпције измерена у импедансној цеви

Вредности $j = 1 \div 10$ се односе респективно на дебљине узорака пене: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm. Вредности $k = 1 \div 12$, одговарају респективно вредностима терцних фреквенција: 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600.

Средња вредност апсолутне грешке за фреквентни опсег се одређује према изразу:

$$\Delta \bar{\alpha} = \frac{1}{l} \frac{1}{m} \frac{1}{p} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p |\alpha_{ij,D\&D,n} - \alpha_{ij,meas}| \quad (3.20)$$

Средња вредност релативне грешке за неку терцну фреквенцију, може се одредити према изразу:

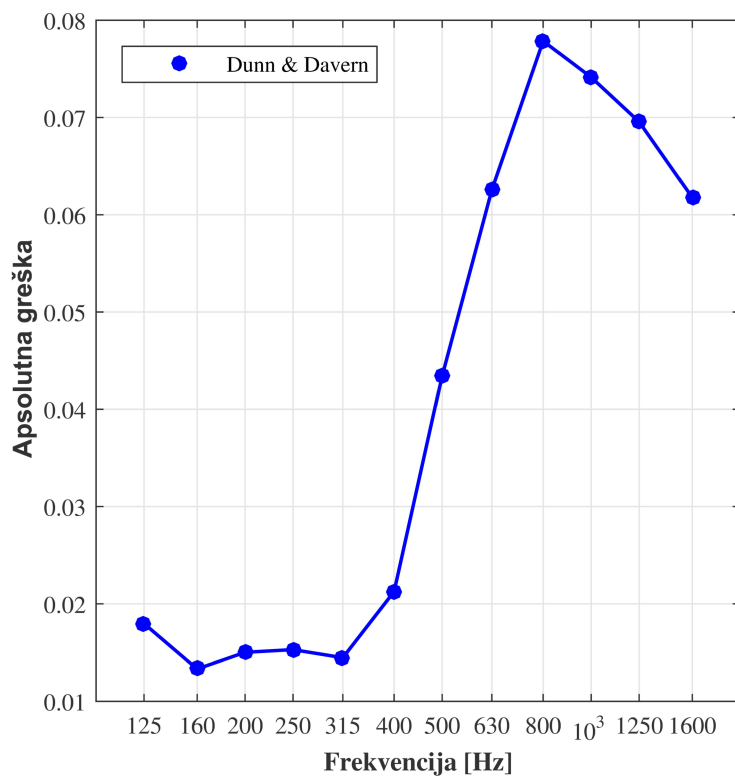
$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\frac{1}{l} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m |\alpha_{ij,D\&D,n} - \alpha_{ij,meas}|}{\alpha_{ij,meas}} \cdot 100 [\%] \quad (3.21)$$

Средња вредност релативне грешке за фреквентни опсег се одређује према изразу:

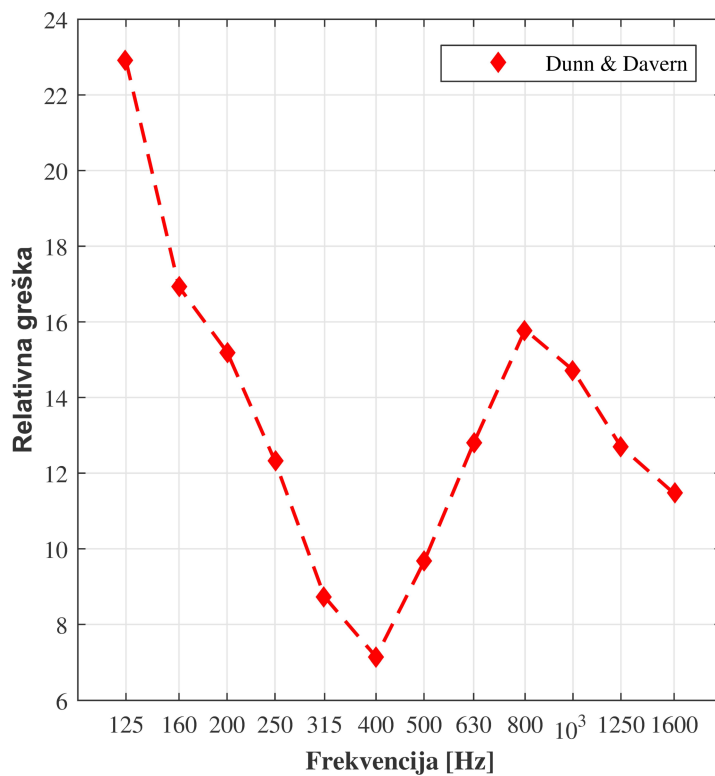
$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \bar{\varepsilon}_k \quad (3.22)$$

Вредности апсолутне грешке у испитиваном фреквенцијском подручју су приказане на слици 3.13. Апсолутна грешка коефицијента апсорпције на одређеној фреквенцији је израчуната као разлика измерених вредности коефицијента апсорпције у импедансној цеви и израчунатих вредности користећи модел Dunn & Davern. Као улазни параметар у

емпиријски модел Dunn & Davern, коришћена је вредност подужне отпорности струјању од 2196 Pas/m^2 , чија је вредност раније одређена. Вредности релативне грешке су приказане на слици 3.14.



Слика 3.13. Вредност апсолутне грешке коефицијента апсорпције пене HR 3536



Слика 3.14. Вредност релативне грешке коефицијента апсорпције у процентима за пене HR 3536

Табела 3.5. Вредности грешака коефицијента апсорпције за полиуретанску пену HR 3536

Пена	Модел	Подужна отпорност струјању ваздуха	Средња апсолутна грешка	Средња релативна грешка
HR 3536	Dunn & Davern	$r, [\text{Pas/m}^2]$	$\Delta \bar{\alpha} [-]$	$\bar{\varepsilon} [\%]$
		2196	0,041	13,36

Вредности апсолутне и релативне грешке коефицијента апсорпције (табела 3.5.; слике: 3.13. и 3.14.) у потпуности се могу поредити са вредностима грешака емпиријских модела за влакнасте материјале представљеним у раду [96]. Вредности апсолутних одступања коефицијента апсорпције влакнастих материјала приказаних у раду [34] упоредиви су и сагласни са вредностима средње апсолутне грешке за пенасте материјале.

Може се констатовати да је емпиријски модел Dunn & Davern дао веома добре резултате чиме је потврђена валидност мерне методе за одређивање отпорности струјању ваздуха која је реализована на ново пројектованом мерном систему са константним протоком ваздуха.

Намеће се закључак, да се одређене мерне методе могу реализовати коришћењем постојеће лабораторијске опреме, чиме се остварују велике финансијске уштеде у односу на куповину комерцијалних мерних система.

3.3. Методологија обраде података

За изражавање зависности коефицијента апсорпције материјала од испитиваних параметара на основу добијених експерименталних података су коришћени емпиријски математички модели и то: стохастички (регресиони) модели и детерминистички аналитички модели.

Формирање *стохастичких емпиријских модела* се врши поступком регресионе анализе. Из фонда расположивих аналитичких модела у облику полинома n -тог степена се на основу статистичке анализе бира најповољнији модел по процедури која ће бити објашњена у наставку. Помоћу ових модела се аналитички изражава статистички однос међу испитиваним појавама кроз случајне променљиве којима се представљају несистематски-стохастички утицаји.

Детерминистички емпиријски модели су аналитички модели који изражавају функционални однос међу појавама али у себи не садрже њихов статистички однос тј. не препознају случајну природу улазних компоненти. Ови модели у акустици се заснивају на макроскопским карактеристикама материјала и у литератури су најчешће познати као *макроскопски емпиријски модели*.

3.3.1 Методологија формирања стохастичких модела

Да би се спровео поступак регресионе анализе и извршио избор адекватног регресионог модела након избора експерименталног плана и спроведених експерименталних мерења неопходно је спровести следеће фазе (слика 3.15.):

1. Унос експерименталних података
2. Збирна статистика могућих математичких модела
3. Избор стохастичког модела
4. ANOVA анализа - оцена сигнификантности модела
5. Оцена адекватности модела
6. Интервална оцена параметара модела
7. Дијагностика модела и по потреби трансформација модела и понављање циклуса избора и оцене трансформисаног модела
8. Интервална оцена регресионе функције
9. Графичка интерпретација и тумачење модела.

За формирање и анализу стохастичких модела је коришћен софтверски пакет *Design Expert v.9.0.6.2*. Избор регресионог модела зависи, пре свега, од расположивог броја експерименталних тачака. Међутим, и кад се располаже довољним бројем експерименталних тачака, не значи да ће модел највишег степена бити и најбољи. Модели се формирају у облику полинома n -тог степена. За експерименте са смешама се користе полиноми до четвртог а за остале експерименте полиноми до шестог степена.

За избор стохастичког модела се користи Збирна статистичка анализа [111,112] која упоређује могуће моделе на основу: стандардне девијације (Standard Deviation), коефицијента детерминације (R-Squared), коригованог коефицијента детерминације

(Adjusted R-Squared), претпостављеног коефицијента детерминације (Predicted R-Squared) и PRESS статистике (Prediction Sum of Squares Statistic).

Design-Expert [111] користи *Witkomb Score* статистику за бодовање (*score*) модела:

10. Израчунавају се вредности (M) из секвенцијалног модела суме квадрата.

- $M = 1$ if $p \leq 0,05$
- $M = 0,05/p$ if $p > 0,05$
- $M = 0$ if model is aliased

11. Израчунавају се вредности (L) из *Lack-of-fit* табеле:

- $L = 1$ if $p \geq 0,10$
- $L = p / 0,10$ if $p < 0,10$

12. Комбиновање прве две оцене са статистиком R^2 чиме се формира укупна оцена:

- Score-1 = $(M)(L)(R^2_{\text{predicted}})$
- Score-2 = $(M)(L)(R^2_{\text{adjusted}})$
- Избор модела са максималном оценом.

Где је:

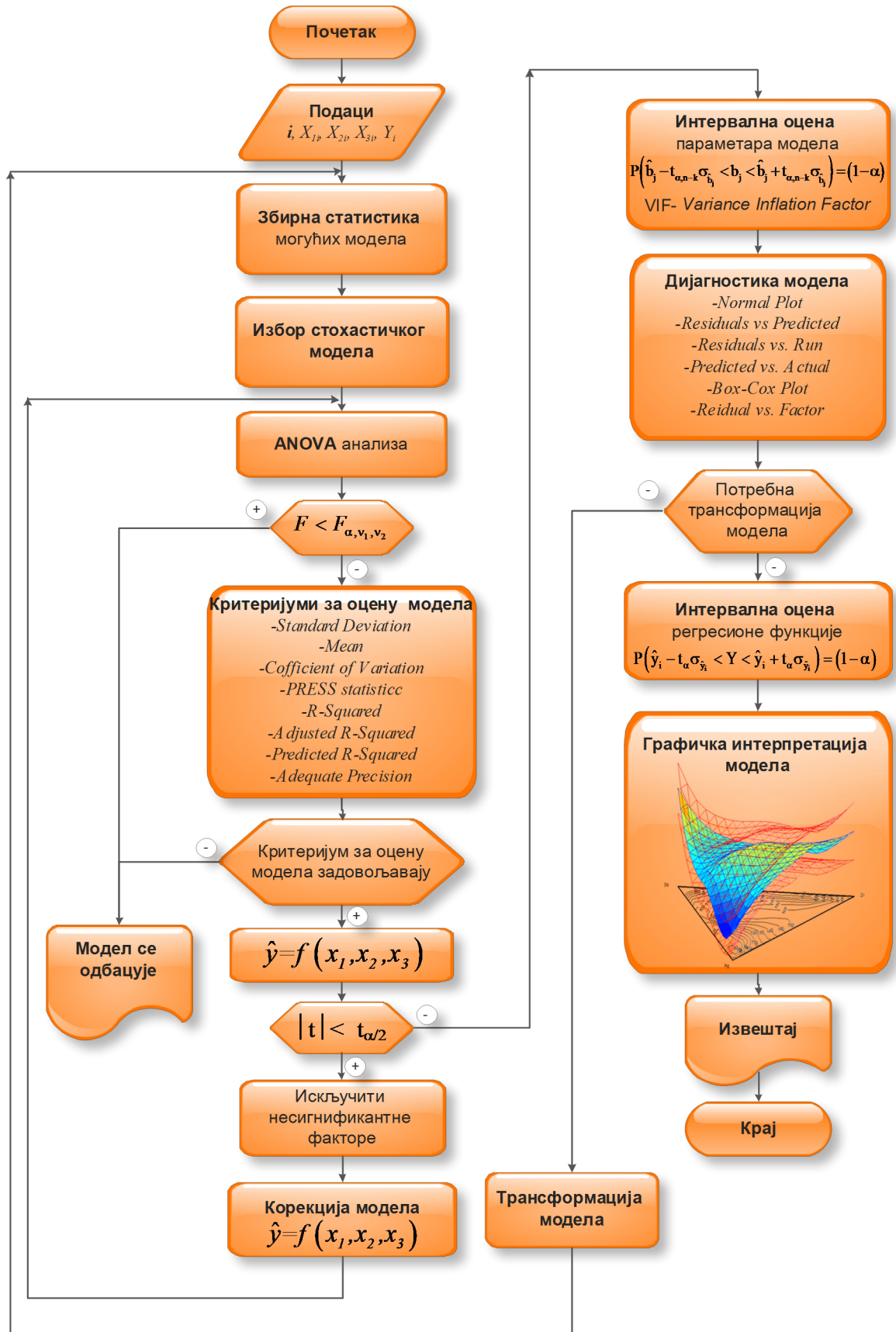
$$R^2_{\text{predicted}} = 1 - SS_{\text{PRESS}} / (SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Blocks}})$$

У већини случајева се предлажу два модела. Препорука је да се одабере модел са већом вредношћу претпостављеног коефицијента вишеструке детерминације (*predicted r-squared*).

За одабрани модел се ради анализа варијансе (ANOVA- Analysis of Variance). Провера се врши помоћу Фишевог теста (F-тест) који се ослања на следеће хипотезе:

$$H_0 \dots b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0; H_1 \dots \exists b_i \neq 0, i = 1, 2, \dots, k.$$

Нулта хипотеза H_0 садржи тврдњу да ниједна регресиона променљива у моделу није сигнификантна тј. да су сви параметри уз регресионе променљиве једнаки нули. Алтернативна хипотеза H_1 тврди да од k регресионих променљивих постоји бар једна која је сигнификантна за објашњење варијабилности зависне променљиве, тј. да постоји бар један параметар b_i различит од нуле. Величина за тестирање је F-однос:



Слика 3.15. Алгоритам за избор оптималног стохастичког модела

$$F = \frac{\frac{SS_R}{v_1}}{\frac{SS_E}{v_2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k)} \quad (3.23)$$

где је:

n – укупан број експерименталних тачака

k – број регресионих коефицијената

SS_R – регресиона сума квадрата

SS_E – сума квадрата резидуала (грешака)

v_1, v_2 – степени слободе

Одлука о адекватности модела се доноси на основу упоређења емпиријске вредности величине F и теоријске вредности F -расподеле. Подручје прихватања нулте хипотезе је $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ а подручје неприхватања нулте хипотезе је $F > F_{\alpha, v_1, v_2}$. Прихватањем нулте хипотезе прихвата се и претпоставка да регресионе променљиве у моделу нису сигнификантне. У супротном се сматра да постоји бар једна од k регресионих променљивих која значајно доприноси објашњавању променљивости зависне променљиве Y .

За оцену квалитета модела на располагању су следеће статистичко-аналитичке величине [113,114]:

- коефицијент вишеструке детерминације R^2
- кориговани коефицијент вишеструке детерминације \bar{R}^2
- резидуална средина квадрата- варијанса $\hat{\sigma}^2$
- Mallows-ов показатељ C_p
- PRESS статистика - Prediction Sum of Squares Statistic
- Akaike's Information Criterion - AIC
- Schwartz's Bayesian Criterion - SBC
- Bayes' Information Criterion - BIC
- Amemiya's Prediction Criterion – PC
- Witcomb Score – WS и др.

Оцена сигнификантности параметра модела (регресионих коефицијената) се своди на тестирање хипотезе о значајности параметра b_j (регресионе променљиве X_j). Нулта хипотеза садржи твдњу да је параметар b_j једнак нули тј. да је променљива X_j у моделу сувишна. Алтернативна хипотеза твди супротно. За оцену сигнификантности на располагању су t -тест или F -тест јер између њих постоји зависност облика $F(1;v)=t^2(v)$.

Хипотезе и начин доношења одлуке према t -тесту је дат у табели 3.6. Тест величина је емпиријски t -однос

$$t = \frac{\hat{b}_j}{\sigma_{\hat{b}_j}} \quad (3.24)$$

који се распоређује по Студентовој расподели с $v=n-k$ степени слободе.

Табела 3.6. Оцена сигнификатности параметара према t-тесту

Нулта хипотеза	$H_{0...}b_j=0$
Алтернативна хипотеза	$H_{1...}b_j\neq 0$
Подручје прихватања H_0	$ t < t_{\alpha/2}$
Подручје одбацавања H_0	$ t > t_{\alpha/2}$

Такође се може применити и F-тест при чему је тест величина емпиријски F-однос

$$F = \left[\frac{\hat{b}_j}{\sigma_{\hat{b}_j}} \right]^2 \quad (3.25)$$

који припада F расподелу са $\nu_1=1$ и $\nu_2=n-k$ степени слободе. Одлука се доноси упоређивањем емпиријске вредности са теоријском вредношћу F расподеле на већ познати начин.

Стандардна грешка регресионог коефицијента је:

$$\sigma_{\hat{b}_j} = \hat{\sigma} \sqrt{C_{jj}} \quad (3.26)$$

где је:

$\hat{\sigma}$ – процена стандардне девијације

C_{jj} – дијагонални елемент матрице $(X'X)^{-1}$

Група несигнификантних параметара модела се након анализе може искључити из модела не коригујући при том вредности осталих сигнификантних параметара који остају у моделу.

Да би се имала информацију о прецизности параметара модела, није довољно извршити само њихову процена бројем већ треба одредити и њихове интервалне оцене тј. границе поузданости. Ове су границе одређене општим изразом

$$P\left(\hat{b}_j - t_{\alpha, n-k} \sigma_{\hat{b}_j} < b_j < \hat{b}_j + t_{\alpha, n-k} \sigma_{\hat{b}_j}\right) = (1-\alpha) \quad (3.27)$$

где је:

\hat{b}_j – процена параметра b_j бројем

$t_{\alpha, n-k}$ – вредност t расподеле за вероватноћу α и $n-k$ степени слободе

$(1-\alpha)$ – поузданост процене

$\sigma_{\hat{b}_j}$ – стандардна грешка регресионог коефицијента

За дијагностику модела на располагању су бројне технике [111]:

- Дијаграм нормалне расподеле резидуала, који приказује да ли резидуали прате нормалну расподелу
- Дијаграм односа студентизованих резидуала и претпостављених вредности
- Дијаграм студентизованих резидуала по редоследу извршења експеримента

- Дијаграм односа претпостављених вредности и актуелних (експерименталних) вредности, и
- Вох-Сох дијагностика (Box-Cox Plot for Power Transformation)

Вох-Сох дијаграм је алат који помаже да се одреди најбоља трансформација модела. Већина трансформација података може се описати функцијом снаге $\sigma = fn(\mu^\alpha)$, где је сигма (σ) стандардна девијација, ми (μ) је аритметичка средина и алфа (α) је снага. Ламбда (λ) је $1-\alpha$. Најчешће се користе трансформације:

- $\lambda = -1$ инверзна (inverse)
- $\lambda = 0$ природни логаритам (natural log)
- $\lambda = 0.5$ квадратни корен (square root)
- $\lambda = 1$ без трансформације (no transformation).

На крају је потребно урадити и интервалну оцену математичког модела тј одредити границе поузданости модела у одређеној тачки простора:

$$P(\hat{y}_i - t_\alpha \sigma_{\hat{y}_i} < Y < \hat{y}_i + t_\alpha \sigma_{\hat{y}_i}) = (1 - \alpha) \quad (3.28)$$

Design Expert поседује модул у коме се приказује график распростирања грешке (*POE-Propagation of Error*) који показује како се грешка преноси на одзив. Површина има минимум тамо где је најмањи износ грешке пренет на функцију одзива.

За графичку интерпретацију математичког модела на располагању су тродимензионални дијаграми и дводимензионални контурни дијаграми.

3.3.1 Методологија формирања макроскопских емпиријских модела

Основна предност макроскопских емпиријских модела за одређивање коефицијента апсорпције порозних материјала, огледа се у њиховој једноставности, јер имају један улазни параметар, подужну отпорност струјању ваздуха.

Поступак избора емпиријског модела започиње мерењем отпорности струјању ваздуха према методи SRPS ISO 9053. На основу измерених вредности пада притиска преко испитиваног узорка порозног материјала одређује се *специфична отпорност струјању (Rs)* ваздуха, за сваки испитивани узорак.

Да би се избегла зависност отпорности струјању ваздуха од дебљине узорка врши се одређивање *подужне (специфичне) отпорности (r)* струјању ваздуха.

Избор емпиријских модела се врши најчешће на основу два критериума: врсте материјала и вредности подужне отпорности струјању. У литератури су најчешће доступни модели за влакнасте и пенасте порозне материјале. Ређи је случај да су на овај начин истраживане акустичке особине зрнастих (гранулисаних) материјала. За случај да не постоји модел за материјал који се истражује, потребно је усвојити модел за материјал који по својим структурним карактеристикама највише одговара испитиваном материјалу. Такође је важно пронаћи моделе који су формиран за опсег вредности подужне отпорности струјању као што је измерено код испитиваног материјала. База емпиријских модела је

отворена у смислу да се увек може проширити формирањем новог модела за одређену врсту материјала.

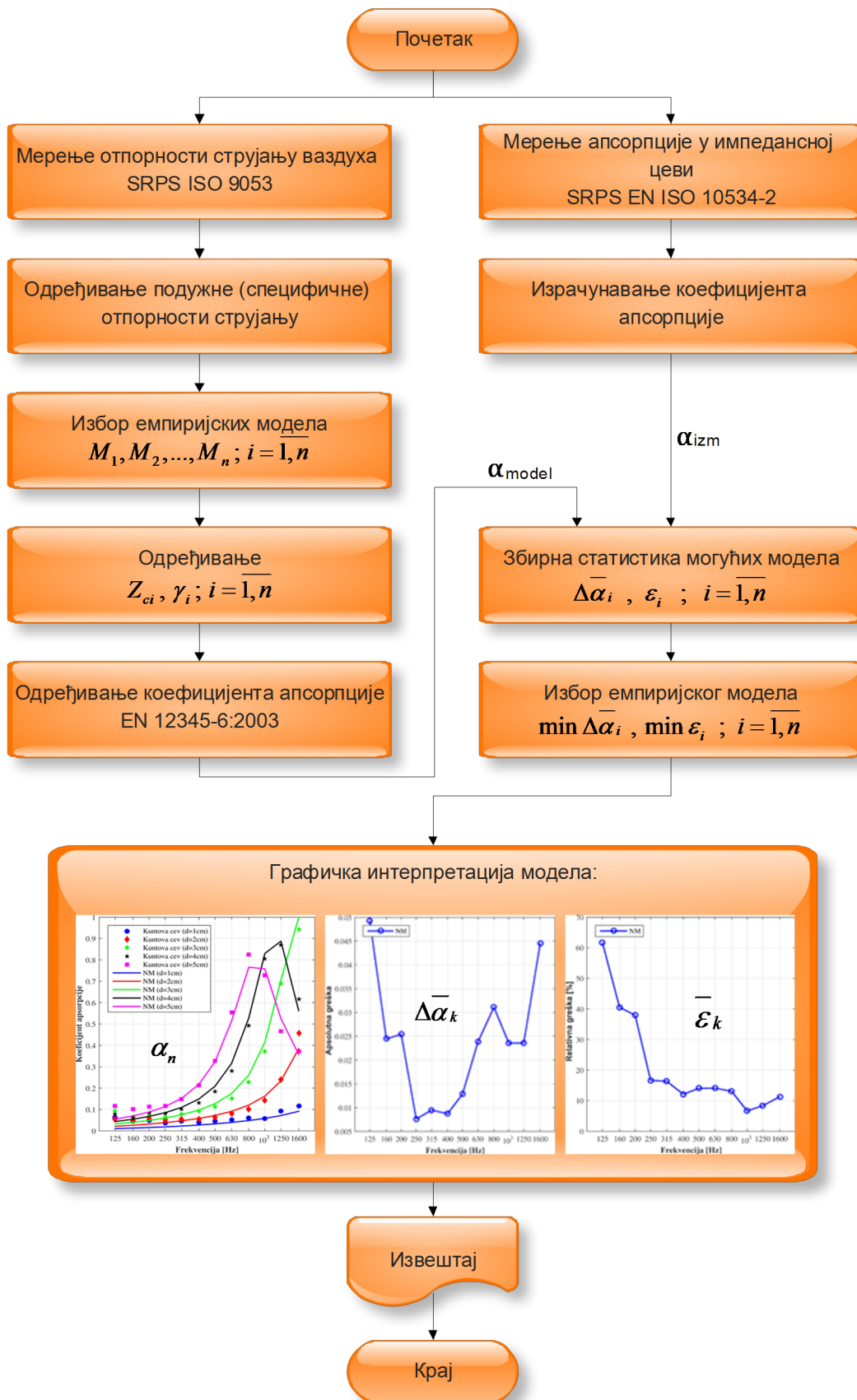
На основу одабраног емпиријског модела врши се одређивање карактеристичне импедансе Z_c и коефицијента простирања γ , као комплексне величине у функцији односа фреквенције и подужне отпорности струјању ваздуха.

Одређивање коефицијента апсорпције порозног материјала се може извршити на више различитих начина. Стандард EN 12354-6:2003 препоручује прорачун дифузног коефицијента апсорпције порозних материјала. Стандард дефинише процедуру одређивања коефицијента апсорпције за влакнасте материјале и за пенасте материјале са отвореним ћелијама.

Недостатак емпиријских модела се огледа у чињеници да се овако утврђени коефицијент апсорпције мора упоредити са вредностима које су добијене у импедансној цеви или у реверберационој комори.

Избор емпиријског модела се врши на основу вредности минималне апсолутне грешке и минималне релативне грешке. Избор модела је могуће извршити на два начина. Први начин је налажење минималних вредности средње апсолутне и средње релативне грешке и без обзира на њихову вредност одабрати модел са минималним вредностима. Други начин је усвајање граничних вредности за средњу вредност апсолутне и релативне грешке. За случај да се такав модел не пронађе приступа се формирању новог модела.

За овако одабран модел даје се графичка интерпретација коефицијента апсорпције, апсолутне и релативне грешке и штампа се потребан извештај.



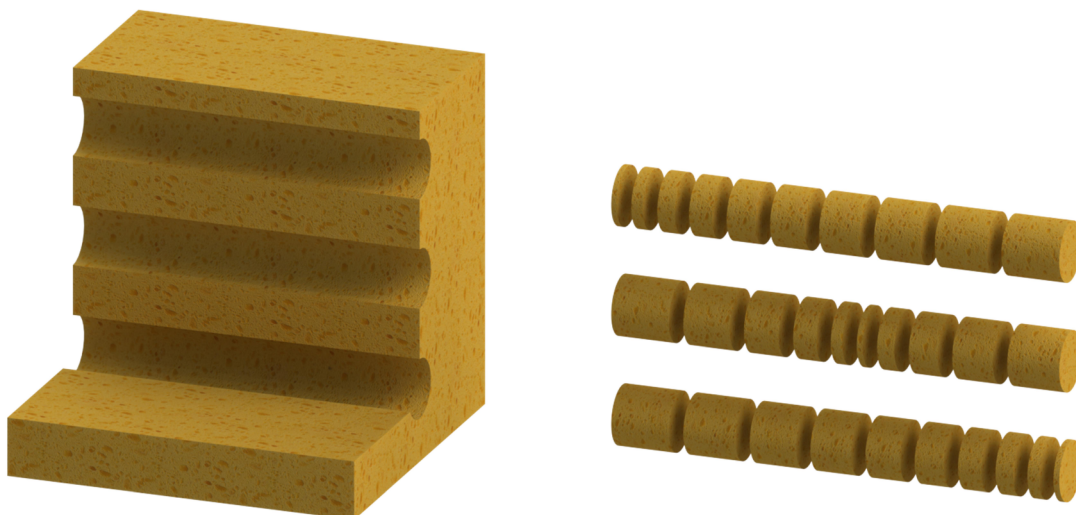
Слика 3.16. Алгоритам за добијање детерминистичког емпиријског модела на основу подужне отпорности струјању

3.4. Апсорпциона својства пенастих материјала

3.4.1 Припрема узорка и план експеримената

Полимерне пене које су примарно направљене од полиола, изоцијаната и воде су познате као флексибилне полиуретанске (ПУ) пене. У ову групу се најчешће сврставају пене које имају густину мању од 100 kg/m^3 . У конвенционалној употреби су најчешће пене густине од 12 до 40 kg/m^3 [13]. У овом раду истраживане су пене густине од 20 до 40 kg/m^3 , које су добијене континуалним поступком производње.

ПУ пене од којих су исечени узорци за испитивање су узете од привредног друштва „Вапекс д.о.о.“ - Чачак. За истраживање су припремљени узорци од 11 врста ПУ пена. Из блокова пене ширине 2 m, просечне висине 1m и дужине 1 m, за сваку врсту ПУ пене, по читавој дужини исечено је по три ваљка пречника 102 mm. Исецање је извршено помоћу компјутерски управљане машине, тако да је постигнут веома добар квалитет обрађене површине и висока тачност облика (кржност). Из ваљака су исечени узорци дебљине: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, и 100 mm. На тај начин су обезбеђена по три узорка за сваку од 10 различитих дебљина материјала (слика 3.17.).



Слика 3.17. Поступак исецања узорка из блока полиуретанске пене

Све пене су са отвореном ћелијском структуром. Скуп испитиваних ПУ пена обухвата 4 типа: стандардне пене (**S**), пене повећане еластичности (**ES**), пене повећане тврдоће (**T**) и високо еластичне пене (**HR**) [115]. Испитиване пене се уобичајено користе у индустрији намештаја. Њихова звучна апсорпција до сада није испитивана.

Основне механичке карактеристике за 9 група у оквиру ова 4 типа испитиваних полиуретанских пена су приказане у табели 3.7.

Табела 3.7. Вредности механичких карактеристика 4 групе испитиваних ПУ пена [115]

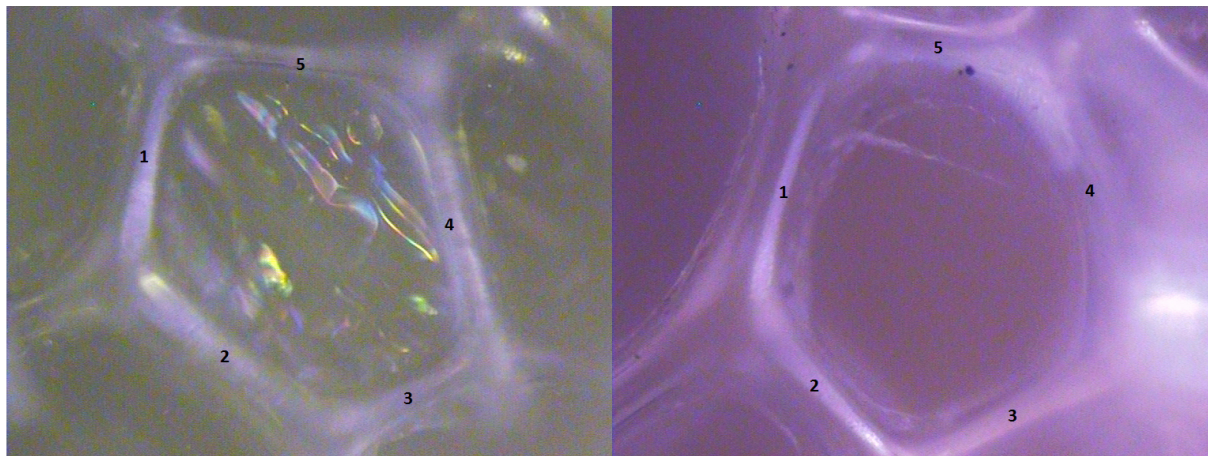
Тип ПУ пене	Ознака групе узорака	Густина [kg/m ³]	Тврдоћа (CLD) [кПа]	Затезна чврстоћа [кПа]	Издужење при кидању [%]	Трајна деформација [%]	Еластичност [%]
		ISO 745	ISO 3386	ISO 1798	ISO 1798	ISO 1856	ISO 8307
Стандардне пене (S)	S_1	24.4	4.0	156	148	3.2	42
	S_2	29.0	4.1	172	185	2.6	47
Пене повећане еластичности (ES)	ES	31.5	3.9	154	187	2.0	54
Пене повећане тврдоће (T)	T_1	19.3	3.9	135	114	5.2	35
	T_2	34.4	4.8	184	159	2.2	49
Високо еластичне пене (HR)	HR_1	25.8	1.4	159	85	2.9	51
	HR_2	35.0	3.9	168	95	2.0	54
	HR_3	37.0	4.6	161	82	2.1	50
	HR_4	39.4	3.5	165	100	3.2	50

Као што наводи из литературе показују, врло је тешко направити систематско проучавање пена са становишта апсорпционих карактеристика. У циљу упоредивости резултата мерења, за ПУ пене од којих су израђени узорци, поред физичких и механичких карактеристика које су од значаја за макроскопска акустичка својства, дате су и друге механичке карактеристике које су одређене према одговарајућим стандардима.



Слика 3.18. Узорци од полиуретанске пене

Мека полиуретанска пена са отвореним ћелијама се може произвести на два начина: директно у технолошком процесу и пресовањем блокова пене са затвореним ћелијама под високим притиском. Пене S, ES и T су произведене као пене са отвореним ћелијама. HR пене су изливене са затвореном ћелијском структуром а након завршетка процеса умрежавања, блокови HR пена се пресују, тако да под дејством силе притиска ћелијске мембране пуцају и након тога, ове пене се могу сматрати пенама са отвореним ћелијама.



Слика 3.19. Изглед ћелијске мембране код тврде ПУ пене

Слика 3.20. Отворена ћелијска структура високоеластичних ПУ пена

Прегледом снимака начињених помоћу микроскопа и софтверског увећања установљено је да 7 врста полиуретанских пена имају отворену ћелијску структуру као што је приказано на сликама 3.19. и 3.20. На једној врсти тврде пене у ћелијској структури је уочено присуство ћелијских мембрана, што ће се у даљим истраживањима битно одразити на вредност отпорности струјању. Ћелијске структуре су најчешће облика четвороугла, петоугла и шестоугла. На основу 420 мерења за 210 узорака ПУ пена са отвореном ћелијском структуром утврђена је средња вредност пречника влакна оквира ћелијске структуре од 19,04 μm . За ПУ пене повећане еластичности (HR) средњи пречник влакна износи 21,33 μm .

План експеримената је обухватио 11 врста ПУ пена дебљине од 10 mm до 100 mm са кораком од по 10 mm. Типови испитиваних пена су:

- Стандардне VAPEN S пене:
 - S 2026
 - S 2535
 - S 3038
- VAPEN T пене – пене повећане тврдоће:
 - T 2036
 - T 3545
- VAPEN ES пене – пене повећане еластичности:
 - ES 3234
- VAPEN HR високо еластичне пене:
 - HR 2514
 - HR 3536
 - HR 3744
 - HR 4035
- VAPEN memory пена:
 - PVE 4016

Ознаке ПУ пена су узете из каталога произвођача. Словна ознака представља тип пене, прва два броја представљају густину пене према стандарду ISO 845 у kg/m^3 а друга два броја тврдоћу према стандарду ISO 3386 у кРа помножену са 10.

3.4.2 Резултати мерења

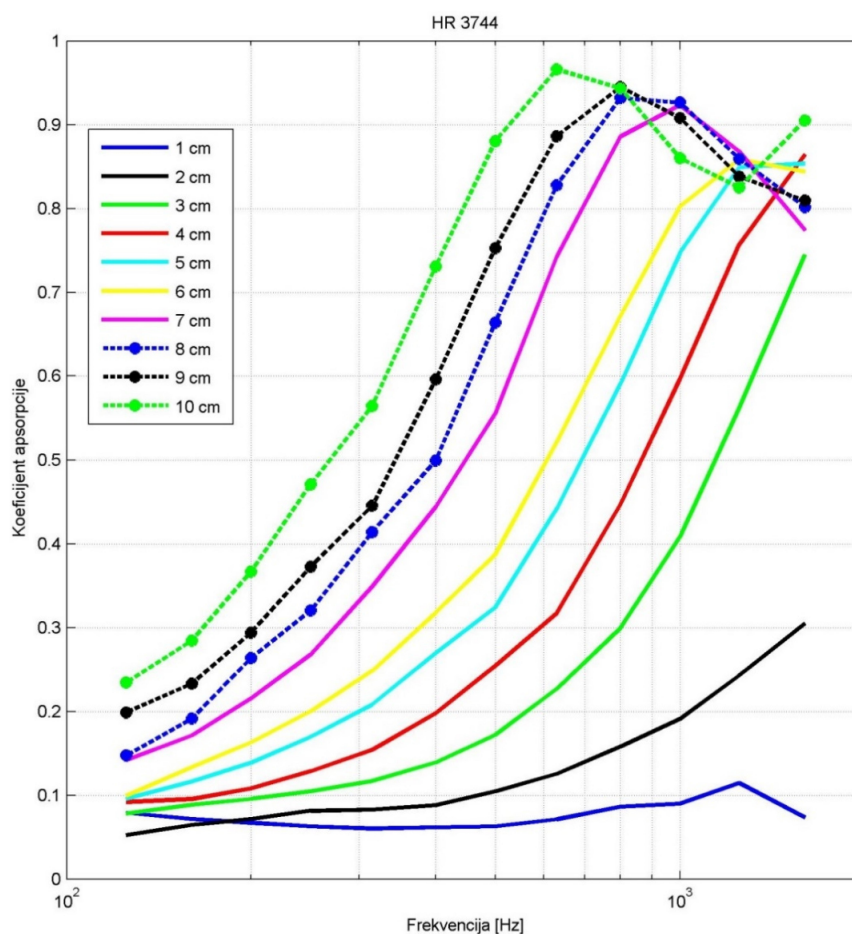
Мерење коефицијента апсорпције звука полиуретанских пена мале густине је извршено у импедансној цеви - Метода трансфер функције, према стандарду EN ISO 10534-2:2001 у Лабораторији за акустику Електротехничког факултета у Београду. Мерење је извршено за терцне фреквенције од 125 Hz до 1600 Hz на узорцима дебљине од 10 mm до 100 mm.

Пена HR 3744

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.8. и на слици 3.21.

Табела 3.8. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3744

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.078945	0.052273	0.078038	0.091768	0.095615	0.099378	0.14166	0.14739	0.1988	0.23425
160	0.07159	0.064579	0.088787	0.095501	0.1163	0.13339	0.17142	0.1915	0.23306	0.28444
200	0.067147	0.071539	0.095544	0.1082	0.13866	0.16303	0.21552	0.26369	0.29383	0.36679
250	0.062784	0.081199	0.10469	0.12844	0.16959	0.20025	0.26771	0.3203	0.37254	0.47083
315	0.060061	0.082818	0.11674	0.15397	0.20809	0.24824	0.34862	0.41372	0.44536	0.56428
400	0.061533	0.088451	0.13883	0.19781	0.26972	0.31781	0.44411	0.49926	0.59604	0.73095
500	0.062915	0.10462	0.17202	0.25435	0.324	0.38727	0.55493	0.66397	0.75279	0.88024
630	0.07125	0.12535	0.22696	0.3171	0.44179	0.52143	0.74253	0.82768	0.8864	0.96609
800	0.086209	0.15796	0.29957	0.44704	0.59085	0.67178	0.88578	0.93204	0.94498	0.9434
1000	0.089769	0.19083	0.40787	0.5967	0.74673	0.80233	0.92326	0.92662	0.90819	0.8601
1250	0.1146	0.24294	0.56195	0.75699	0.84916	0.8587	0.86797	0.85938	0.83806	0.82517
1600	0.073466	0.30496	0.74481	0.86448	0.85371	0.84389	0.77397	0.80167	0.80959	0.90507
α_w	0.05	0.15	0.25	0.3(M)	0.35(M)	0.4(M)	0.55(M)	0.6(M)	0.65	0.75



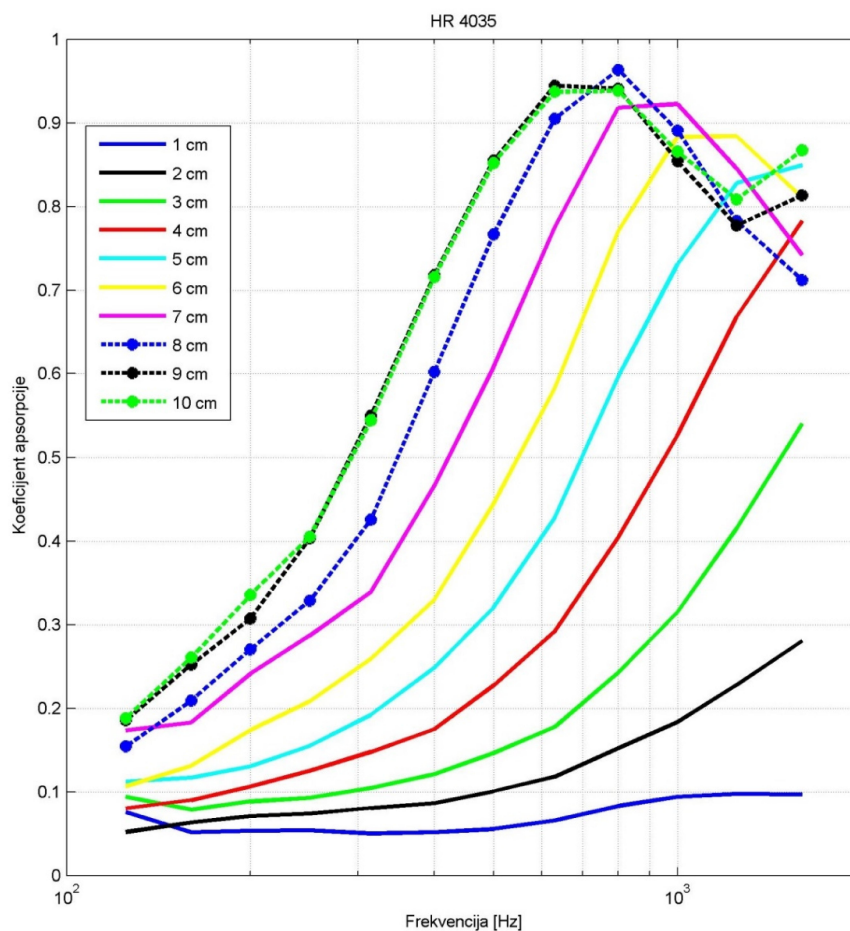
Слика 3.21. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3744

Пена HR 4035

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.9. и на слици 3.22.

Табела 3.9. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 4035

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.075525	0.051958	0.094329	0.080282	0.11217	0.1066	0.17345	0.15459	0.18539	0.18809
160	0.051607	0.063524	0.078651	0.090136	0.11695	0.13126	0.18292	0.20915	0.25215	0.26078
200	0.053467	0.071035	0.088319	0.10639	0.13032	0.17383	0.24146	0.27044	0.30713	0.33542
250	0.054113	0.073932	0.092749	0.12528	0.15492	0.20823	0.28685	0.32857	0.40312	0.40514
315	0.050142	0.080859	0.10467	0.14777	0.19226	0.25932	0.33911	0.4255	0.54983	0.54427
400	0.051483	0.08626	0.12093	0.17494	0.24845	0.32983	0.46597	0.60209	0.71794	0.71539
500	0.055384	0.10068	0.14631	0.22706	0.32013	0.44458	0.60826	0.76662	0.85484	0.85201
630	0.065693	0.11817	0.1778	0.29213	0.42799	0.58291	0.77532	0.90482	0.94467	0.93714
800	0.083141	0.15197	0.2426	0.40418	0.59659	0.77047	0.91806	0.96347	0.94083	0.93836
1000	0.094076	0.18336	0.31486	0.52705	0.73067	0.88322	0.92239	0.8906	0.85413	0.86571
1250	0.097593	0.22792	0.41521	0.6681	0.82782	0.88387	0.84536	0.78278	0.77722	0.80831
1600	0.096801	0.28034	0.54006	0.78279	0.84895	0.81047	0.74235	0.7118	0.81348	0.86728
α_w	0.05	0.15	0.2	0.3	0.35(M)	0.45(M)	0.55(M)	0.6(M)	0.7	0.7



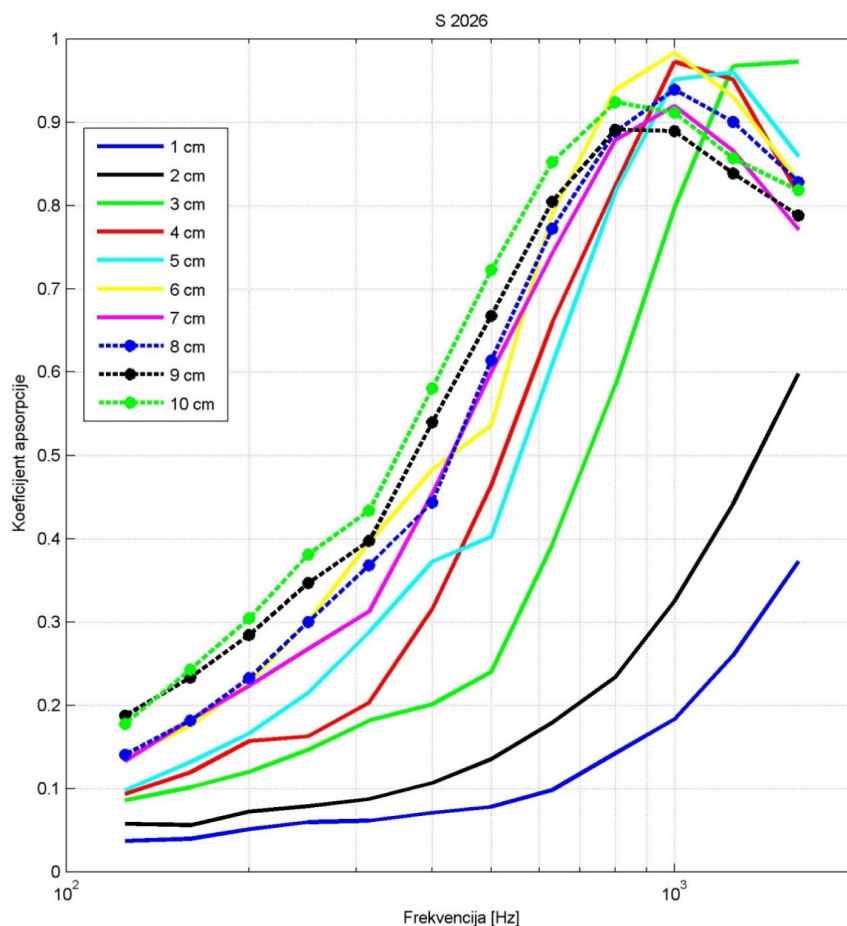
Слика 3.22. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 4035

Пена S 2026

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.10. и на слици 3.23.

Табела 3.10. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2026

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.036991	0.057472	0.08558	0.093238	0.097797	0.13763	0.13289	0.14045	0.1875	0.17739
160	0.039551	0.056107	0.10124	0.11924	0.13162	0.17513	0.18238	0.18153	0.23299	0.24268
200	0.050893	0.072257	0.1199	0.1569	0.16612	0.22678	0.22326	0.2325	0.28434	0.30431
250	0.059501	0.078813	0.14651	0.1625	0.21476	0.30099	0.26758	0.29984	0.34668	0.38082
315	0.061362	0.087208	0.18138	0.20331	0.28747	0.39518	0.31242	0.36809	0.39735	0.43363
400	0.070606	0.10659	0.20111	0.31532	0.37239	0.48288	0.45403	0.44326	0.53945	0.58031
500	0.0779	0.13522	0.23986	0.46409	0.40203	0.53629	0.59972	0.61396	0.66753	0.72241
630	0.098027	0.17884	0.39295	0.65938	0.60994	0.78939	0.74234	0.77201	0.80441	0.8521
800	0.14214	0.23353	0.58454	0.82406	0.81621	0.9387	0.87855	0.88864	0.89093	0.92397
1000	0.18306	0.32463	0.79622	0.97248	0.95078	0.98299	0.91964	0.93891	0.88919	0.91132
1250	0.25998	0.44195	0.96754	0.95086	0.95978	0.93019	0.86551	0.90024	0.8383	0.8565
1600	0.37236	0.59794	0.97261	0.81386	0.85916	0.8296	0.77115	0.82811	0.78784	0.81831
α_w	0.15	0.2	0.3(M)	0.45(M)	0.45(M)	0.6(M)	0.55(M)	0.55(M)	0.6(M)	0.65



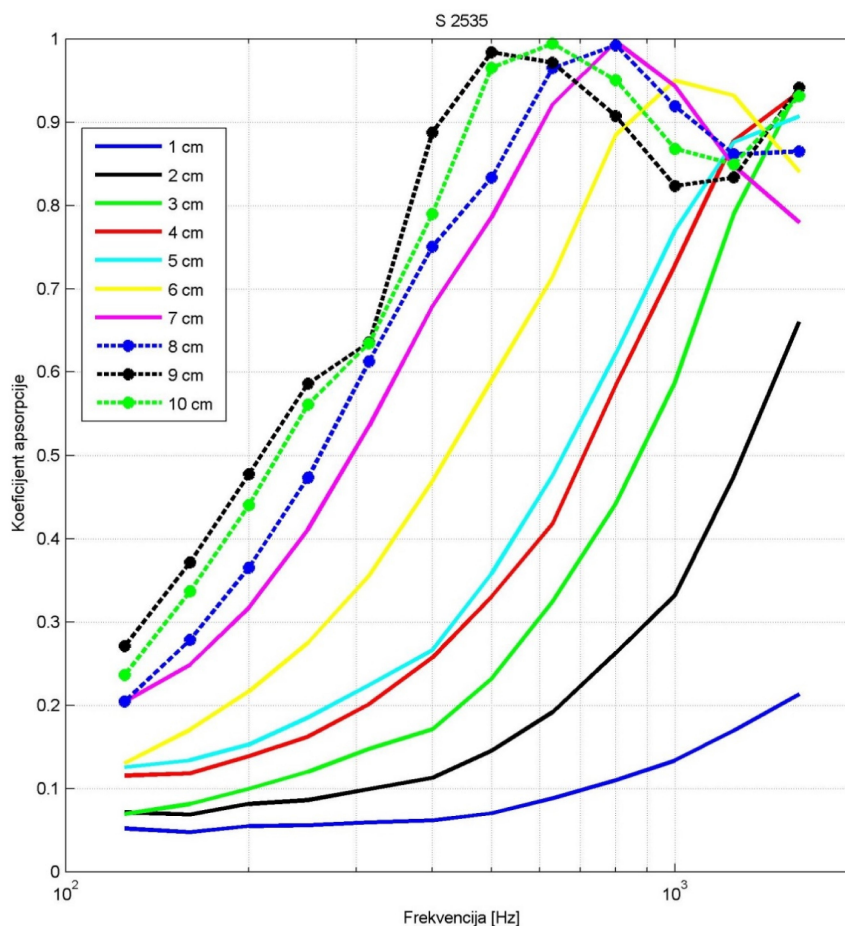
Слика 3.23. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2026

Пена S 2535

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.11. и на слици 3.24.

Табела 3.11. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2535

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.051838	0.071343	0.069233	0.11534	0.12554	0.13017	0.20451	0.20428	0.27103	0.23631
160	0.047356	0.068574	0.081428	0.11805	0.13374	0.17053	0.24863	0.27826	0.37142	0.33666
200	0.054977	0.08146	0.0995	0.1386	0.15279	0.21654	0.31735	0.36527	0.47706	0.44012
250	0.055759	0.086001	0.12003	0.16217	0.18509	0.27497	0.41151	0.47316	0.58595	0.56115
315	0.059219	0.099308	0.14766	0.20141	0.22428	0.35551	0.53553	0.61277	0.63559	0.63448
400	0.06157	0.11274	0.17115	0.25728	0.26599	0.46909	0.67882	0.75032	0.88763	0.78995
500	0.07028	0.14512	0.23154	0.33022	0.35765	0.59031	0.78563	0.8334	0.98411	0.96504
630	0.088069	0.19163	0.32412	0.4178	0.47585	0.71406	0.92102	0.96495	0.9713	0.99422
800	0.10996	0.26301	0.44196	0.58405	0.62189	0.88489	0.99653	0.99235	0.90706	0.95057
1000	0.13364	0.33186	0.58763	0.72818	0.76989	0.94995	0.94328	0.9192	0.82324	0.86785
1250	0.16958	0.47446	0.7898	0.87787	0.87595	0.93178	0.84727	0.86135	0.83354	0.84928
1600	0.21322	0.66003	0.94163	0.93628	0.90703	0.84049	0.77952	0.86477	0.94143	0.93127
α_w	0.1	0.2	0.3(M)	0.35(M)	0.35(M)	0.55(M)	0.7	0.75	0.85	0.8



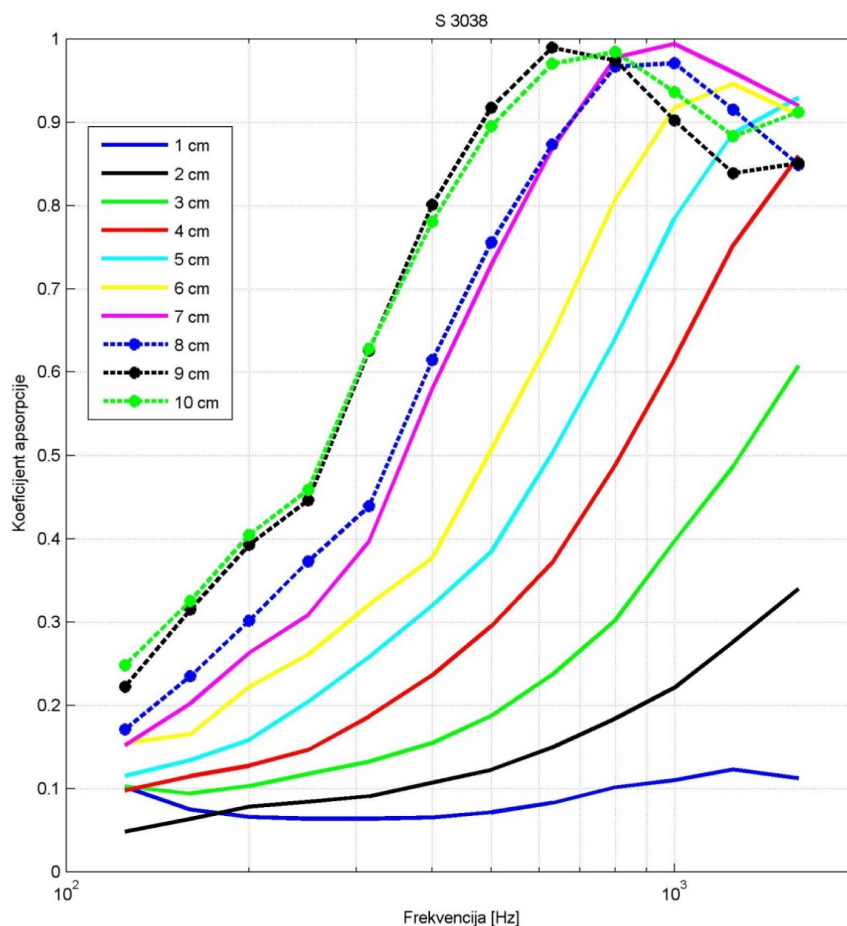
Слика 3.24. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 2535

Пена S 3038

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.12. и на слици 3.25.

Табела 3.12. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 3038

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.10187	0.048078	0.10255	0.0978	0.11513	0.15434	0.15193	0.17067	0.22215	0.24809
160	0.074683	0.063772	0.093617	0.11493	0.13403	0.16491	0.20185	0.23471	0.31479	0.32521
200	0.065768	0.078121	0.10295	0.1273	0.15821	0.22201	0.26265	0.30161	0.39246	0.40461
250	0.063818	0.084031	0.11738	0.14601	0.2041	0.26059	0.3085	0.37259	0.44614	0.45865
315	0.063724	0.090813	0.13215	0.18647	0.25793	0.32061	0.39672	0.43889	0.62547	0.6281
400	0.065193	0.10724	0.15434	0.23613	0.3198	0.37674	0.57998	0.6142	0.80067	0.78052
500	0.071283	0.12257	0.1872	0.29474	0.38432	0.50683	0.7289	0.75553	0.9173	0.89509
630	0.082643	0.14919	0.23663	0.37102	0.50236	0.64412	0.86805	0.87314	0.98953	0.97008
800	0.1012	0.18384	0.30216	0.48838	0.64045	0.80761	0.97745	0.96673	0.97387	0.98424
1000	0.10975	0.2209	0.39663	0.61568	0.78429	0.91692	0.99387	0.9707	0.90229	0.93589
1250	0.12276	0.27615	0.48687	0.75216	0.88652	0.94596	0.95996	0.91492	0.83872	0.88298
1600	0.11235	0.33947	0.60752	0.85923	0.92916	0.90855	0.91948	0.84879	0.85084	0.91195
α_w	0.1	0.2	0.25	0.35(M)	0.4(M)	0.5(M)	0.6(M)	0.65(M)	0.75	0.75



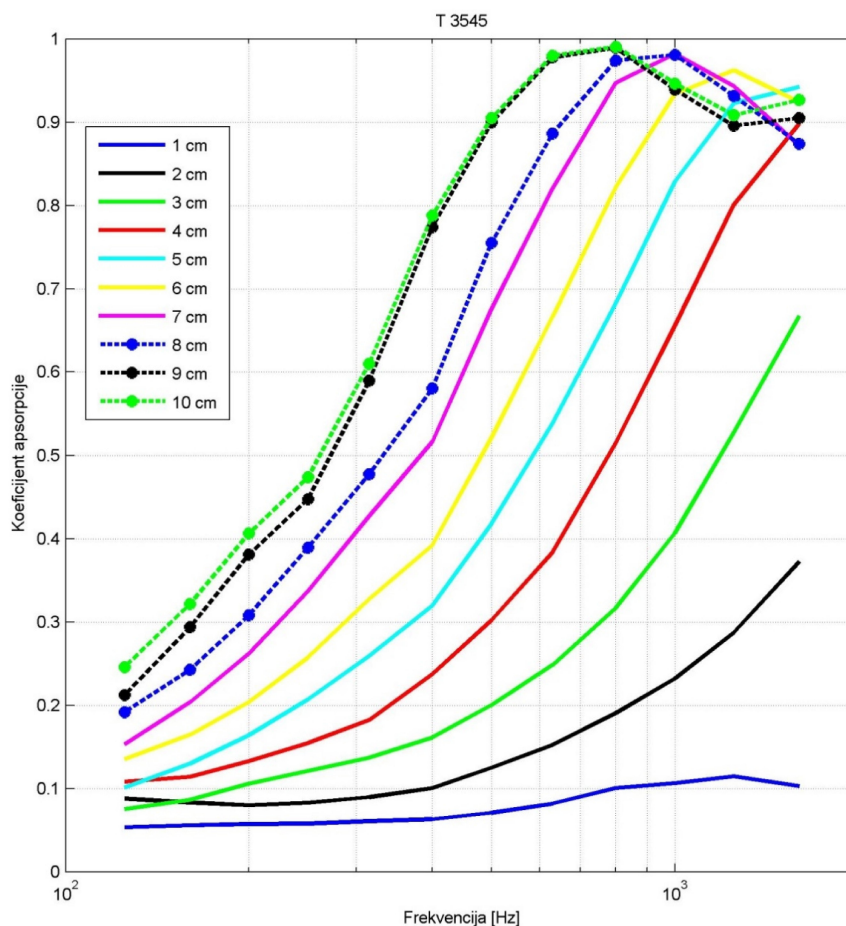
Слика 3.25. Вредности коефицијента апсорпције за пену S 3038

Пена T3545

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.13. и на слици 3.26.

Табела 3.13. Вредности коефицијента апсорпције за пену T 3545

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.053349	0.087772	0.074913	0.10799	0.10126	0.13539	0.15321	0.19175	0.21206	0.24586
160	0.05585	0.083154	0.086012	0.11405	0.13004	0.16442	0.20338	0.24258	0.29356	0.32173
200	0.057274	0.079912	0.10564	0.13263	0.1639	0.20378	0.26216	0.30808	0.38108	0.40618
250	0.057841	0.082876	0.12093	0.1546	0.20705	0.25742	0.33702	0.38927	0.44756	0.47379
315	0.06066	0.089557	0.13711	0.18213	0.25915	0.32737	0.42684	0.47733	0.5896	0.60996
400	0.062981	0.10059	0.16119	0.23746	0.31958	0.39232	0.51615	0.58031	0.77403	0.78789
500	0.070734	0.12497	0.20024	0.30197	0.41819	0.52137	0.6756	0.75527	0.89956	0.90496
630	0.081791	0.1525	0.24811	0.38356	0.53851	0.66652	0.82016	0.88639	0.97779	0.97979
800	0.1004	0.19035	0.31679	0.51505	0.68256	0.82194	0.94732	0.974	0.9892	0.99056
1000	0.10643	0.23206	0.40675	0.6555	0.82864	0.93353	0.982	0.98062	0.93889	0.94646
1250	0.11451	0.28735	0.52798	0.8011	0.9229	0.96227	0.94308	0.93145	0.89562	0.90842
1600	0.10285	0.37254	0.66717	0.898	0.94213	0.92395	0.87125	0.87397	0.90498	0.92668
α_w	0.1	0.2	0.25	0.35(M)	0.4(M)	0.5(M)	0.6(M)	0.65(M)	0.75	0.75



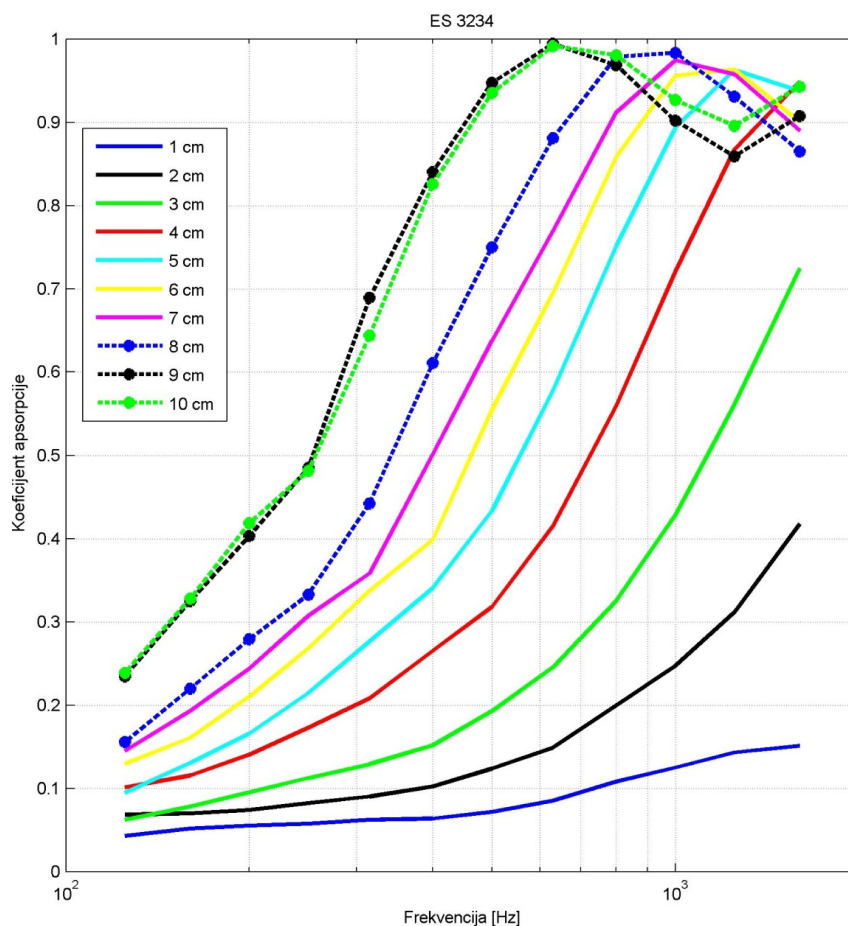
Слика 3.26. Вредности коефицијента апсорпције за пену T3545

Пена ES 3234

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.14. и на слици 3.27.

Табела 3.14. Вредности коефицијента апсорпције за пену ES 3234

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.042722	0.068395	0.06227	0.10095	0.094564	0.12916	0.14494	0.15541	0.23434	0.23875
160	0.051638	0.069763	0.078027	0.11549	0.13066	0.16075	0.19305	0.21985	0.32523	0.3279
200	0.055263	0.073933	0.095097	0.14032	0.16559	0.21003	0.24399	0.27925	0.40297	0.41847
250	0.057598	0.08232	0.11248	0.17292	0.21464	0.26801	0.30731	0.33263	0.48525	0.48126
315	0.062113	0.090084	0.12893	0.2081	0.27665	0.33746	0.35819	0.44213	0.6892	0.64363
400	0.063799	0.10215	0.15171	0.26525	0.3408	0.3985	0.50101	0.6106	0.8401	0.82576
500	0.071665	0.12373	0.19268	0.31787	0.43307	0.55424	0.63761	0.74983	0.94738	0.9352
630	0.0853	0.14864	0.24547	0.41483	0.57756	0.69484	0.76943	0.88087	0.99428	0.99124
800	0.10816	0.19923	0.32546	0.55918	0.75136	0.85827	0.91204	0.97862	0.96843	0.98055
1000	0.12493	0.24722	0.42813	0.72035	0.89331	0.95577	0.9742	0.98342	0.90178	0.92658
1250	0.14298	0.31145	0.5603	0.86713	0.96271	0.96357	0.95737	0.93065	0.85903	0.89575
1600	0.15111	0.41749	0.72432	0.94862	0.93767	0.90008	0.88991	0.86471	0.90758	0.94278
α_w	0.1	0.2	0.25	0.35(M)	0.45(M)	0.5(M)	0.55(M)	0.6(M)	0.8	0.8



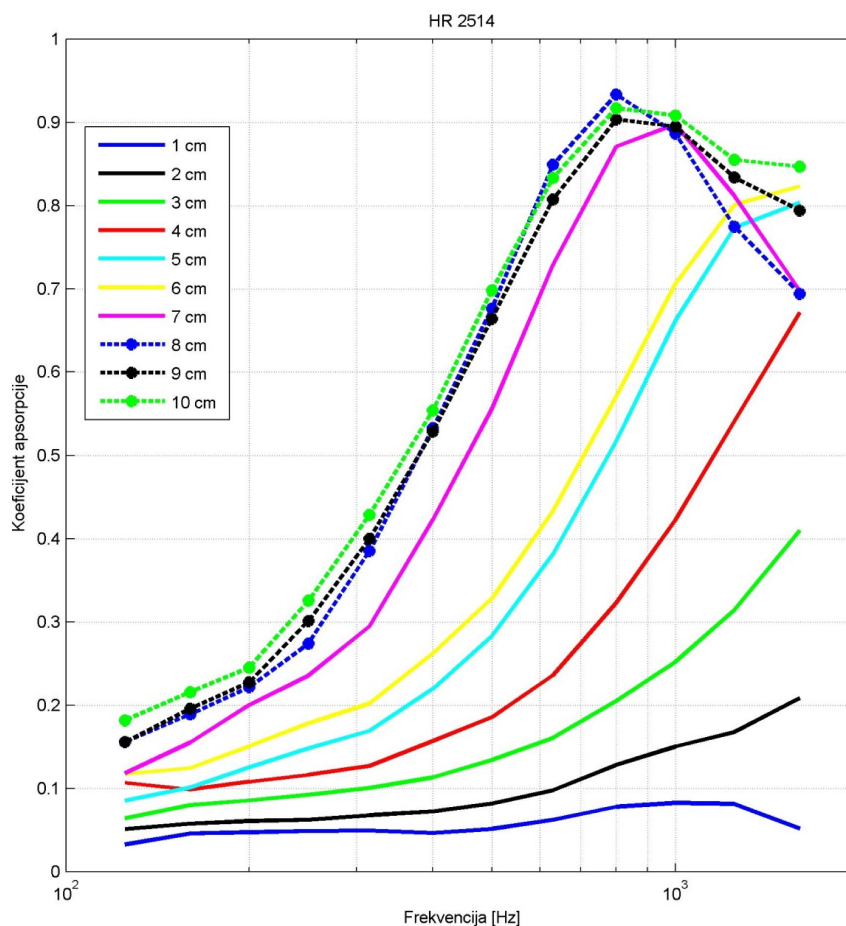
Слика 3.27. Вредности коефицијента апсорпције за пену ES 3234

Пена HR 2514

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.15. и на слици 3.28.

Табела 3.15. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 2514

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.032618	0.051008	0.064169	0.10664	0.085337	0.11716	0.11813	0.15563	0.15531	0.1816
160	0.045682	0.057396	0.079933	0.098442	0.10132	0.12441	0.15504	0.18897	0.19572	0.21554
200	0.047272	0.060877	0.085473	0.10794	0.12503	0.15074	0.20017	0.22162	0.22755	0.24496
250	0.048661	0.062349	0.092352	0.11616	0.14794	0.17821	0.23525	0.27373	0.30094	0.32537
315	0.049264	0.067816	0.1005	0.1268	0.16886	0.2019	0.2946	0.38528	0.39963	0.42836
400	0.046353	0.072105	0.11301	0.15697	0.21933	0.2621	0.4224	0.53247	0.52825	0.55353
500	0.051397	0.081682	0.13388	0.18532	0.28294	0.32816	0.55576	0.67622	0.6641	0.698
630	0.062105	0.097808	0.16061	0.23568	0.3812	0.43302	0.72861	0.84895	0.80731	0.8332
800	0.077916	0.12803	0.20479	0.3228	0.51691	0.57079	0.87086	0.93327	0.90339	0.917
1000	0.082527	0.15015	0.25192	0.42226	0.66158	0.70571	0.89761	0.88642	0.89482	0.90823
1250	0.081255	0.16752	0.31397	0.54113	0.77352	0.80071	0.81158	0.77457	0.83368	0.85485
1600	0.051712	0.20843	0.4097	0.67121	0.80356	0.82296	0.69735	0.69394	0.79383	0.84666
α_w	0.05	0.1	0.2	0.25	0.3(M)	0.35(M)	0.5(M)	0.55(M)	0.6(M)	0.6(M)



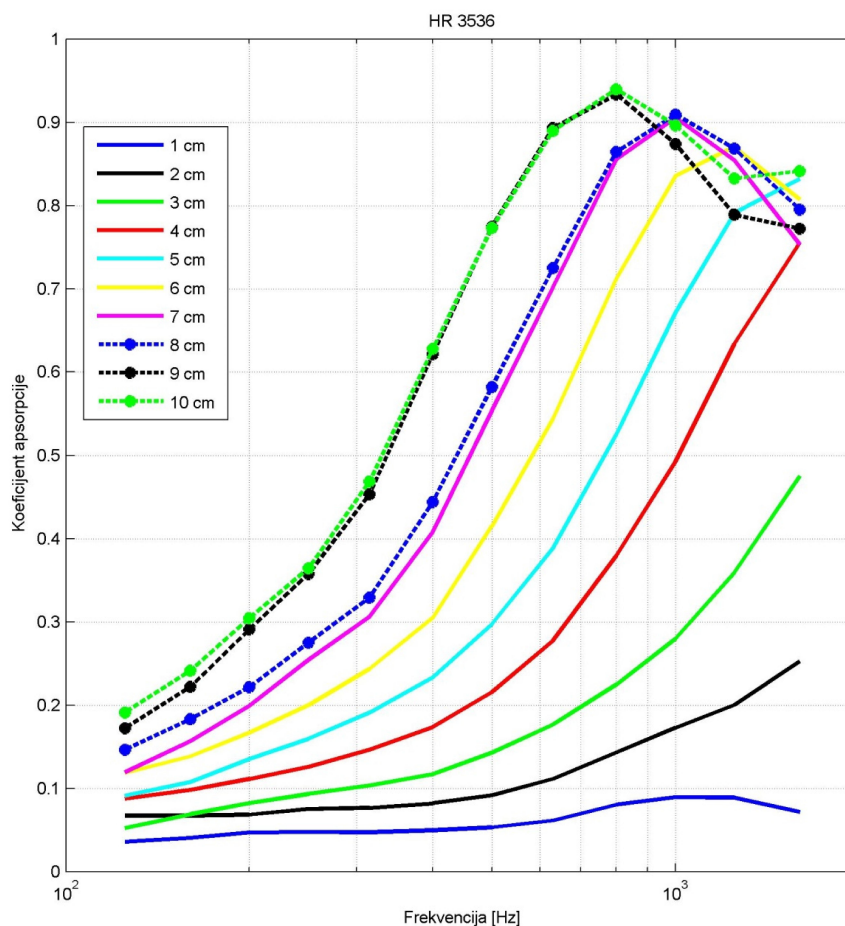
Слика 3.28. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 2514

Пена HR 3536

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.16. и на слици 3.29.

Табела 3.16. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3536

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.035701	0.067183	0.052577	0.087346	0.09103	0.11844	0.11938	0.1463	0.17229	0.19115
160	0.040466	0.067123	0.069033	0.098117	0.10757	0.13843	0.1566	0.1832	0.2218	0.24122
200	0.04683	0.068287	0.082316	0.11134	0.13522	0.16703	0.1989	0.22159	0.29114	0.30465
250	0.047529	0.075201	0.09314	0.12577	0.15951	0.19987	0.25432	0.27472	0.35759	0.36413
315	0.047238	0.076519	0.10351	0.14645	0.19084	0.24341	0.30592	0.32889	0.45305	0.46855
400	0.049656	0.081817	0.11679	0.1736	0.23351	0.30465	0.40781	0.44391	0.62123	0.62771
500	0.053055	0.091683	0.14274	0.2155	0.29707	0.41493	0.55354	0.58187	0.77453	0.77319
630	0.061229	0.1112	0.17666	0.27748	0.3884	0.54382	0.70154	0.72476	0.89295	0.88947
800	0.080121	0.14309	0.22454	0.37934	0.52478	0.71174	0.85557	0.86437	0.9335	0.9395
1000	0.089352	0.1726	0.27965	0.49216	0.67117	0.83547	0.90547	0.90915	0.87409	0.89625
1250	0.088863	0.20006	0.35894	0.63371	0.79093	0.8704	0.85418	0.86824	0.78904	0.8324
1600	0.07157	0.25219	0.47523	0.75524	0.83205	0.80728	0.7534	0.79511	0.77231	0.84126
α_w	0.05	0.15	0.2	0.3	0.35(M)	0.4(M)	0.5(M)	0.55(M)	0.65	0.65



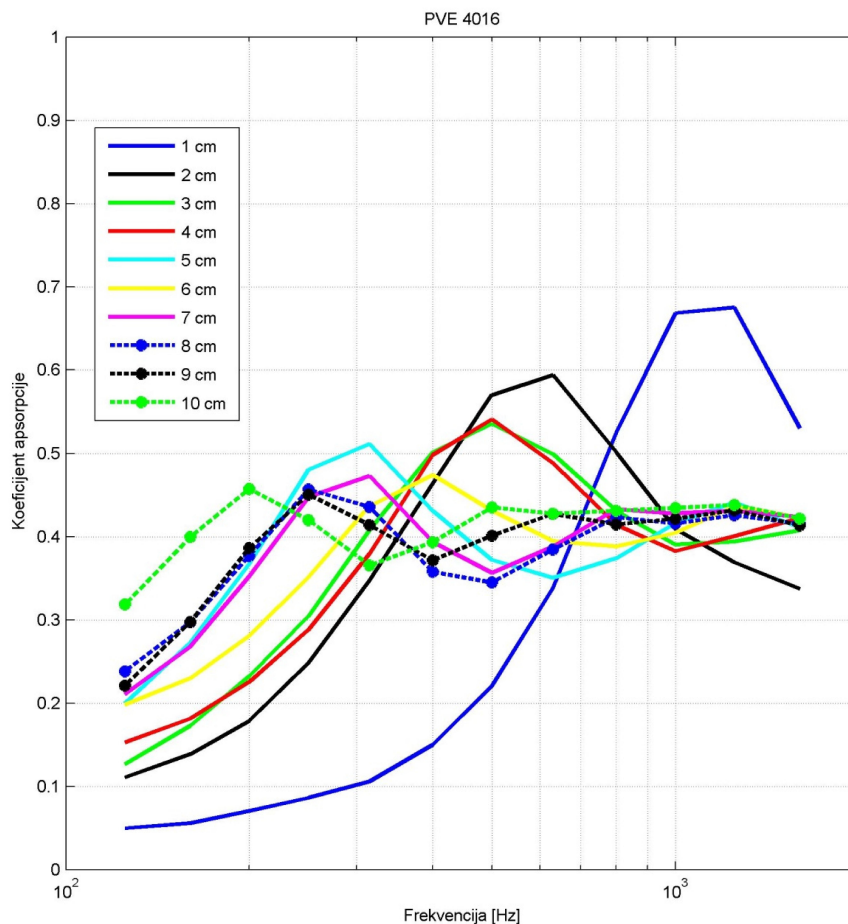
Слика 3.29. Вредности коефицијента апсорпције за пену HR 3536

Пена PVE 4016

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.17. и на слици 3.30.

Табела 3.17. Вредности коефицијента апсорпције за пену PVE 4016

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.049702	0.11083	0.1267	0.15305	0.1996	0.19784	0.21085	0.2382	0.22073	0.31838
160	0.05579	0.13868	0.17279	0.18136	0.2725	0.22984	0.26799	0.29726	0.2975	0.39948
200	0.070353	0.17855	0.23263	0.22554	0.36725	0.28082	0.3523	0.37703	0.3864	0.45723
250	0.086134	0.24826	0.30428	0.28801	0.48008	0.35096	0.44739	0.45648	0.45054	0.41992
315	0.10583	0.34739	0.40762	0.37914	0.51118	0.43675	0.47281	0.4355	0.41408	0.36534
400	0.14978	0.4637	0.5014	0.4982	0.43065	0.474	0.39338	0.35766	0.37139	0.39349
500	0.22049	0.57009	0.53539	0.54085	0.37177	0.43112	0.35628	0.3449	0.40089	0.43502
630	0.33818	0.59396	0.49899	0.48816	0.35041	0.39452	0.38796	0.38448	0.42726	0.42757
800	0.52474	0.50143	0.43094	0.41386	0.37386	0.38795	0.43309	0.42318	0.41459	0.43111
1000	0.66825	0.40938	0.39037	0.38242	0.41619	0.40434	0.42774	0.41576	0.42125	0.43435
1250	0.67502	0.36896	0.39407	0.40049	0.44091	0.43606	0.43115	0.42578	0.43159	0.4382
1600	0.53033	0.3373	0.40768	0.42227	0.41073	0.42258	0.42328	0.41475	0.41333	0.42148
α_w	0.25(M)	0.45	0.5	0.45	0.4(L)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4



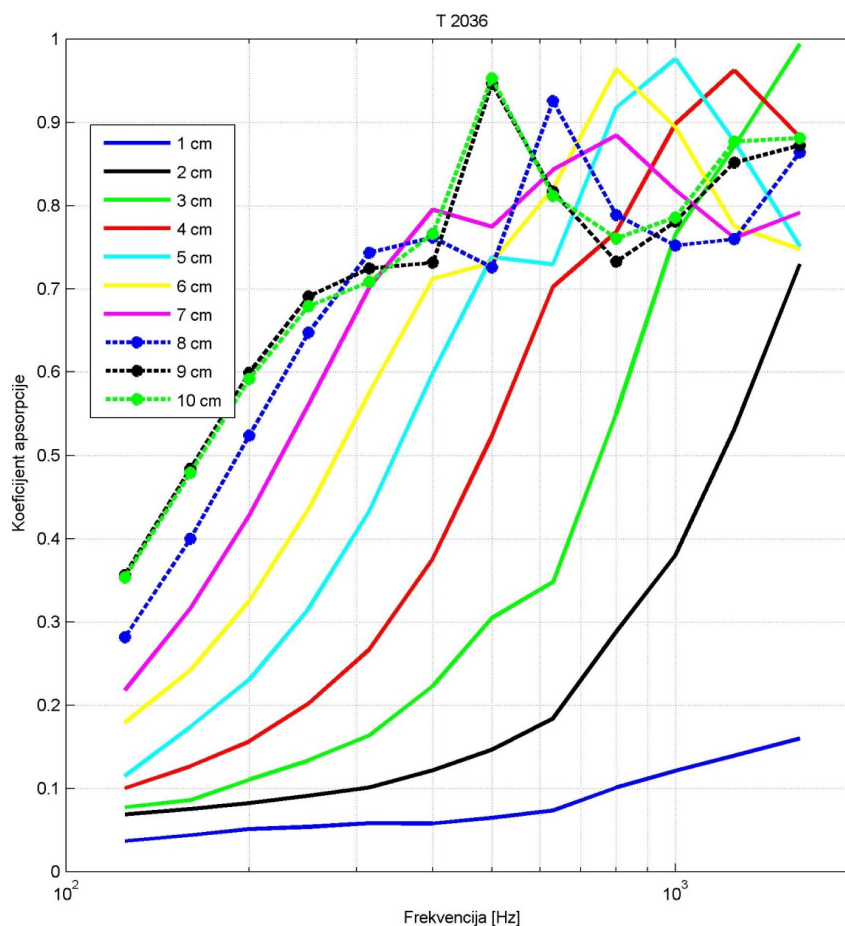
Слика 3.30. Вредности коефицијента апсорпције за пену PVE 4016

Пена Т 2036

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.18. и на слици 3.31.

Табела 3.18. Вредности коефицијента апсорпције за пену Т 2036

f_c (Hz)	Дебљина материјала (cm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125	0.036703	0.068652	0.07727	0.10027	0.11483	0.17876	0.21821	0.28167	0.35607	0.35347
160	0.043756	0.075215	0.085669	0.12653	0.17398	0.24183	0.316	0.39987	0.48407	0.47888
200	0.051134	0.082329	0.11022	0.15629	0.23064	0.32511	0.42772	0.52372	0.59919	0.5917
250	0.053657	0.091071	0.13361	0.20167	0.31539	0.43472	0.5606	0.64743	0.69071	0.67903
315	0.058022	0.10079	0.16363	0.26735	0.43352	0.57579	0.70239	0.7434	0.72462	0.70847
400	0.057779	0.1217	0.22286	0.37566	0.59855	0.71181	0.79502	0.76161	0.7312	0.76615
500	0.064549	0.14639	0.30468	0.52317	0.73807	0.73166	0.77424	0.72579	0.94615	0.95275
630	0.073433	0.18399	0.34779	0.70242	0.72932	0.82029	0.84296	0.92533	0.81702	0.81168
800	0.10085	0.28816	0.55017	0.76848	0.91759	0.96362	0.8842	0.78868	0.73252	0.76056
1000	0.12079	0.37997	0.76516	0.89794	0.97609	0.89381	0.81863	0.75187	0.78074	0.78573
1250	0.13917	0.53116	0.87087	0.96244	0.87671	0.77513	0.76101	0.75969	0.85161	0.87692
1600	0.15978	0.72944	0.99357	0.88244	0.75097	0.74775	0.79131	0.86377	0.87224	0.88117
α_w	0.1	0.2	0.3(M)	0.5(M)	0.6(M)	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8



Слика 3.31. Вредности коефицијента апсорпције за пену Т 2036

3.4.3 Обрада и анализа експерименталних резултата

а) Стохастички емпиријски модели

На основу обрађених података у софтверском пакету *Design Expert* добијени су математички модели зависности коефицијента апсорпције од фреквенције и дебљине материјала. Добијени модели су сигнификантни и доказују да је зависност коефицијента апсорпције испитиваних ПУ пена скоро функционална. Параметри на основу којих је оцењена адекватност математичких модела:

- Коефицијент варијације (Coefficient of Variation) – C.V.
- Prediction Residual Sum of Squares Statistic – PRESS
- Коефицијент детерминације (R-Squared) – R^2
- Кориговани коефицијент детерминације (Adjusted R-Squared) – R_{adj}^2
- Предвиђени коефицијент детерминације (*Predicted R-Squared*)
- Одговарајућа прецизност (Adequate Precision) и др.

имају веома високе вредности (табела 3.19.) те се може закључити да добијени математички модели имају висок ниво поверења (преко 99%).

Све пене осим меморијске пене PVE 4016 се понашају слично. На нижим и средњим фреквенцијама коефицијент апсорпције расте са повећањем дебљине материјала а на вишим фреквенцијама повећање дебљине изнад 50 mm има супротан ефекат и умањује вредност коефицијента апсорпције. То наводи на закључак да је само за ниже и средње фреквенције оправдано користити ПУ пене дебље од 50 mm. Да се не би приказивале графичке зависности за сваку пену појединачно, на сликама 3.32. и 3.33. су приказани просторни и контурни дијаграм промене жељене вредности (максимална вредност коефицијента апсорпције) са дебљином материјала по терцама.

Табела 3.19. Збирни преглед математичких модела ПУ пена

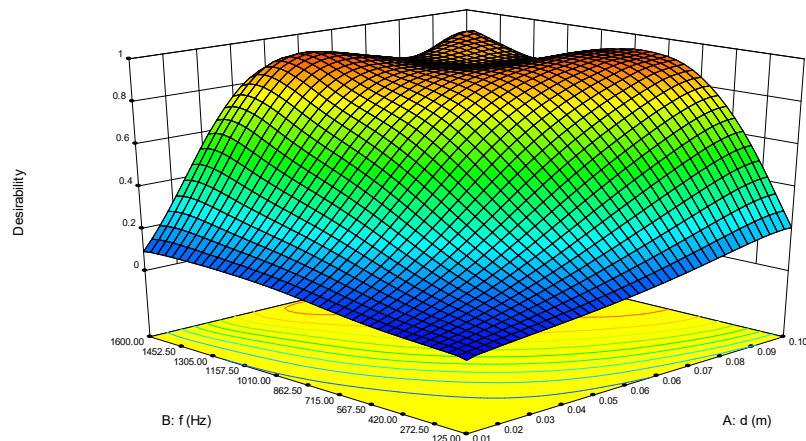
ПУ пена	МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ	Вредност статистичких параметара за оцену модела					
		C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
HR 3744	$\text{Ln}(\alpha_{HR3744}) = -1.63817 - 154.21661*d - 2.80518E-003*f + 0.32484*d*f + 6387.80998*d^2 - 1.07210E-006*f^2 - 4.38184*d^2*f - 1.30302E-004*d*f^2 - 1.22214E+005*d^3 + 5.56533E-009*f^3 - 3.67750E-004*d^2*f^2 + 39.08242*d^3*f + 4.12341E-008*d*f^3 + 1.09656E+006*d^4 - 4.31711E-012*f^4 + 4.64308E-003*d^3*f^2 - 158.68298*d^4*f - 3.66516E+006*d^5 + 9.55248E-016*f^5$	6.75	1.17	0.9926	0.9912	0.9882	81.300
HR 4035	$\text{Sqrt}(\alpha_{HR4035}) = +0.029532 + 26.94444*d + 1.10862E-003*f - 0.11431*d*f - 991.14688*d^2 - 2.77721E-006*f^2 + 3.38134*d^2*f + 1.80647E-004*d*f^2 + 16410.71094*d^3 + 3.76267E-009*f^3 - 1.97076E-003*d^2*f^2 - 42.52322*d^3*f - 1.64691E-007*d*f^3 - 1.25436E+005*d^4 - 2.38524E-012*f^4 + 5.04079E-003*d^3*f^2 + 7.84017E-007*d^2*f^3 + 298.10461*d^4*f + 8.00986E-011*d*f^4 + 3.50916E+005*d^5 + 5.47450E-016*f^5 - 1.63922E-010*d^2*f^4 - 883.10499*d^5*f - 1.51260E-014*d*f^5$	2.86	0.9965	0.9965	0.9957	0.9871	102.969
S 2026	$\text{Ln}(\alpha_{S2026}) = -2.91193 - 108.58355*d + 4.19525E-004*f + 0.33677*d*f + 5835.57142*d^2 - 3.62934E-006*f^2 - 6.15432*d^2*f - 1.80082E-004*d*f^2 - 1.11933E+005*d^3 + 7.48379E-009*f^3 + 1.72127E-003*d^2*f^2 + 51.51453*d^3*f + 2.29357E-008*d*f^3 + 9.39219E+005*d^4 - 5.07388E-012*f^4 - 7.50063E-003*d^3*f^2 - 156.03281*d^4*f - 2.90980E+006*d^5 + 1.19487E-015*f^5$	10.23	1.74	0.9863	0.9838	0.9818	70.915
S 2535	$\text{Ln}(\alpha_{S2535}) = -3.31800 + 7.63569*d + 6.06169E-004*f + 0.26953*d*f + 817.77325*d^2 - 1.28754E-005*f^2 - 0.57559*d^2*f - 2.55283E-004*d*f^2 - 73684.41845*d^3 + 3.88676E-008*f^3 - 1.79771E-003*d^2*f^2 - 20.06620*d^3*f + 1.80161E-007*d*f^3 + 1.85161E+006*d^4 - 4.68116E-011*f^4 + 0.030783*d^3*f^2 + 145.31194*d^4*f - 4.17129E-011*d*f^4 - 1.81843E+007*d^5 + 2.52487E-014*f^5 + 5.54176E-008*d^3*f^3 - 0.14081*d^4*f^2 + 6.18407E+007*d^6 - 5.09192E-018*f^6$	6.64	0.75	0.9951	0.9939	0.9924	94.518

Табела 3.19. Збирни преглед математичких модела ПУ пена (наставак)

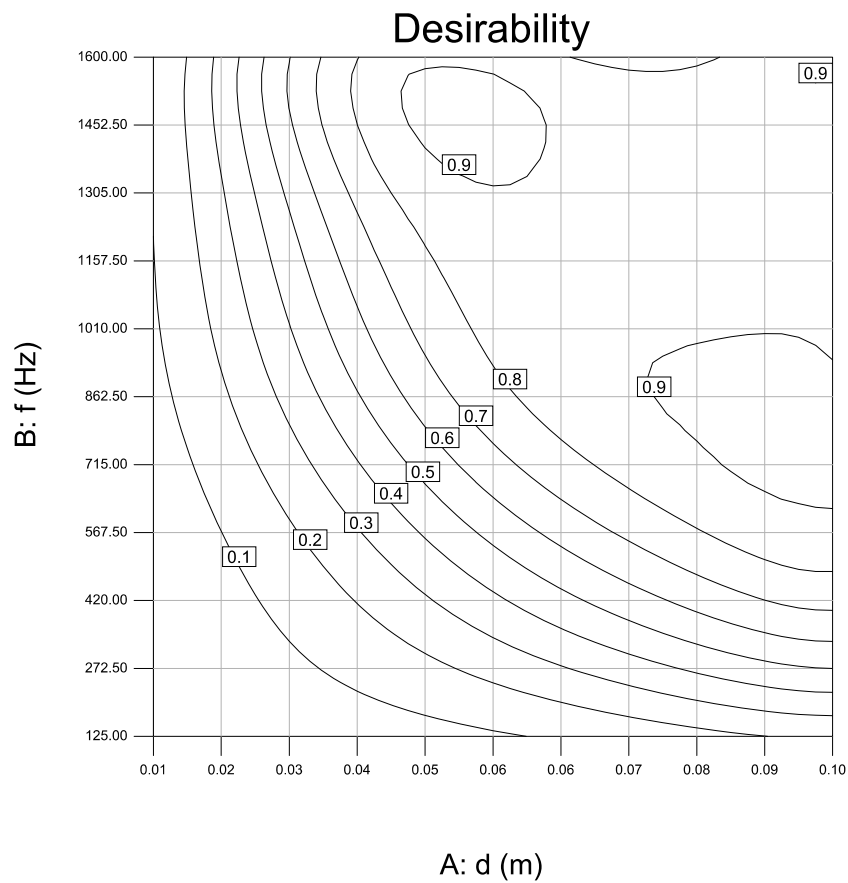
<i>S 3038</i>	$\text{Ln}(\alpha_{S3038}) = -2.15980 - 51.64481*d - 3.46202E-003*f + 0.28361*d*f + 1164.37919*d^2 + 3.54443E-006*f^2 - 2.87696*d^2*f - 1.56509E-004*d*f^2 - 6589.93271*d^3 - 1.19549E-009*f^3 + 3.58649E-004*d^2*f^2 + 11.80043*d^3*f + 3.97690E-008*d*f^3$	10.63	2.08	0.9832	0.9813	0.9779	67.910
<i>T 3545</i>	$\text{Sqrt}(\alpha_{T3545}) = +0.072451 + 26.22029*d + 4.05233E-004*f - 0.097153*d*f - 1020.70823*d^2 + 2.29368E-007*f^2 + 4.44164*d^2*f + 7.68624E-005*d*f^2 + 15166.67454*d^3 - 6.47146E-010*f^3 - 2.73264E-003*d^2*f^2 - 61.51337*d^3*f - 5.64420E-009*d*f^3 - 93685.61469*d^4 + 2.13487E-013*f^4 + 0.023398*d^3*f^2 + 4.00365E-007*d^2*f^3 + 378.28480*d^4*f - 3.38621E-012*d*f^4 + 1.90349E+005*d^5 - 1.52348E-006*d^3*f^3 - 0.071347*d^4*f^2 - 863.13591*d^5*f$	1.83	0.038	0.9984	0.9981	0.9952	155.801
<i>ES 3234</i>	$\text{Ln}(\alpha_{ES 3234}) = -4.11397 + 88.69375*d + 6.53138E-003*f + 0.073409*d*f - 6166.40300*d^2 - 2.78482E-005*f^2 + 3.53775*d^2*f - 7.69303E-005 - 7.69303E-005*d*f^2 + 2.17743E+005*d^3 + 5.89433E-008*f^3 - 4.90694E-003*d^2*f^2 - 38.78893*d^3*f + 1.19177E-007*d*f^3 - 3.96397E+006*d^4 - 6.18902E-011*f^4 + 0.066182*d^3*f^2 - 131.07960*d^4*f - 2.53733E-011*d*f^4 + 3.53153E+007*d^5*d^5 + 3.10685E-014*f^5 - 0.27700*d^4*f^2 + 2021.28782*d^5*f - 1.20622E+008*d^6 - 6.01004E-018*f^6$	4.71	0.45	0.9973	0.9966	0.9956	128.247
<i>HR 2514</i>	$\text{Ln}(\alpha_{HR2514}) = -3.96627 - 47.65430*d + 0.010414*f - 0.24777*d*f + 7359.27171*d^2 - 3.75196E-005*f^2 + 8.12554*d^2*f + 4.08266E-004*d*f^2 - 2.79637E+005*d^3 + 7.12960E-008*f^3 - 5.42628E-003*d^2*f^2 - 90.08352*d^3*f - 4.44655E-007*d*f^3 + 4.74303E+006*d^4 - 6.76627E-011*f^4 + 0.051339*d^3*f^2 + 317.59102*d^4*f + 3.24963E-010*d*f^4 - 3.74167E+007*d^5 + 3.03335E-014*f^5 + 3.35736E-007*d^3*f^3 - 0.15627*d^4*f^2 - 7.97824E-014*d*f^5 + 1.12008E+008*d^6 - 5.20757E-018*f^6$	4.76	1.03	0.9958	0.9948	0.9904	102.977

Табела 3.19. Збирни преглед математичких модела ПУ пена (наставак)

<p><i>HR 3536</i></p>	<p>$\text{Ln}(\alpha_{HR3536}) = -5.53550 + 254.83479*d + 0.011055*f - 0.17864*d*f - 13596.92767*d^2 - 4.29341E-005*f^2 + 8.50656*d^2*f + 2.71280E-004*d*f^2 + 3.73867E+005*d^3 + 8.50822E-008*f^3 - 5.80291E-003*d^2*f^2 - 109.86559*d^3*f - 2.81692E-007*d*f^3 - 5.50953E+006*d^4 - 8.41360E-011*f^4 + 0.066760*d^3*f^2 + 443.77265*d^4*f + 2.23137E-010*d*f^4 + 4.14939E+007*d^5 + 3.98047E-014*f^5 - 0.24977*d^4*f^2 - 5.62867E-014*d*f^5 - 1.24678E+008*d^6 - 7.27303E-018*f^6$</p>	<p>3.86</p>	<p>0.44</p>	<p>0.9974</p>	<p>0.9968</p>	<p>0.9959</p>	<p>135.267</p>
<p><i>PVE 4016</i></p>	<p>$1/\text{Sqrt}(\alpha_{PVE4016}) = +11.66018 - 747.82827*d - 0.026043*f + 0.26694*d*f + 33256.98892*d^2 + 5.62235E-005*f^2 - 17.30142*d^2*f + 1.12035E-003*d*f^2 - 7.52288E+005*d^3 - 1.05024E-007*f^3 - 0.012838*d^2*f^2 + 388.14580*d^3*f - 1.18137E-006*d*f^3 + 8.94593E+006*d^4 + 1.12004E-010*f^4 + 0.038874*d^3*f^2 + 9.31307E-006*d^2*f^3 - 3502.87467*d^4*f + 4.81474E-010*d*f^4 - 5.34391E+007*d^5 - 5.88956E-014*f^5 - 1.90330E-005*d^3*f^3 - 1.79331E-009*d^2*f^4 + 11506.13520*d^5*f - 7.29217E-014*d*f^5 + 1.25898E+008*d^6 + 1.19399E-017*f^6$</p>	<p>5.03</p>	<p>1.43</p>	<p>0.9788</p>	<p>0.9729</p>	<p>0.9590</p>	<p>78.899</p>
<p><i>T 2036</i></p>	<p>$\text{Ln}(\alpha_{T2036}) = -4.10751 + 38.00464*d + 6.59613E-003*f + 0.28011*d*f - 2461.58755*d^2 - 3.49399E-005*f^2 + 3.70836*d^2*f - 2.33865E-004*d*f^2 + 55772.43467*d^3 + 7.32003E-008*f^3 - 7.58887E-003*d^2*f^2 - 110.23712*d^3*f + 2.07455E-007*d*f^3 - 4.51063E+005*d^4 - 7.32211E-011*f^4 + 0.12856*d^3*f^2 + 6.61174E-007*d^2*f^3 + 575.39324*d^4*f - 4.61760E-011*d*f^4 + 1.16237E+006*d^5 + 3.48042E-014*f^5 - 9.38699E-006*d^3*f^3 - 0.52668*d^4*f^2 - 6.37266E-018*f^6$</p>	<p>7.39</p>	<p>1.49</p>	<p>0.9951</p>	<p>0.9939</p>	<p>0.9851</p>	<p>99.717</p>



Слика 3.32. Просторни дијаграм промене жељене вредности са дебљином материјала по терцама



Слика 3.33. Контурни дијаграм промене жељене вредности са дебљином материјала по терцама

б) Емиријски макроскопски модели

За полиуретанске пена које су комерцијално доступне предложене су нове методе и модели за одређивање акустичких карактеристика.

Нова метода за одређивање подужне специфичне отпорности струјању ваздуха (R_{s-r})

Због своје важности, одређивање отпорности струјању ваздуха је дефинисано међународним стандардом [116], а у неким земљама и национални стандарди прописују начин и услове одређивања отпорности струјању ваздуха порозних материјала. Тој групи стандарда припада ASTM C522-3 [117] који је један од најчешће примењиваних у овој области. Међутим и поред постојања стандардних процедура, у делу 2 овог рада је указано на проблеме који се јављају када је у питању одређивање подужне отпорности струјању ваздуха код порозних материјала.

Коришћењем величина које је дефинисао стандард [116], применом методе линеарне регресије може се одредити вредност подужне специфичне отпорности струјању ваздуха.

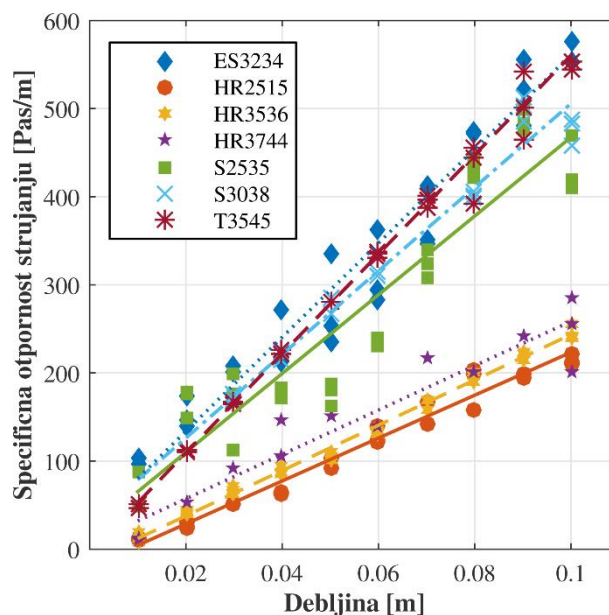
За седам врста ПУ пена мале густине одређена је отпорност струјању ваздуха и специфична отпорност струјању ваздуха (табела 3.20.). Користећи методу линеарне регресије, успостављена је функционална зависност између специфичне отпорности струјању ваздуха (R_s) и дебљине узорка (d), а коефицијент линеарне детерминације R^2 указује на врло јаку корелациону зависност.

Табела 3.20. Вредности подужне отпорности струјању ваздуха ПУ пена, одређене на два различита начина

Р. Бр.	ПУ пена	R_s [Pa·s/m]	R^2	$\Gamma_{R_{s-r}}$ [Pa·s/m ²]	Γ_{meas} [Pa·s/m ²]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1.	S 2535	$R_s = 4467.40 \cdot d + 20.61$	0.8712	4842.1	5171.2
2.	S 3038	$R_s = 4742.52 \cdot d + 31.34$	0.9662	5312.3	5309.7
3.	ES 3234	$R_s = 5338.20 \cdot d + 27.00$	0.9508	5829.1	6219.6
4.	T 3545	$R_s = 5639.10 \cdot d - 3.60$	0.9868	5573.6	5533.2
5.	HR 2515	$R_s = 2432.9 \cdot d - 19.923$	0.9734	2070.7	1882.5
6.	HR 3536	$R_s = 2570.80 \cdot d - 13.60$	0.9931	2323.5	2195.7
7.	HR 3744	$R_s = 2516.8 \cdot d + 6.879$	0.9156	2641.9	2528.7

Где су:

- r_{meas} – подужна отпорност струјању ваздуха, одређена према стандарду ISO 9053:1991
- $r_{R_{s-r}}$ – подужна отпорност струјању ваздуха, одређена према новој методи R_{s-r}



Слика 3.34. Зависност отпорности струјању ваздуха од дебљине узорка

Вредности подужне отпорности струјању ваздуха одређене према стандарду [116] приказане су у колони 6 (табела 3.20.). Вредности подужне отпорности струјању ваздуха у колони 5 (табела 3.20.) су одређене из једначина линеарне регресије на следећи начин:

$$r = R_s(d) / d_{sr} \quad (3.29)$$

где је:

$R_s(d)$ – отпорност струјању ваздуха узорка за испитивање добијена линеарном регресијом, у Pa·s/m,

d_{sr} – средња вредност дебљине узорака за једну врсту пене, у m

$$d_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.30)$$

Специфична подужна отпорност струјању ваздуха дефинисана једначином (3.29) имаће најмању грешку, када се за дебљину узорка узме средња вредност, јер у том случају интервал поверења регресионе линије има минималну вредност [118].

Нов модел за подужну отпорност струјању ваздуха – NMг

Измерене вредности подужне отпорности струјању ваздуха за различите врсте материјала су доступне у литератури. Такви подаци обично важе за једну врсту апсорпционих материјала, са ограниченим вредностима структурних параметара. Bies & Hansen су представили модел [68] за стаклена влакна, који омогућава израчунавање подужне отпорности струјању полазећи од вредности густине влакнастих материјала и пречника влакна:

$$r = K_2 d^{-2} \rho_m^{K_1} \quad (3.31)$$

де су: r – подужна отпорност струјању ваздуха (Pa s/m^2), ρ_m је густина (kg/m^3); d – средња вредност пречника влакна (m). Вредности константи K_1 и K_2 су утврђене експериментално.

Најбоља предвиђања подужне отпорности струјању ваздуха овај модел даје за пречнике влакна од 1 до 15 μm и малу количину везивног средства. За веће пречнике влакна отпорност струјању ваздуха се може проценити коришћењем модела који су развили Garai & Pompoli [34].

$$r = K_2 d_{\text{Kino}}^{-2} \rho_m^{K_1} \quad (3.32)$$

Полазећи од модела Bies & Hansen, Kino & Ueno [69] су развили нови однос између подужне отпорности струјању и густине за меламинске пене, користећи еквивалентни пречник влакна и израз (3.32). Kino & Ueno су у основи користили исту идеју као Bies & Hansen, само су увођењем еквивалентног пречника (d_{Kino}) решетке ћелијске структуре меламинске пене са отвореним ћелијама, направили сличан модел за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха као и код влакнастих материјала.

За разлику од влакнастих материјала, код пенастих материјала ређе је истраживана зависност подужне отпорности струјању од густине пене. Подужна отпорност струјању је одређена за 7 врста полиуретанских пена, а резултати мерења су приказани на слици 3.35. За једну врсту пене приказана је средња вредност подужне отпорности струјању, која је одређена мерењем на 30 узорака.

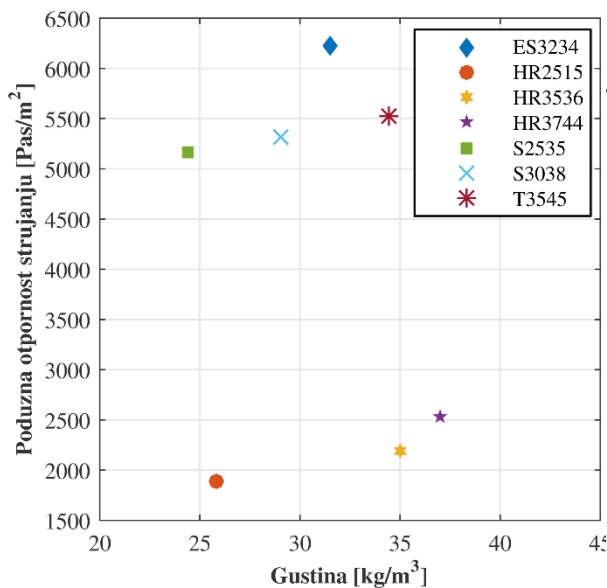
Ако посматрамо скуп свих пена, са слике 3.35. се јасно види да није могуће успоставити функционалну зависност између густине ПУ пене и вредности подужне отпорности струјању ваздуха. Због тога је у даљем раду формирања новог модела за подужну отпорност струјању ваздуха разматран само подскуп високоеластичних (HR) пена.

Ако се пође од претпоставке да се ћелијска структура пене може посматрати као влакно [69], може се формирати нов модел за одређивање подужне отпорности струјању за групу високоеластичних полиуретанских пена. Модел Bies & Hansen [68] се може трансформисати у облик:

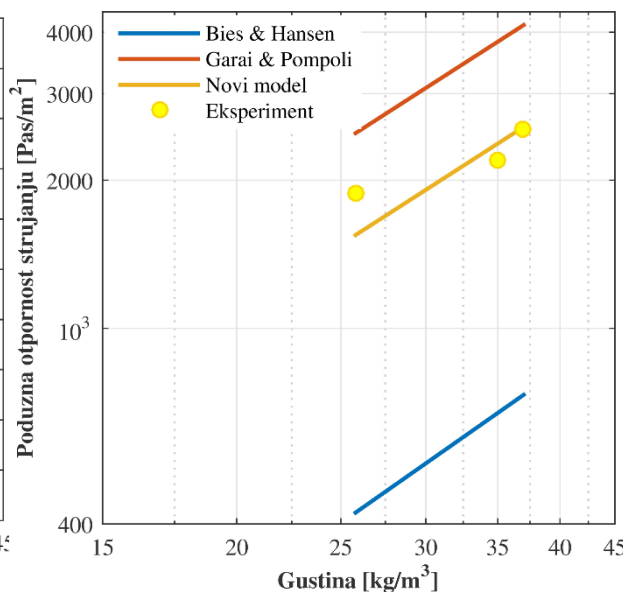
$$r = A \rho_m^B \quad (3.33)$$

Где су: $A = K_2 / d_{\text{eq}}^2$ и $B = K_1$.

Оптималне вредности независних параметара A и B одређене су методом најмањих квадрата за измерене вредности густине и израчунате средње вредности подужне отпорности струјању ваздуха за 90 узорака високоеластичних пена (HR). Независни параметри $A = 16.13$ и $B = 1.404$ су одређени применом софтверског пакета *MATLAB*. Ако се у овај модел уврсти средњи пречник влакна ћелијске структуре (21,33 μm), који је раније утврђен, долази се до вредност коефицијента $K_2 = 7,34 \cdot 10^{-9}$.



Слика 3.35. Подужна отпорност струјању ваздуха у функцији од густине ПУ пене



Слика 3.36. Нов модел за подужну отпорност струјању ваздуха за HR пене у поређењу са теоријским моделима

Табела 3.21. Параметри у моделима за одређивање отпорности струјању ваздуха

Модел	Врста материјала	$d, (d_{eq})$ [μm]	A	B (K_1)	K_2
Bies & Hansen	стаклена влакна	< 15	2.920	1.53	$3.18 \cdot 10^{-9}$
Garai & Pompoli	полиестер влакна	33	25.989	1.404	$28.302 \cdot 10^{-9}$
Kino & Ueno	меламинска пена	(5.43)	390.03	1.53	$11.5 \cdot 10^{-9}$
NOV MODEL	високоеластичне (HR) пене	(21.33)	16.13	1.404	$7.34 \cdot 10^{-9}$

где су: d – средњи пречник влакна а d_{eq} – еквивалентни пречник влакна ћелијске структуре пене

Нов модел за импедансу (NMI) и одређивање коефицијента апсорпције

Delany & Bazley су 1970. године у свом раду [88] представили облик једначина за израчунавање карактеристичне импедансе (Z_c) и константе простирања звука (γ) у апсорпционом материјалу.

$$Z_c' = R + jX \quad (3.34)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.35)$$

Коефицијент апсорпције порозног материјала који је постављен директно на чврсти зид, према стандарду EN 12354-6:2003 [119] се може одредити, ако су познати отпорност струјању ваздуха и дебљина слоја. Отпорност струјању је мерена и одређена према захтевима стандарда [116].

У складу са захтевима стандарда [119], реални и имагинарни делови једначина за карактеристичну импедансу и константу простирања звука које су дефинисали Delany & Bazley могу се трансформисати у облик као што је приказано у изразима (3.36) до (3.39).

$$R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 (C)^{C_2} \right] \quad (3.36)$$

$$X = -\rho_0 c_0 \left[C_3 (C)^{C_4} \right] \quad (3.37)$$

$$\alpha = k_0 \left[C_5 (C)^{C_6} \right] \quad (3.38)$$

$$\beta = k_0 \left[1 + C_7 (C)^{C_8} \right] \quad (3.39)$$

Бездимензиони члан C (3.40) и таласни број k_0 (3.41) су одређени према следећим изразима:

$$C = r / \rho_0 f \quad (3.40)$$

$$k_0 = 2\pi f / c_0 \quad (3.41)$$

где су:

- r – специфична подужна отпорност струјању, Pas/m²
- f – фреквенција у Hz
- ρ_0 – густина ваздуха $\approx 1,2$ kg/m³
- c_0 – брзина звука у ваздуху ≈ 343 m/s, при температури од 20°C

Полазећи од препорука стандарда [119] може се израчунати дифузни коефицијент апсорпције звука порозних материјала. За дифузно акустичко поље, коефицијент апсорпције α_s се одређује према изразу (3.42):

$$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi \quad (3.42)$$

$$\alpha_\varphi = 1 - |r_\varphi|^2 \quad (3.43)$$

$$r_\varphi = (Z' \cos \varphi - 1) / (Z' \cos \varphi + 1) \quad (3.44)$$

где су:

- φ – угао инциденције, у радијанима
- α_φ – апсорпциони коефицијент за равни звучни талас, везан за угао φ
- r_φ – коефицијент рефлексије за равни звучни талас, везан за угао φ
- Z' – нормализована површинска импеданса слоја

Нормализована импеданса слоја материјала локално постављеног на чврст зид може се одредити из:

$$Z' = Z_c' \coth \gamma d \quad (3.45)$$

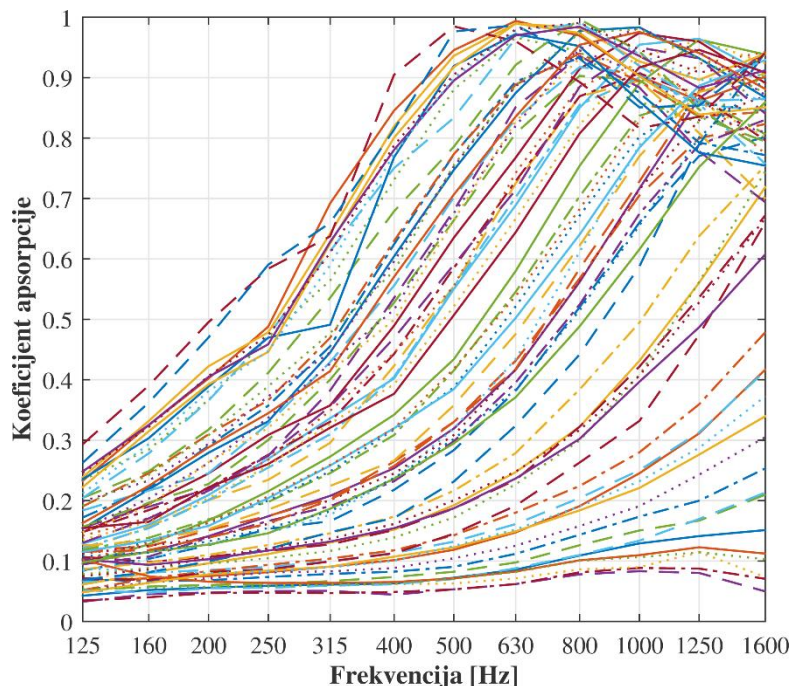
$$Z_c' = Z_c / \rho_0 c_0 \quad (3.46)$$

где су:

- Z_c – карактеристична импеданса апсорпционог материјала

– d – дебљина слоја, у метрима

Мерење коефицијента апсорпције узорака од ПУ пене је извршено у импедансној цеви у условима нормалне инциденције. Да би се резултати мерења упоредили са предвиђањима емпиријских модела, израз (3.42) потребно је одредити за нормални угао инциденције ($\varphi = \pi/2$).



Слика 3.37. Резултати мерења коефицијента апсорпције у импедансној цеви за 7 врста ПУ пена мале густине

Пошто коефицијенти C_1, \dots, C_8 у једначинама (3.36) до (3.39) нису константе, већ се мењају у зависности од врсте материјала, потребно је утврдити њихове вредности за полиуретанске пене мале густине. Од 1980, употреба брзе Фуријеове трансформације (FFT) је постала широко распрострањена [67], тако да се и коефицијенти апсорпције порозних материјала базирани на овој методи, могу одредити са високом тачношћу. За одређивање коефицијената C_1, \dots, C_8 , применом методе најмањих квадрата коришћено је 2520 експерименталних тачака и средња вредност подужне отпорности струјању ваздуха од $4120,1 \text{ Pas/m}^2$.

Средњи коефицијент апсорпције за појединачну експерименталну тачаку одређен је изразом:

$$\alpha_{mean} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^s \sum_{l=1}^t \alpha_{ijkl} \quad (3.47)$$

Где су:

- i – променљива броја различитих врста ПУ пена ($p = 7$)
- j – променљива броја различитих дебљина узорака ($q = 10$)
- k – променљива броја узорака исте дебљине за једну врсту пене ($s = 3$)
- l – променљива броја терци које су обухваћене при мерењу коефицијента апсорпције у импедансној цеви ($t = 12$)

Средња вредност подужне отпорности струјању за ПУ пене мале густине је одређена на основу израза:

$$r_{mean} = \sum_{i=1}^7 \bar{r}_i \quad (3.48)$$

\bar{r}_i - средња вредност подужне отпорности струјању за појединачне ПУ пене

Описаном процедуром, применом програмског пакета *MATLAB* одређене су вредности коефицијената C_1, \dots, C_8 за полиуретанске пене мале густине и њихове вредности су приказане у табели 3.22., упоредо са још 4 добро позната емпиријска модела.

Табела 3.22. Упоредне вредности коефицијената емпиријских модела

Модел	Коефицијенти							
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
Dunn & Davern	0.114	0.369	0.0985	0.758	0.168	0.715	0.136	0.491
Wu Qunli	0.212	0.455	0.105	0.607	0.163	0.592	0.188	0.544
Delani & Bazley	0.0571	0.574	0.087	0.732	0.0978	0.700	0.189	0.595
Garai & Pompoli	0.078	0.623	0.074	0.660	0.159	0.571	0.121	0.530
Нов модел	0.342	0.0853	0.0899	0.482	0.197	0.463	0.333	0.249

Нов интегрални модел за одређивање коефицијента звучне апсорпције

Основни елементи *новог модела за одређивање коефицијента апсорпције ПУ пена* мале густине су поступци за одређивање подужне отпорности струјању (стандардна метода [116]; модел NMr; метода Rs-r), нов модел за акустичку импедансу (NMI) и стандардна методологија [119]. Модел за одређивање коефицијента апсорпције је назван *Нов Интегрални Модел* (NIM). Индекси у ознаци NIM су додељени у зависности од начина одређивања подужне отпорности струјању ваздуха. За стандардну методу користи се индекс "meas", за модел (NMr) индекс "mod" а за методу (Rs-r) индекс "lr". Применом интегралног модела, могу се одредити основна акустичка својства ПУ пене само на основу познавања њене густине и дебљине слоја.

Тачност предвиђања коефицијента апсорпције за пет емпиријских модела, приказаних у табели 3.22., укључујући и нов модел, је одређена статистички, прорачуном апсолутне и релативне грешке. Средња вредност апсолутне грешке за емпиријске моделе се може одредити према изразу:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{q} \frac{1}{s} \sum_{j=1}^q \sum_{l=1}^s \left| \alpha_{jl,model,n} - \bar{\alpha}_{jl,meas} \right| \quad (3.49)$$

Где су:

- $\alpha_{jl,model,n}$ - коефицијент апсорпције за задату вредност дебљине узорка и фреквенције за одређени емпиријски модел при нормалној инциденцији измерен у импедансној цеви
- $\bar{\alpha}_{jl,meas}$ - средња вредност коефицијента апсорпције измерена у импедансној цеви, за одабрану дебљину узорка и фреквенцију

Вредности $j = 1 \div 10$ се односе респективно на дебљине узорака пене: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mm. Вредности $l = 1 \div 12$, одговарају респективно вредностима терцних фреквенција: 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600.

Средња вредност коефицијента апсорпције је израчуната према изразу:

$$\bar{\alpha}_{jl, meas} = \frac{1}{p} \frac{1}{s} \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^s \alpha_{ik} \quad (3.50)$$

где је:

- α_{ik} - коефицијент апсорпције за i -ту врсту пене ($i=1 \div 7$) и k -ти ($k=1 \div 3$) редни број узорка исте дебљине.

Средња вредност релативне грешке за емпиријске моделе се може одредити према изразу:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{q} \frac{1}{s} \sum_{j=1}^q \sum_{l=1}^s |\alpha_{jl, model, n} - \bar{\alpha}_{jl, meas}|}{\bar{\alpha}_{jl, meas}} \cdot 100 [\%] \quad (3.51)$$

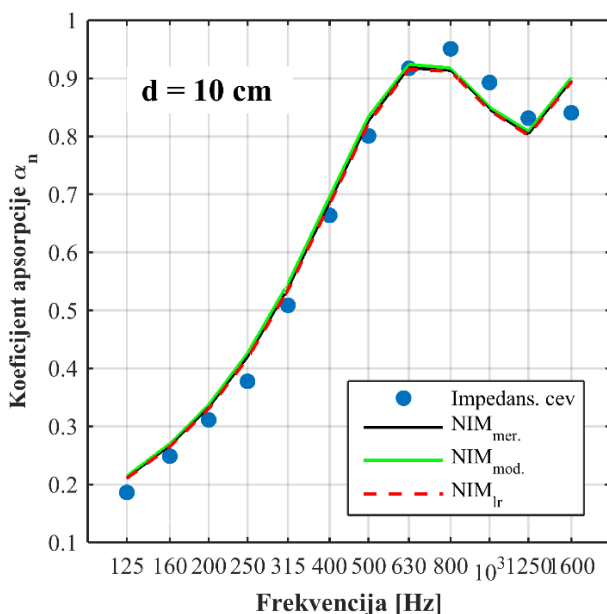
У циљу независне провере нових модела, урађена су додатна испитивања узорака ПУ пене које нису биле обухваћене испитивањима приликом формирања модела. Из производног програма истог произвођача [115] одабрана је пена HR 4035 густине 40 kg/m³. Од изабране пене направљено је 30 узорака, који су исечени и испитани на потпуно идентичан начин као што је урађено и са узорцима на основу којих су формиран нови модели.

На слици 3.38. приказан је коефицијент апсорпције пене HR 4035 (дебљине 100 mm) који је одређен на четири различита начина. Тачкама су представљене вредности коефицијента апсорпције које су измерене у импедансној цеви. Остале три криве су добијене коришћењем новог интегралног модела (NIM) са вредностима специфичне подужне отпорности струјању ваздуху као што је приказано у табели 3.23. Функција коефицијента апсорпције NIM_{meas.} одређена је на основу измерених вредности специфичне подужне отпорности струјању ваздуха [116]. Друга функција коефицијента апсорпције NIM_{mod.} као улазни параметар имала је вредност специфичне подужне отпорности струјању ваздуха одређене према моделу NMr. Трећа функција коефицијента апсорпције NIM_{lr.} као улазни параметар имала је вредност специфичне подужне отпорности струјању ваздуха одређене према методи Rs-g. Применом методе Rs-g добијена је једначина линеарне регресије облика:

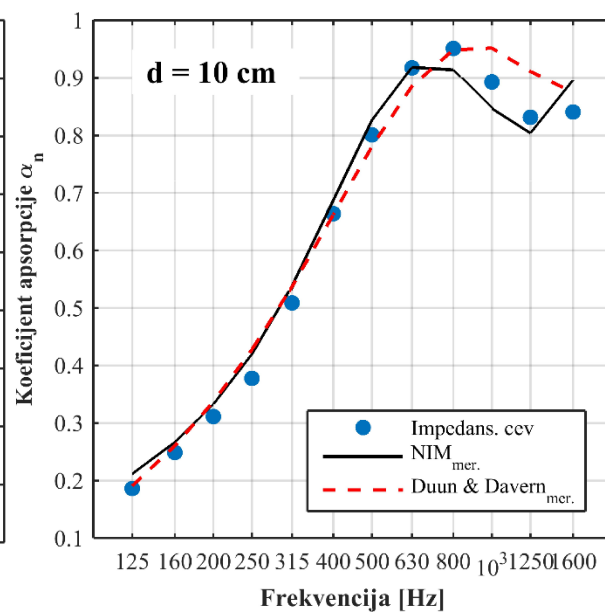
$$R_s = 2492.3 \cdot d + 10.212 [Pa \cdot s / m] \quad (3.52)$$

Између специфичне отпорности струјању ваздуха (3.52) ПУ пене HR 4035 и дебљине узорака остварена је врло јака корелациона зависност ($R^2 = 0.9695$). На слици 3.39. приказан је коефицијент апсорпције пене HR 4035 (дебљине 100 mm) који је одређен на три различита начина. Тачкама су представљене вредности коефицијента апсорпције које су измерене у импедансној цеви. За остале две функције коефицијента апсорпције, улазни параметар је била измерена вредност специфичне подужне отпорности струјању ваздуха. Циљ је био, да се упоредно прикажу предвиђања коефицијента апсорпције помоћу новог интегралног модела (NIM) и теоријског модела који има најмању вредност релативне и апсолутне грешке (табела 3.23.). Од свих познатих модела, најмања одступања

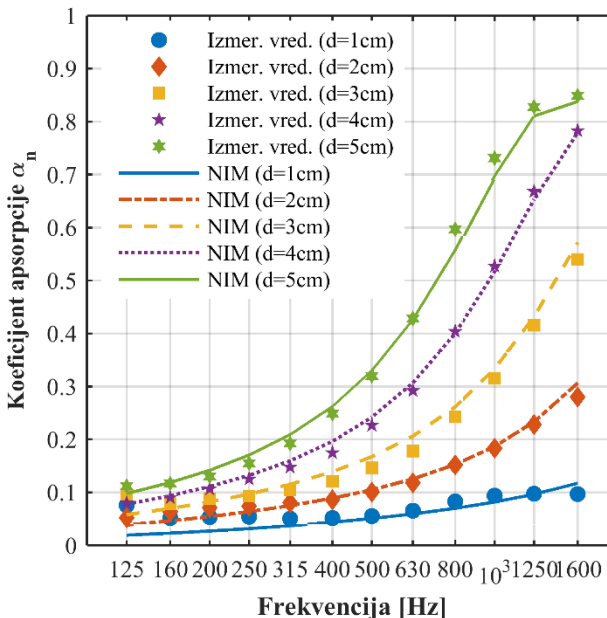
коэффициента апсорпције у односу на вредности добијене у импедансној цеви имао је модел Dunn & Davern.



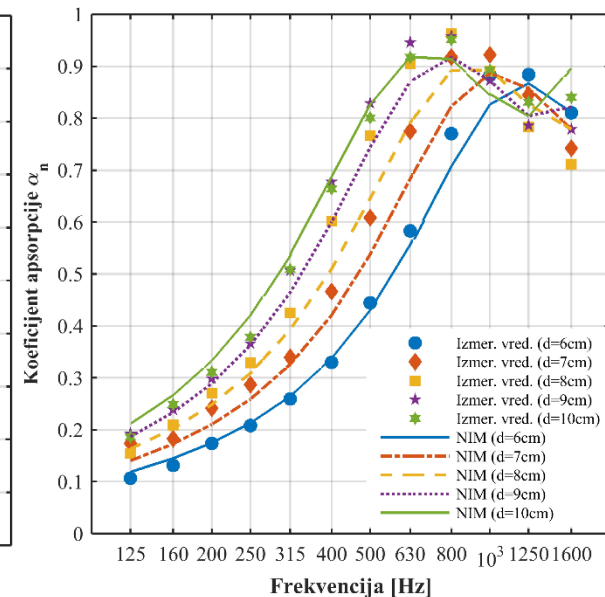
Слика 3.38. Коэффициент апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) дебљине 100 mm: измерене и израчунаване вредности према NIM (r – одређено на три различита начина)



Слика 3.39. Коэффициент апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) дебљине 100 mm: измерене вредности и израчунаване вредности према NIM_{meas} и према моделу Dunn & Davern (измерене вредности – r



Слика 3.40. Коэффициенти апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) за дебљине узорка од 10 до 50 mm: измерене вредности и израчунаване вредности према NIM_{meas}



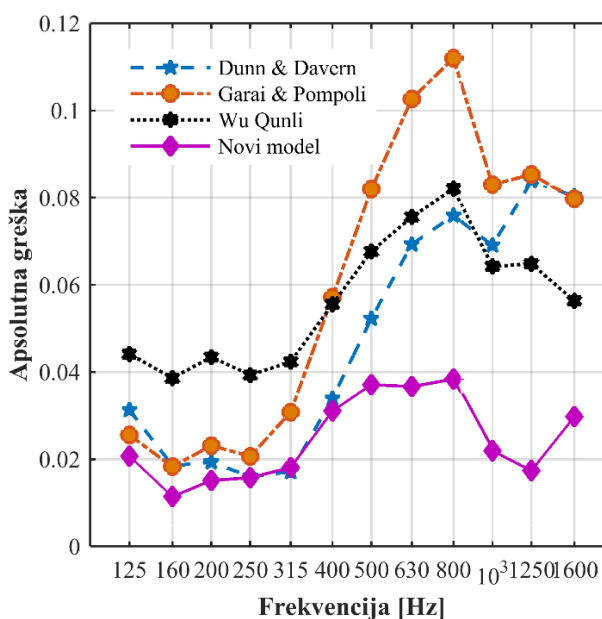
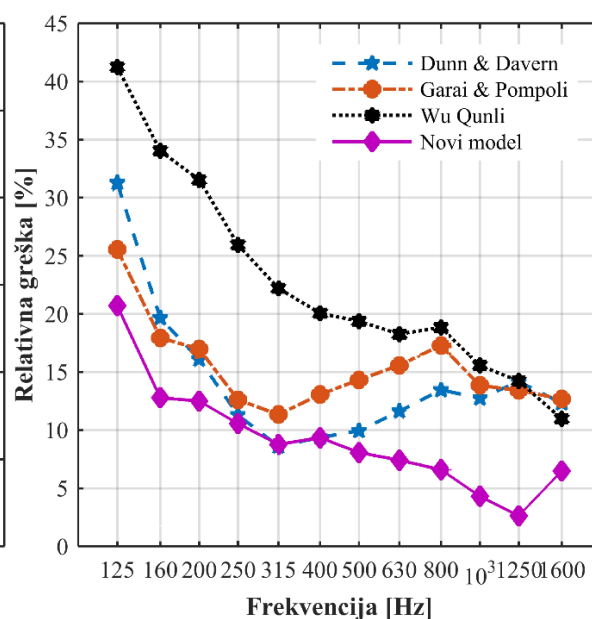
Слика 3.41. Коэффициенти апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) за дебљине узорка од 60 до 100 mm: измерене вредности и израчунаване вредности према NIM_{meas}

На сликама 3.40. и 3.41. дат је упоредни приказ коoeffицијента апсорпције измереног у импедансној цеви и вредности које су добијене помоћу новог интегралног модела (NIM_{meas}) за 10 дебљина узорка ПУ пене HR 4035.

Табела 3.23. Вредности апсолутних и релативних грешака коефицијента апсорпције ПУ пене за оцену тачности емпиријских модела

Пена HR 4035	$r = 2727 \text{ [Pas/m}^2\text{]}$ (измерена вредност)		$r = 2864 \text{ [Pas/m}^2\text{]}$ (према моделу NMr)		$r = 2678 \text{ [Pas/m}^2\text{]}$ (према методи Rs-r)	
	средња апсолутна грешка	средња релативна грешка [%]	средња апсолутна грешка	средња релативна грешка [%]	средња апсолутна грешка	средња релативна грешка [%]
Dunn & Davern	0.047	14.21	0.044	13.58	0.048	14.48
Wu Qunli	0.056	22.68	0.052	21.49	0.058	23.15
Garai & Pompoli	0.060	15.39	0.056	14.52	0.061	15.73
Delaney & Bazley	0.230	129.73	0.235	132.64	0.228	128.64
Нов модел (NIM_{meas})	0.024	9.18	0.024	9.29	0.025	9.18

У табели 3.23. приказане су вредности средње апсолутне грешке коефицијента апсорпције одређене према изразу (3.49) и средње релативне грешке коефицијента апсорпције одређене према изразу (3.51). Усредњавање је извршено за 30 узорак ПУ пене HR 4035, 10 различитих дебљина узорак и 12 фреквенција. Анализа је извршена применом четири теоријска модела и новог интегралног модела (NIM). Процедура је спроведена за три различите вредности параметра специфичне подужне отпорности струјању ваздуха.

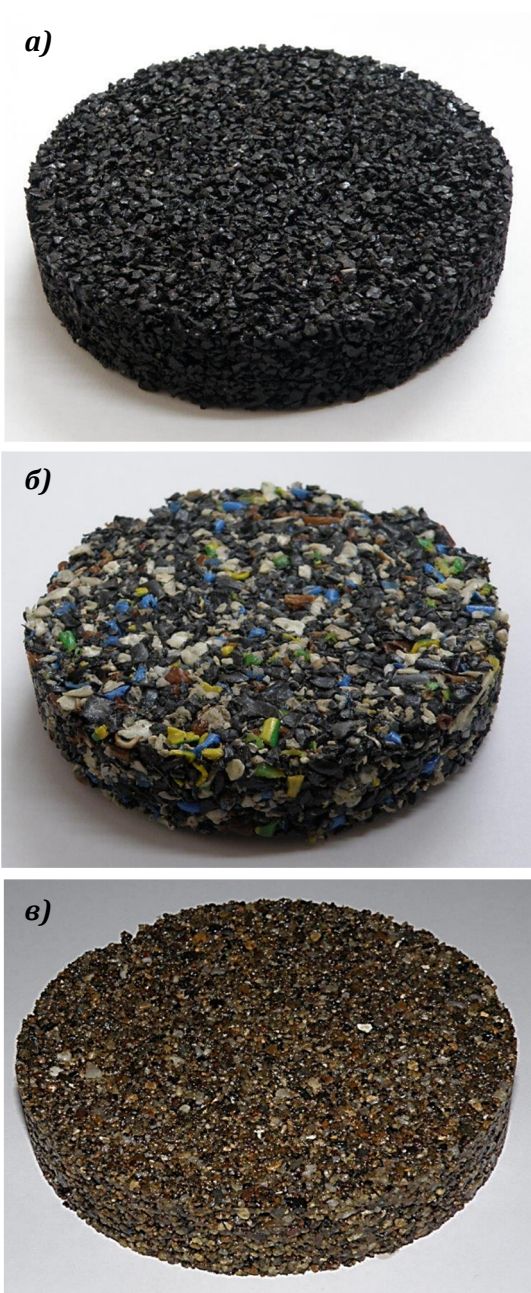
**Слика 3.42.** Средње вредности апсолутних грешака коефицијента апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) добијене за 10 различитих дебљина узорак**Слика 3.43.** Средње вредности релативних грешака коефицијента апсорпције пене HR 4035 (густине 40 kg/m^3) добијене за 10 различитих дебљина узорак

Вредности апсолутне грешке у испитиваном фреквенцијском подручју су приказане на слици 3.42. Апсолутна грешка на одређеној фреквенцији за одговарајући модел је израчуната као средња вредност разлике измерених вредности коефицијента апсорпције у импедансној цеви и израчунатих вредности за тај модел, за измерене вредности специфичне подужне отпорности струјању ваздуха. Релативна грешка (слика 3.43.) на одређеној фреквенцији за одређени модел је израчуната као однос апсолутне грешке и средње вредности коефицијента апсорпције измерених вредности на датој фреквенцији.

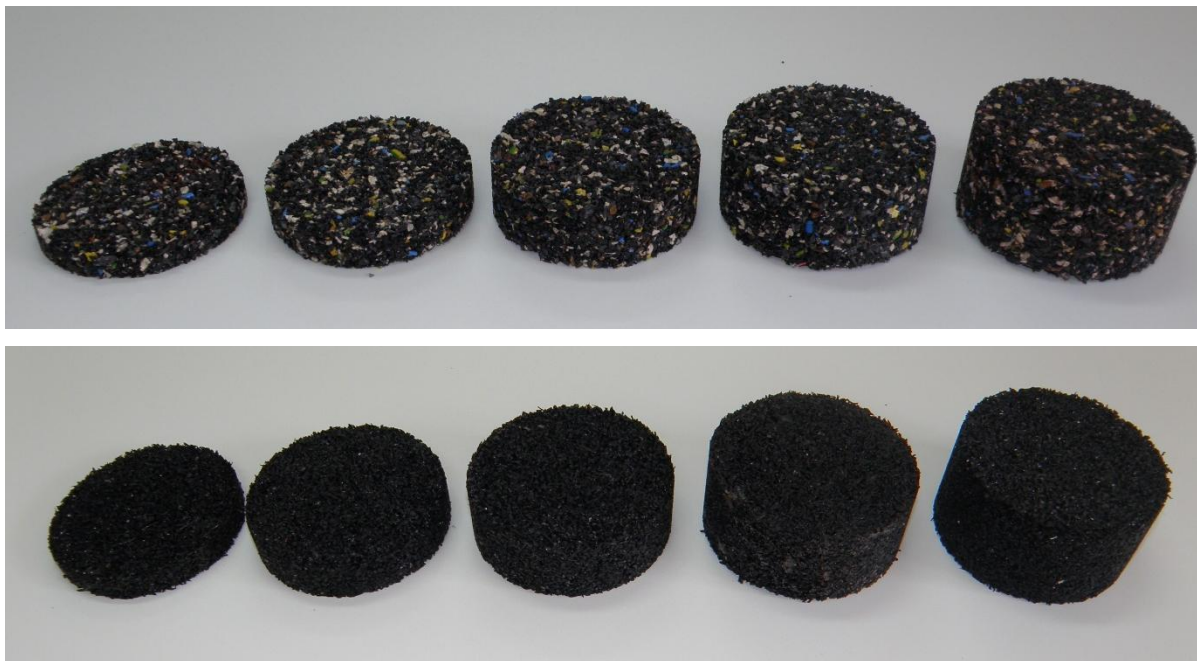
3.5. Апсорпциона својства зрнастих материјала

3.5.1 Припрема узорака и план експеримената

План експеримената за испитивање акустичких својстава зрнастих порозних материјала је обухватио 3 врсте материјала: песак, рециклирану гуму и рециклирану пластику дебљине од 10 mm до 50 mm. Структура узорака је формирана коришћењем гранулата материјала и везивног средства од полиуретанских смола. Везивно средство је код свих узорака узето са истим процентуалним запреминским уделом и није посматрано као компонента смеше. Грануле свих материјала су 3 mm. Узорци су изливени у калупима пречника 100 mm и у дебљинама од 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm и 50 mm.



Слика 3.44. Узорци од: а) рециклиране гуме б) рециклиране пластике и в) песка



Слика 3.45. Узорци од рециклиране гуме и пластике сложени по дебљинама

Мерења коефицијента апсорпције су извршена по терцама у распону од 125 Hz до 1600 Hz за све дебљине. Циљ је да се уочи зависност коефицијента апсорпције од фреквенције и дебљине слоја.

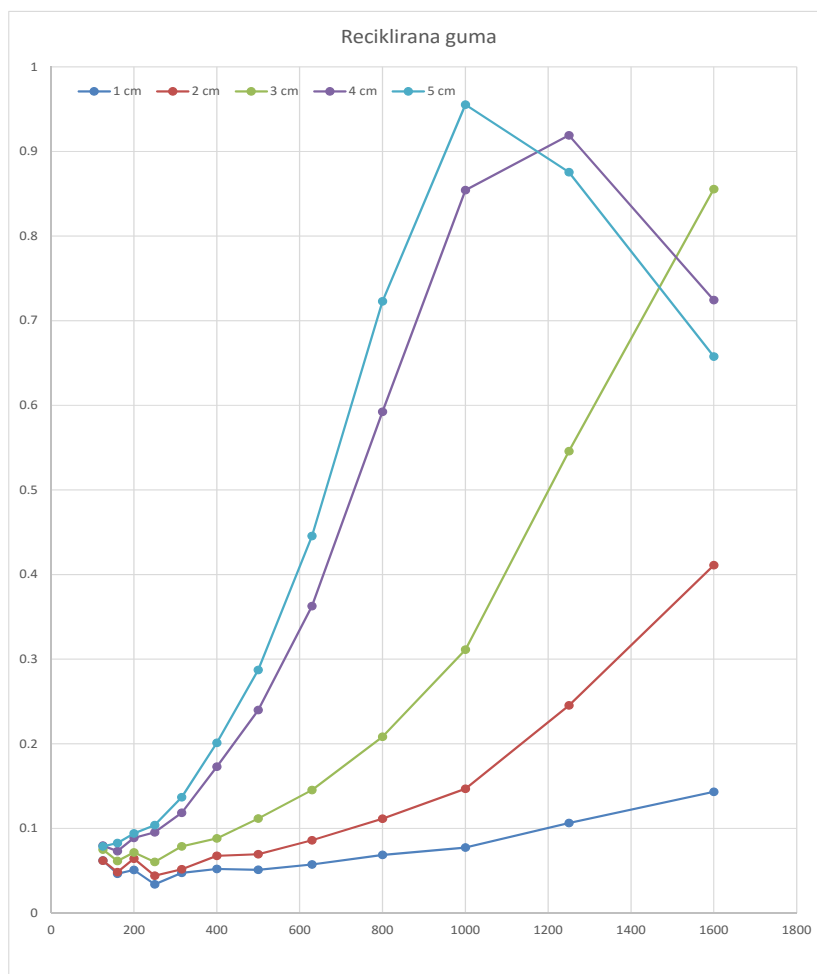
3.5.2 Резултати мерења

Рециклирана гума

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.24. и на слици 3.46.

Табела 3.24. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану гуму

f_c (Hz)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
125	0.062079	0.061709	0.074983	0.079582	0.078801
160	0.046224	0.048147	0.061382	0.072933	0.082575
200	0.050688	0.064102	0.071529	0.088792	0.093929
250	0.033774	0.043948	0.060364	0.095229	0.10363
315	0.047438	0.051707	0.078651	0.11827	0.13687
400	0.052127	0.067505	0.08809	0.17284	0.20107
500	0.051058	0.069412	0.11152	0.23979	0.28714
630	0.057375	0.086028	0.14524	0.36262	0.44561
800	0.068572	0.11138	0.20821	0.5924	0.72293
1000	0.077245	0.14664	0.31118	0.85416	0.95535
1250	0.1062	0.24529	0.54574	0.91899	0.87541
1600	0.14311	0.41097	0.85543	0.72432	0.65755



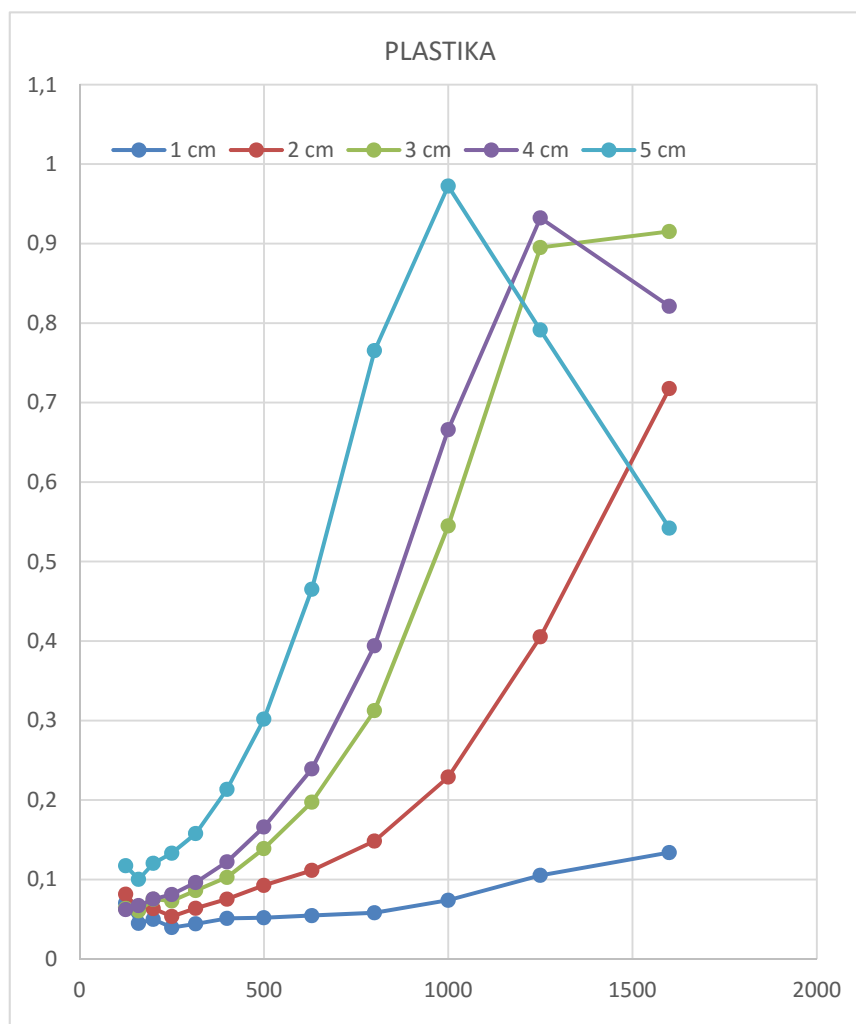
Слика 3.46. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану гуму

Рециклирана пластика

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у у табели 3.25. и на слици 3.47.

Табела 3.25. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану пластику

f_c (Hz)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
125	0.070452	0.081595	0.063608	0.062299	0.11737
160	0.045009	0.061678	0.060597	0.067244	0.10029
200	0.049988	0.063427	0.075185	0.075543	0.12036
250	0.039622	0.053593	0.073073	0.081245	0.13322
315	0.04424	0.063935	0.086204	0.096306	0.1578
400	0.0511	0.07538	0.10281	0.1223	0.21353
500	0.05196	0.092672	0.13902	0.16619	0.30182
630	0.054693	0.11156	0.19746	0.23917	0.46519
800	0.058152	0.14845	0.31262	0.39413	0.76533
1000	0.073966	0.22894	0.54481	0.66599	0.9724
1250	0.10531	0.40526	0.89514	0.93225	0.79133
1600	0.13402	0.71772	0.91522	0.82113	0.54213



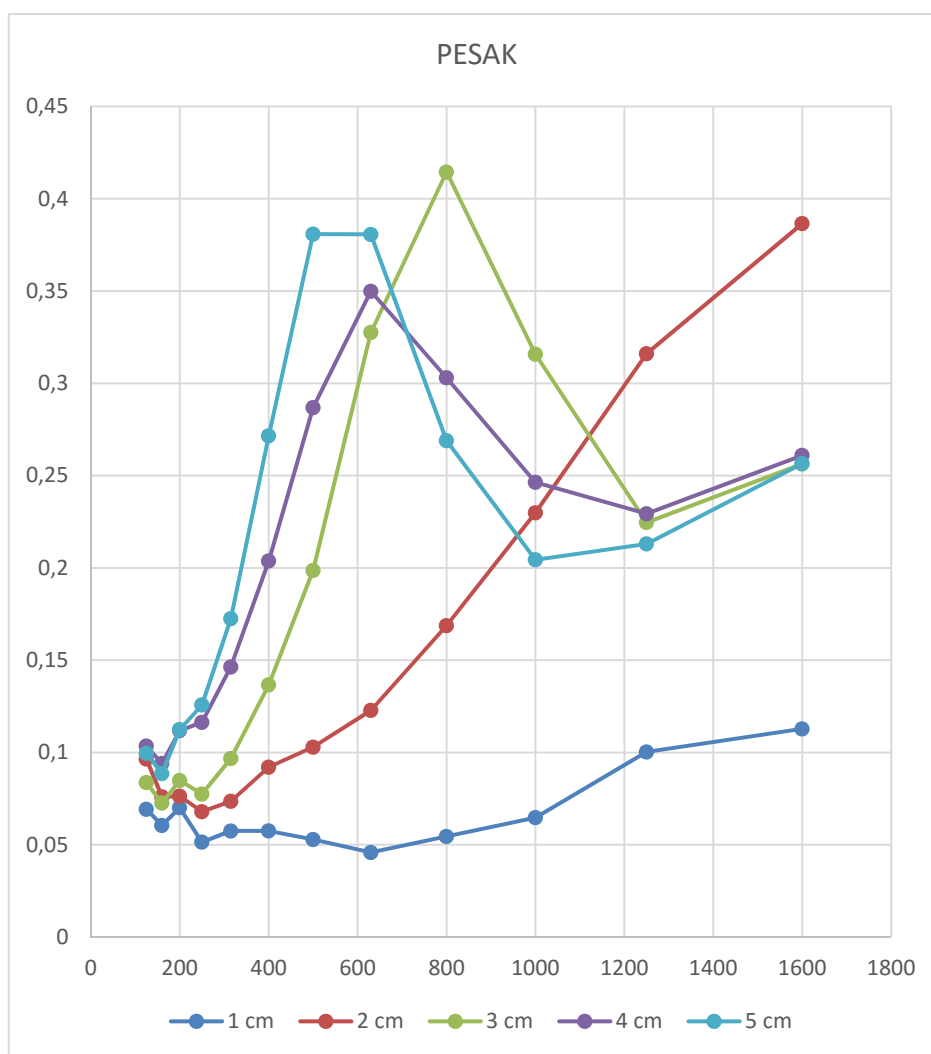
Слика 3.47. Вредности коефицијента апсорпције за рециклирану пластику

Песак

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.26. и на слици 3.48.

Табела 3.26. Вредности коефицијента апсорпције за песак

f_c (Hz)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
125	0.069242	0.096456	0.083674	0.10345	0.099541
160	0.060486	0.075953	0.072598	0.094052	0.088581
200	0.070067	0.076318	0.084838	0.11187	0.1124
250	0.051438	0.067965	0.077476	0.11633	0.12575
315	0.057444	0.073531	0.096708	0.14634	0.17251
400	0.057496	0.092069	0.1366	0.20372	0.27152
500	0.052838	0.1029	0.19858	0.2868	0.3808
630	0.045833	0.12281	0.32756	0.34987	0.38066
800	0.054505	0.16871	0.41452	0.30303	0.26895
1000	0.06469	0.22988	0.31575	0.24638	0.20439
1250	0.1003	0.31607	0.22462	0.22934	0.21299
1600	0.11278	0.38652	0.25632	0.26097	0.25652



Слика 3.48. Вредности коефицијента апсорпције за песак

3.5.3 Обрада и анализа експерименталних резултата

Мерење коефицијента апсорпције звука зрнастих материјала је извршено у импедансној цеви - Метода трансфер функције, према стандарду EN ISO 10534-2:2001 у Лабораторији за акустику Електротехничког факултета у Београду. Мерење је извршено за терцне фреквенције од 125 Hz до 1600 Hz на узорцима дебљине од 10 mm до 50 mm.

а) Стохастички емпиријски модели

Добијени стохастички модели су сигнификантни и доказују да је зависност коефицијента апсорпције испитиваних материјала скоро функционална. Параметри на основу којих је оцењена адекватност математичких модела имају веома високе вредности те се може закључити да добијени математички модели имају висок ниво поверења.

Рециклирана гума

Математички модел зависности коефицијента апсорпције звука рециклиране гуме од фреквенције и дебљине је дефинисан једначином:

$$\begin{aligned} \ln(\alpha) = & -1.69947 - 4.40877E-003*f - 131.00232*d + 0.23296*f*d + 3.93762E-006f^2 \\ & + 4089.88397*d^2 - 7.68280E-005*f^2*d - 1.37867*f*d^2 - 9.03081E-010*f^3 - \\ & 40439.17333*d^3 \end{aligned} \quad (3.53)$$

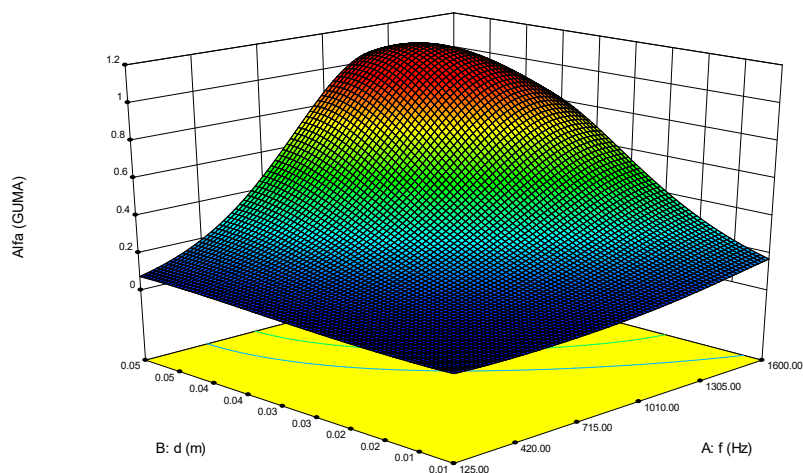
Да би се задовољила нормалност расподеле резидуала било је неопходно извршити трансформацију функције са природним логаритмом. Статистике за оцену адекватности математичког модела имају веома високе вредности (табела 3.27.) те се може закључити да добијени математички модел има висок ниво поверења (преко 99%).

Табела 3.27. Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0.14	R-Squared	0.9812
Mean	-1.99	Adj R-Squared	0.9779
C.V. %	7.22	Pred R-Squared	0.9681
PRESS	1.76	Adeq Precision	53.276

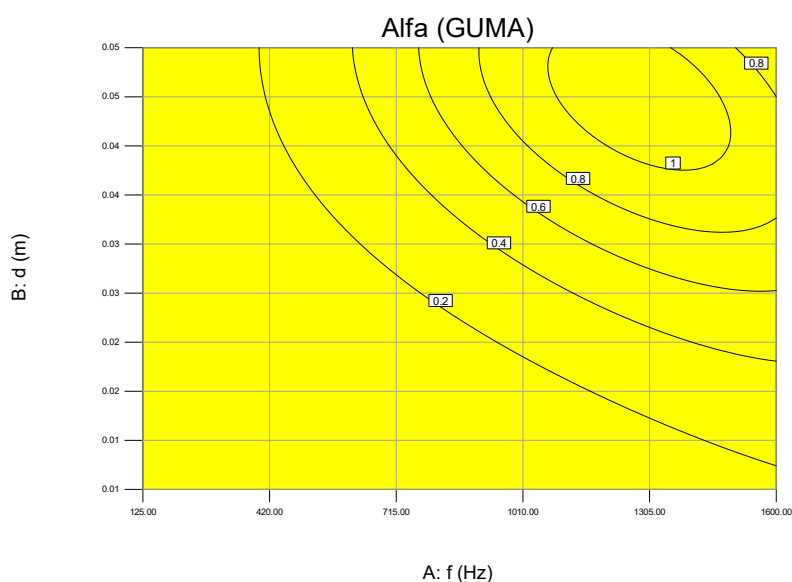
Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, Вох-Соx дијаграм и др.) показују да су после трансформације модела резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистике. Графички приказ математичког модела описаног једначином (3.53) је дат на сликама 3.49. и 3.50.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 Alfa (GUMA)
 0.95535
 0.033774
 X1 = A: f
 X2 = B: d



Слика 3.49. 3D Графички приказ математичког модела коефицијента апсорпције за рециклирану гуму

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 Alfa (GUMA)
 X1 = A: f
 X2 = B: d



Слика 3.50. Контурни 2D приказ математичког модела коефицијента апсорпције за рециклирану гуму

На основу једначине и графичког приказа се може уочити следеће:

- коефицијент апсорпције рециклиране гуме расте са повећањем фреквенције до вредности од 1300 Hz а након тога опада,
- са повећањем дебљине материјала до 45 mm расте и коефицијент апсорпције а након тога опада при чему се његов максимум помера ка нешто нижим фреквенцијама до 1000 Hz.

Рециклирана пластика

Конечна једначина математичког модела који адекватно описује зависност коефицијента апсорпције *рециклиране пластике* од фреквенције и дебљине материјала гласи:

$$\begin{aligned} \ln(\alpha) = & -2.77031 - 5.63955E-003*f + 54.58375*d + 0.29244*f*d + 5.00031E-006*f^2 - \\ & 3554.33097*d^2 - 7.15031E-005*f^2*d - 2.61071*f*d^2 - 1.37120E-009*f^3 \\ & + 50369.01689*d^3 \end{aligned} \quad (3.54)$$

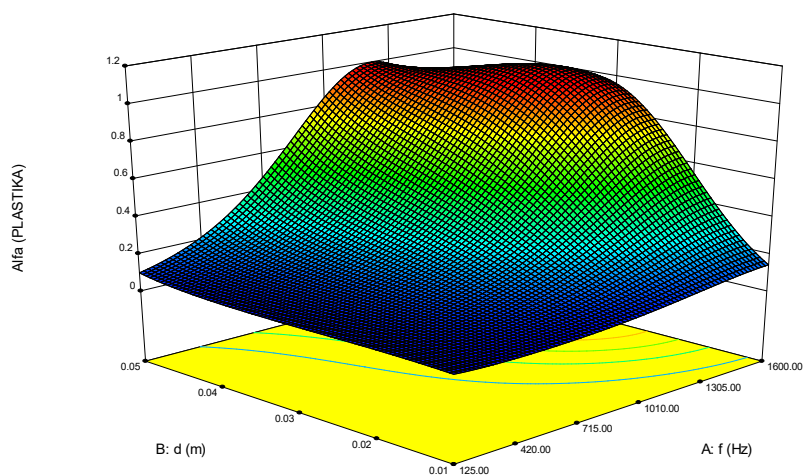
Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, Вох-Соx дијаграм и др.) показују да су резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистичке особине. Статистике за оцену адекватности математичког модела имају веома високе вредности (табела 3.28.) те се може закључити да добијени математички модел има висок ниво поверења (преко 99%).

Табела 3.28. Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0.11	R-Squared	0.9890
Mean	-1.92	Adj R-Squared	0.9870
C.V. %	5.80	Pred R-Squared	0.9821
PRESS	1.00	Adeq Precision	68.485

Графички приказ математичког модела описаног једначином (3.54) је дат на сликама 3.51. и 3.52.

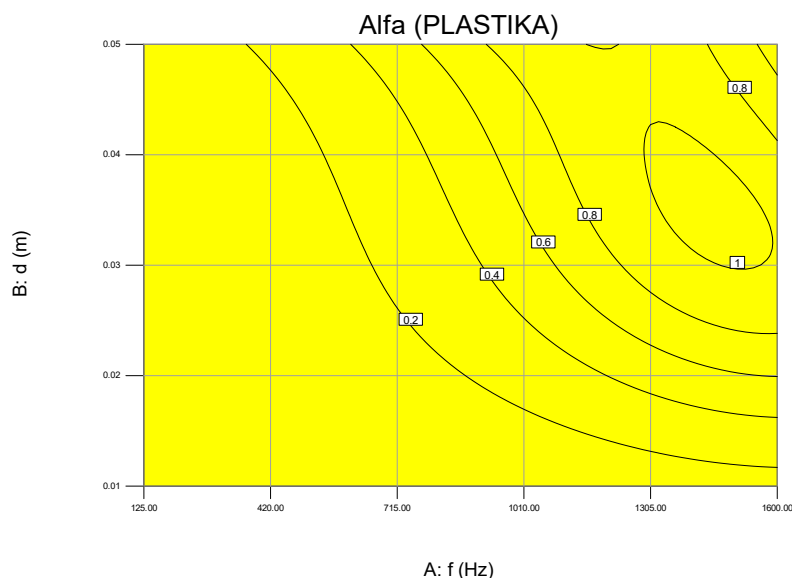
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Original Scale
Alfa (PLASTIKA)
0.9724
0.039622
X1 = A: f
X2 = B: d



Слика 3.51. 3D Графички приказ математичког модела коефицијента апсорпције за рециклирану пластику

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Original Scale
Alfa (PLASTIKA)

X1 = A: f
X2 = B: d



Слика 3.52. Контурни 2D приказ математичког модела коефицијента апсорпције за рециклирану пластику

На основу једначине математичког модела и графичких приказа се може уочити следеће:

- коефицијент апсорпције рециклиране пластике расте са повећањем фреквенције до вредности од 1300 Hz а након тога опада,
- на вишим фреквенцијама дебљина материјала има знатног утицаја на повећање коефицијента апсорпције до дебљине од 30 mm а након тога има негативан ефекат што изазива благо опадање коефицијента апсорпције и померање његовог максимума ка релативно нижим фреквенцијама до 1000 Hz. Утицај дебљине материјала је нарочито изражен у распону од 30 mm до 50 mm,
- у односу на рециклирану гуму, рециклирана пластика има нешто повољнија апсорпциона својства.

Песак

Коначна једначина математичког модела који адекватно описује зависност коефицијента апсорпције *песка* од фреквенције и дебљине материјала гласи:

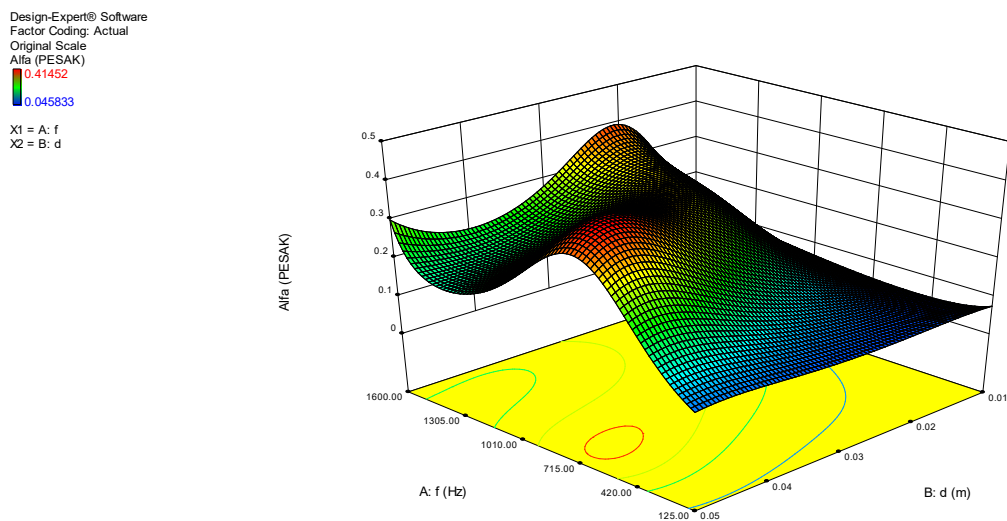
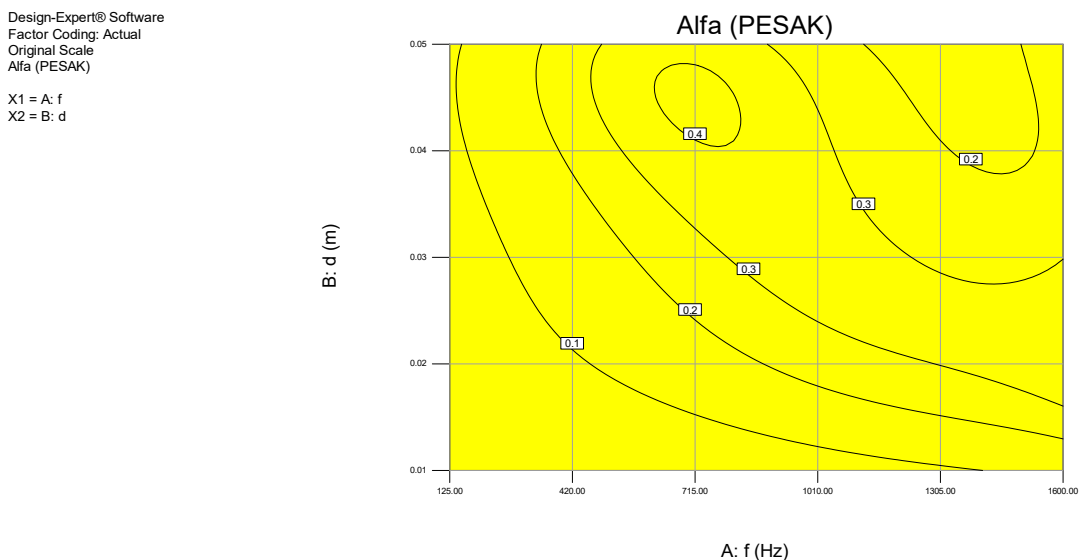
$$\begin{aligned} 1/\text{Sqrt}(\alpha) = & +2.72601 + 0.020016*f - 101.69451*d - 1.23435*f*d - 2.35574E-005*f^2 \\ & + 13406.17367*d^2 + 7.74252E-004*f^2*d + 20.10337*f*d^2 + 1.16684E-008*f^3 - \\ & 3.92898E+005*d^3 - 4.34577E-003*f^2*d^2 - 1.71346E-007*f^3*d - 127.47010*f*d^3 - \\ & 2.17247E-012*f^4 + 3.54573E+006*d^4 \end{aligned} \quad (3.55)$$

Као и код претходна два модела, и овде је била неопходна трансформација функције одзива. Статистике за оцену адекватности математичког модела имају веома високе вредности (табела 3.29.) те се може закључити да добијени математички модел има висок ниво поверења (преко 97%).

Табела 3.29. Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0.21	R-Squared	0.9572
Mean	2.85	Adj R-Squared	0.9438
C.V. %	7.32	Pred R-Squared	0.8954
PRESS	4.79	Adeq Precision	27.659

Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, Вох-Сох дијаграм и др.) показују да су након трансформације функције резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистичке особине. Графички приказ математичког модела описаног једначином (3.55) је дат на сликама 3.53. и 3.54.

**Слика 3.53.** 3D Графички приказ математичког модела коефицијента апсорпције за песак**Слика 3.54.** Контурни 2D приказ математичког модела коефицијента апсорпције за песак

За песак се може закључити следеће:

- коефицијент апсорпције песка има знатно мање вредности од коефицијента апсорпције рециклиране гуме и рециклиране пластике у целом распону фреквенцијског опсега,
- коефицијент апсорпције песка такође расте са повећањем фреквенције до одређене вредности а затим опада и има максимум на знатно нижим фреквенцијама у односу на гуму и пластику,
- дебљина материјала такође има утицај на повећање коефицијента апсорпције али се различито понаша на ниским и високим фреквенцијама. На вишим фреквенцијама преко 1000 Hz нема сврхе користити материјале дебље од 20 mm јер они изазивају супротан ефекат тј. смањују коефицијент апсорпције. На нижим фреквенцијама нпр. око 400 Hz ефекат повећања коефицијента апсорпције је евидентан до дебљине од 45 mm,
- у односу на рециклирану гуму и пластику, песак има знатно лошија апсорпциона својства на фреквенцијама изнад 630 Hz али зато знатно боља својства на фреквенцијама од 400 до 630 Hz.

б) Макроскопски емпиријски модели

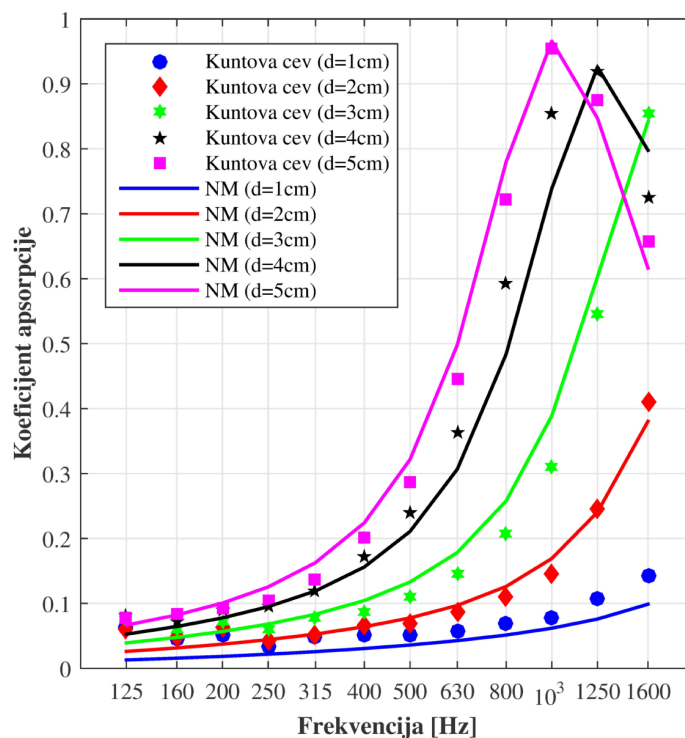
Мерењем акустичких и неакустичких величина добијени су улазни подаци за формирање нових емпиријских модела за предвиђање акустичких особина зрнастих материјала. Мерење коефицијента апсорпције звука је извршено у импедансној цеви – Метода трансфер функције, према стандарду SRPS EN ISO 10534-2:2008. Мерење отпорности струјању ваздуха обављено је према стандарду SRPS ISO 9053:1994, користећи методу са сталним протоком ваздуха.

Коефицијенти у новим моделима за одређивање акустичке импедансе су одређени за сваку врсту материјала методом најмањих квадрата. Узимајући у обзир препоруке европске норме EN 12354-6:2003 израчунат је коефицијент звучне апсорпције за случај нормалне инциденције.

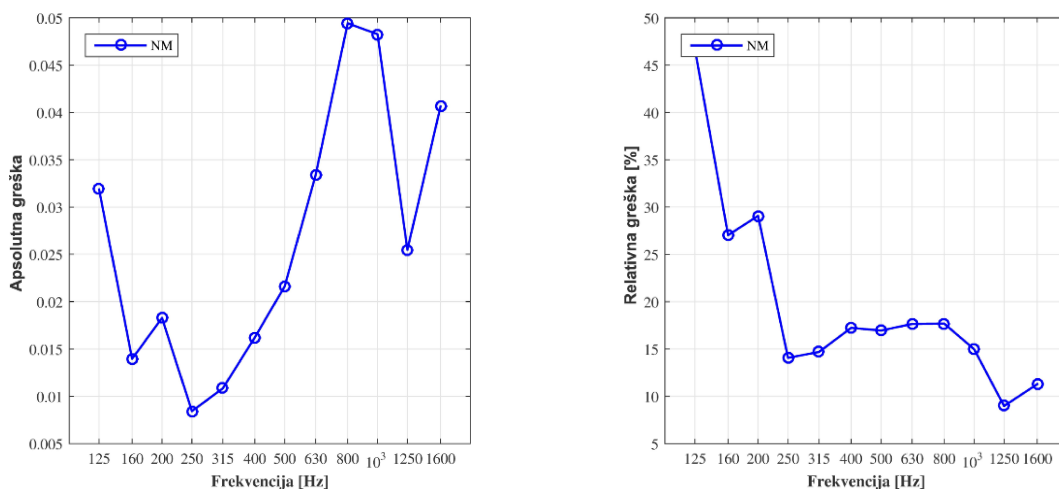
Тачност предвиђања коефицијента апсорпције је оцењена на основу величине апсолутне и релативне грешке у односу на мерне вредности у импедансној цеви. Упоредна анализа је показала да нови модели за одређивање коефицијента апсорпције дају вредности апсолутне и релативне грешке у оквиру дозвољених граница, дефинисаних за овакву врсту емпиријских модела.

Табела 3.30. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава рециклиране гуме

Материјал	РЕЦИКЛИРАНА ГУМА	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	7466	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.566 \cdot C^{0.495}) - i(0.0506 \cdot C^{0.723}) \right]$	(3.56)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.115 \cdot C^{0.563}) + i(1 + 0.680 \cdot C^{0.039}) \right]$	(3.57)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0265	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	19.69	



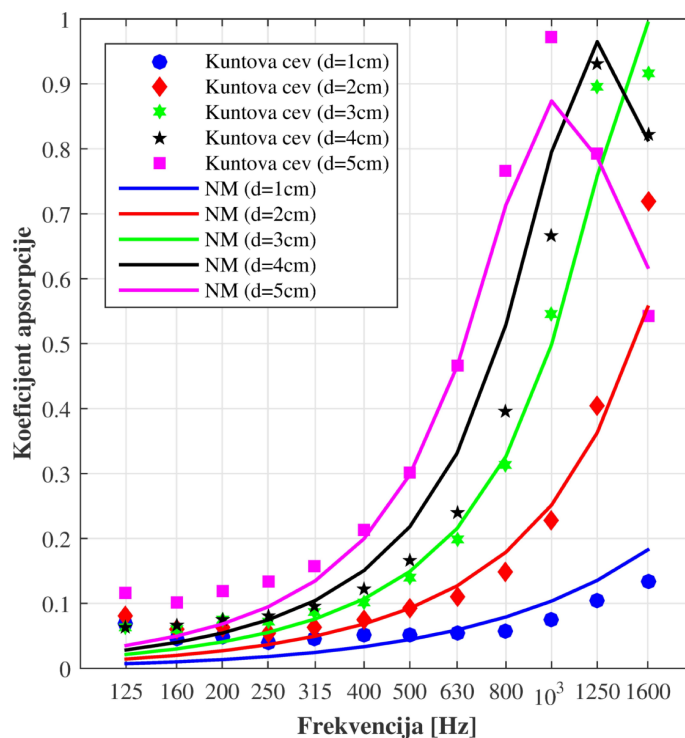
Слика 3.55. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције рециклиране гуме



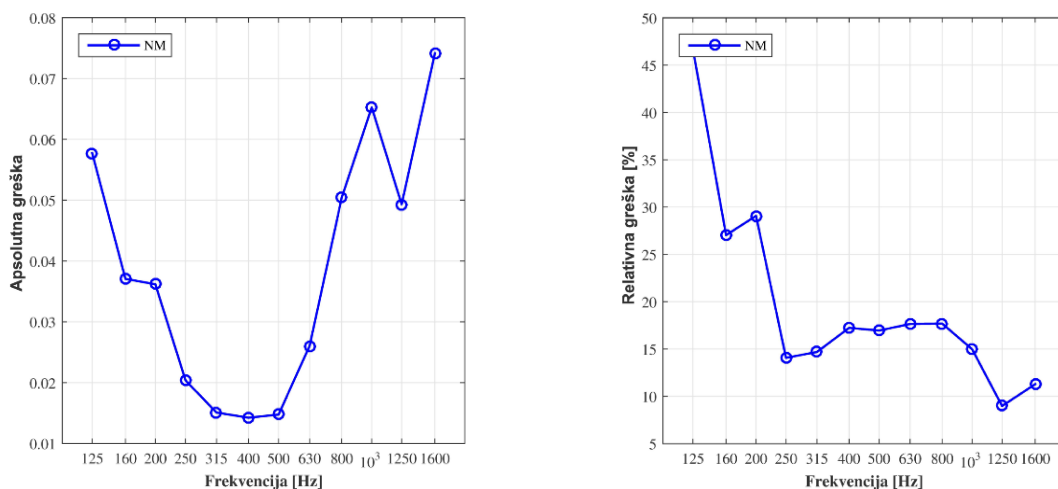
Слика 3.56. Апсолутне и релативне грешке модела

Табела 3.31. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава рециклиране пластике

Материјал	РЕЦИКЛИРАНА ПЛАСТИКА	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	5045	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[\left(1 + 0.570 \cdot C^{1.221} \right) - i \left(1.74E - 07 \cdot C^{1.649} \right) \right]$	(3.58)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[\left(0.174 \cdot C^{0.843} \right) + i \left(1 + 0.680 \cdot C^{0.0594} \right) \right]$	(3.59)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0384	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	28.0	



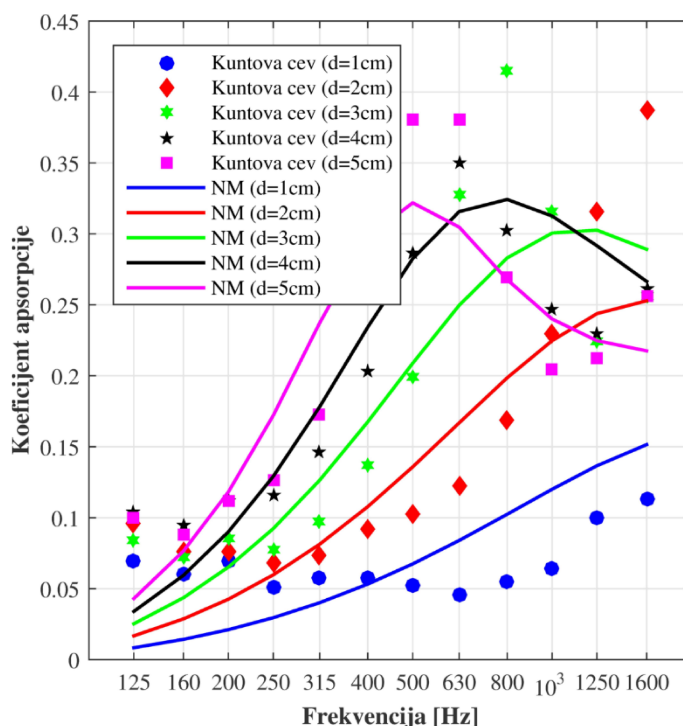
Слика 3.57. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције рециклиране пластике



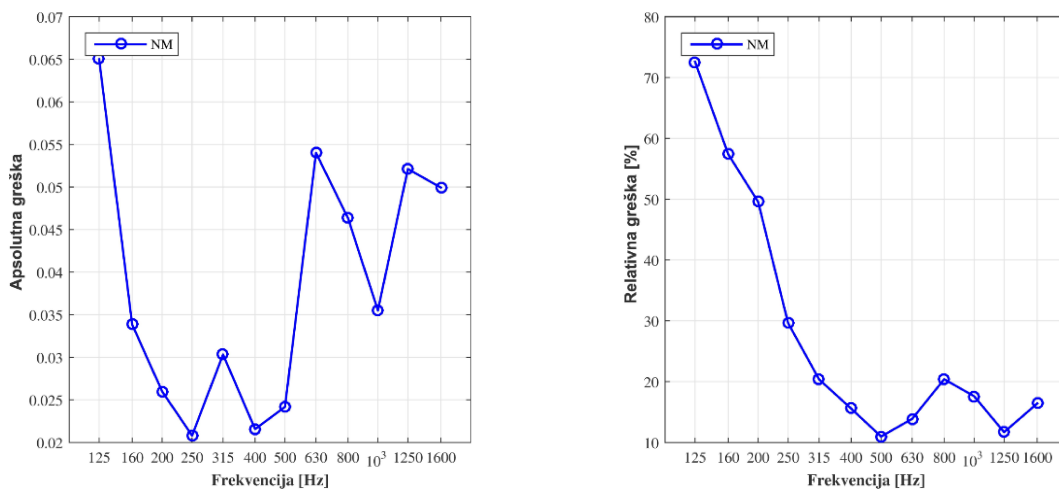
Слика 3.58. Апсолутне и релативне грешке модела

Табела 3.32. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава песка

Материјал	ПЕСАК	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	72032	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.010 \cdot C^{1.107}) - i(0.492 \cdot C^{0.700}) \right]$	(3.60)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.840 \cdot C^{0.007}) + i(1 + 0.477 \cdot C^{1.030}) \right]$	(3.61)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0383	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	30.69	



Слика 3.59. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције песка



Слика 3.60. Апсолутне и релативне грешке модела

3.6. Апсорпциона својства смеше зрнастих материјала

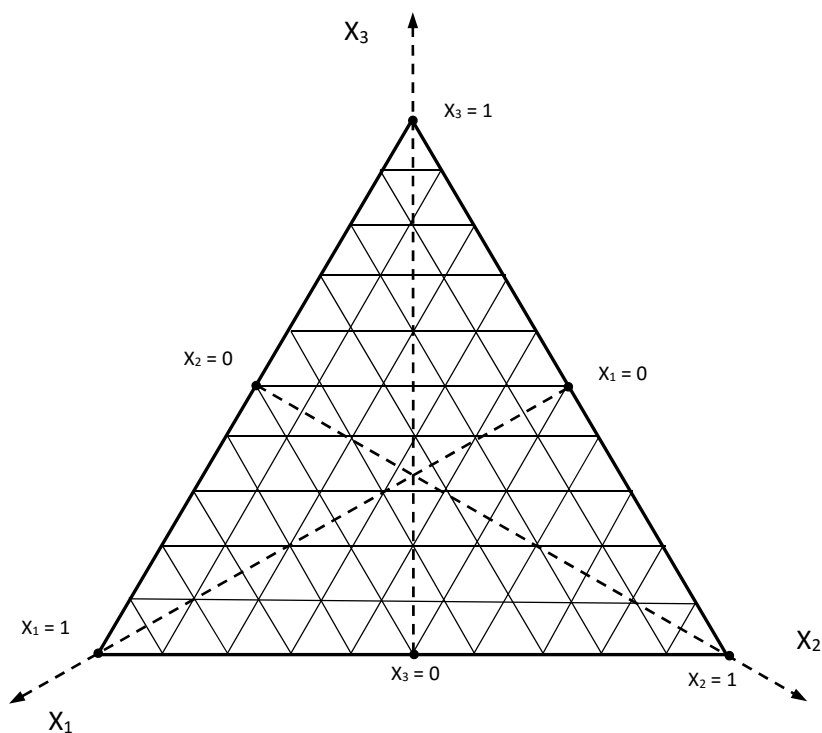
3.6.1 Припрема узорака и план експеримента

За испитивање акустичких својстава смеше зрнастих материјала одабрани су материјали анализирани у претходном поглављу:

- песак,
- рециклирана гума и
- рециклирана пластика.

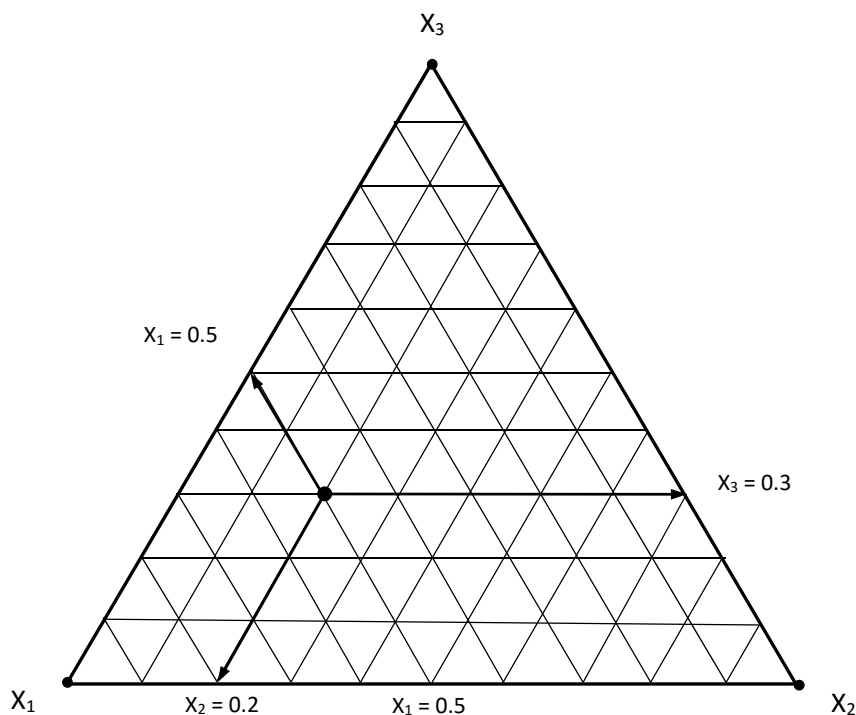
Иако су акустичке особине наведених зрнастих материјала већ обрађене потребно је установити какав ефекат на коефицијент апсорпције има њихов међусобни утицај. Зато је направљен план експеримената за тројне системе смеше у ком је процентуални удео сваке компоненте вариран у интервалу од 0% до 100%. При том, удео сваке компоненте у смеси зависи од удела преостале две компоненте тако да је задовољен услов:

$$0 \leq X_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^3 X_i = 1 \quad (3.62)$$



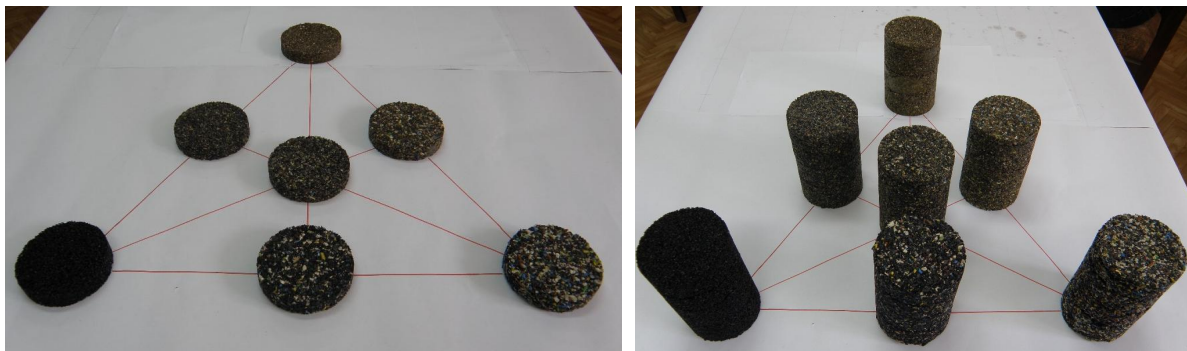
Слика 3.61. Приказ вертикалних пресека и смера пораста удела појединачних компоненти у троугаоном дијаграму смеше

Свака тачка унутар троугла представља одговарајући састав трокомпонентног система. Врхови троугла представљају чисте супстанце док тачке на странама троугла представљају двокомпонентне системе. За тачку унутар троугла, садржај сваке од компоненти се читава тако што се кроз дату тачку повуку линије паралелне странама троугла до преостале две стране троугла (слика 3.62.).



Слика 3.62. Одређивање састава смеше у тројном систему

Узорци су направљени од гранулата наведених материјала и везивног средства од полиуретанских смола. Изливени су у калупима пречника 100 mm и у дебљинама од 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm и 50 mm.

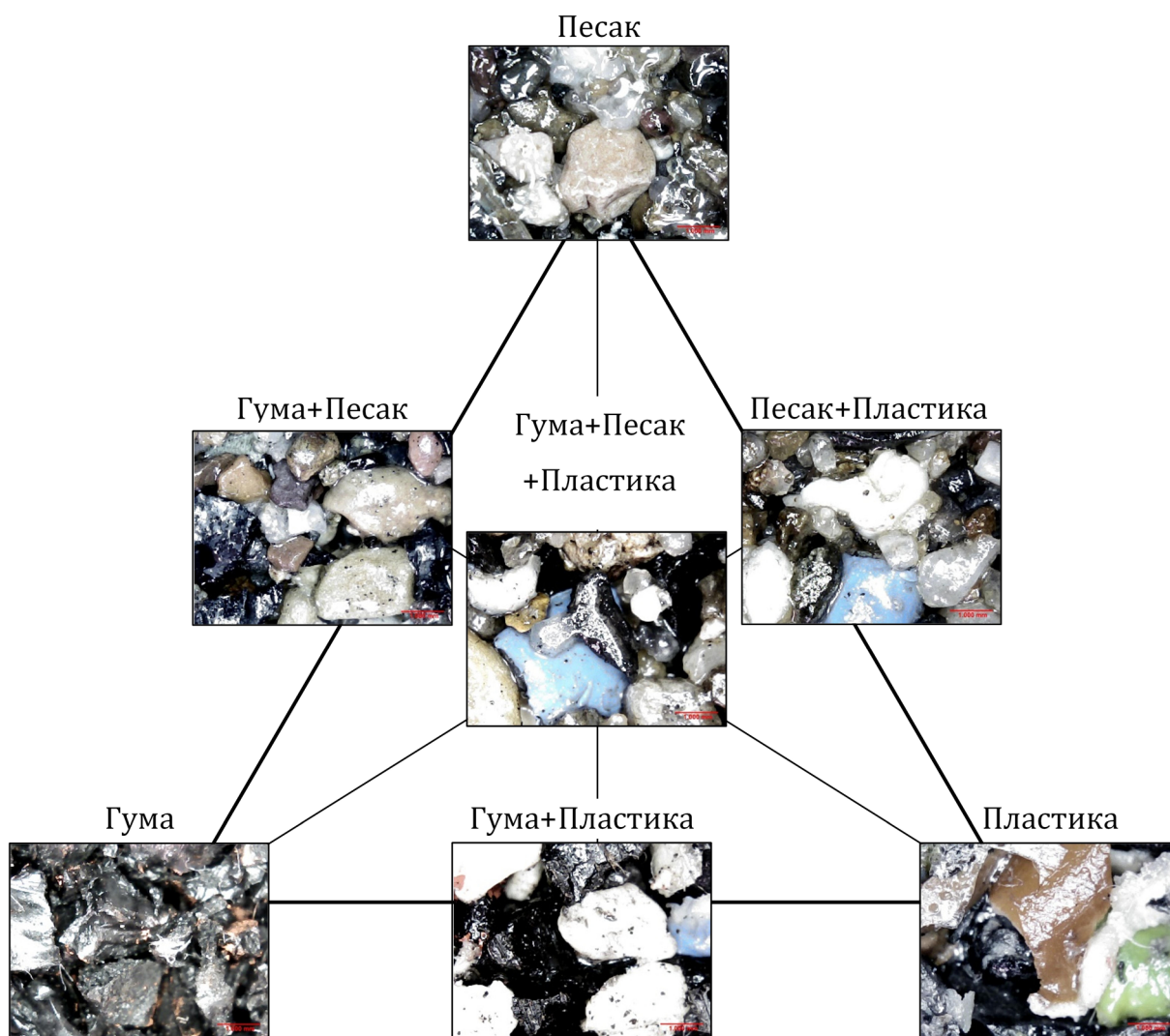


Слика 3.63. Тројни систем смеше (*Simplex centroid design*) састављен од компоненти песка, гранулата рециклиране гуме и гранулата рециклиране пластике

За експериментални план је одабрана комбинација смеша-процес тј. комбинација компоненти смеше и фактора процеса. За смеше је одабран трокомпонентни *Simplex-centroid design* (табела 3.33.) при чему су X_1 , X_2 и X_3 компонентни удели гуме, пластике и песка а Y је експериментална вредност коефицијента апсорпције.

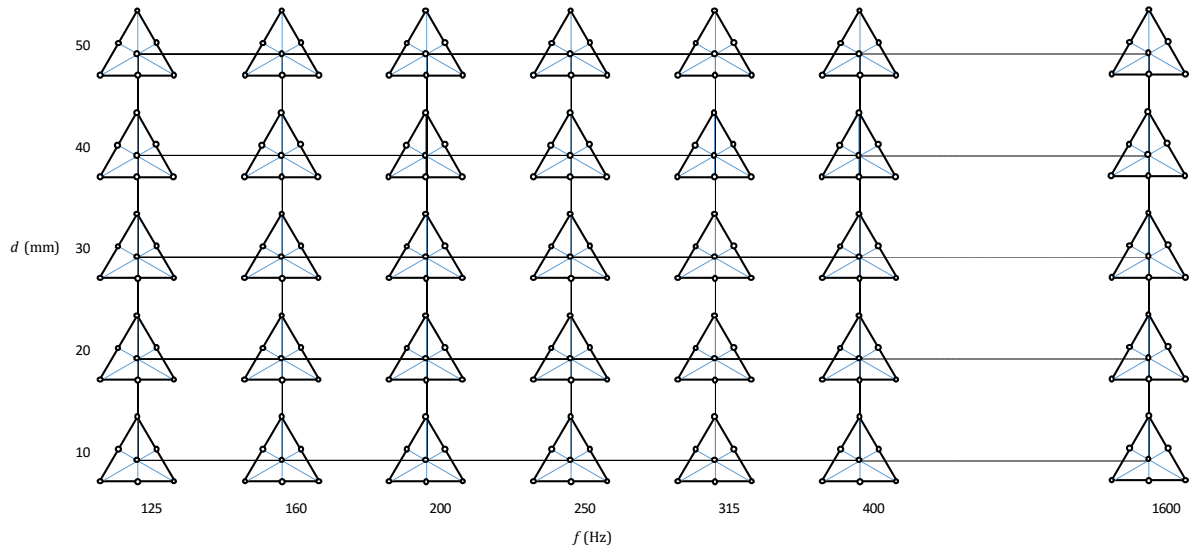
Табела 3.33. Трокомпонентни *Simplex centroid design*

р.бр.	X1	X2	X3	Y
1	1	0	0	
2	0	1	0	
3	0	0	1	
4	1/2	0	1/2	
5	1/2	1/2	0	
6	0	1/2	1/2	
7	1/3	1/3	1/3	

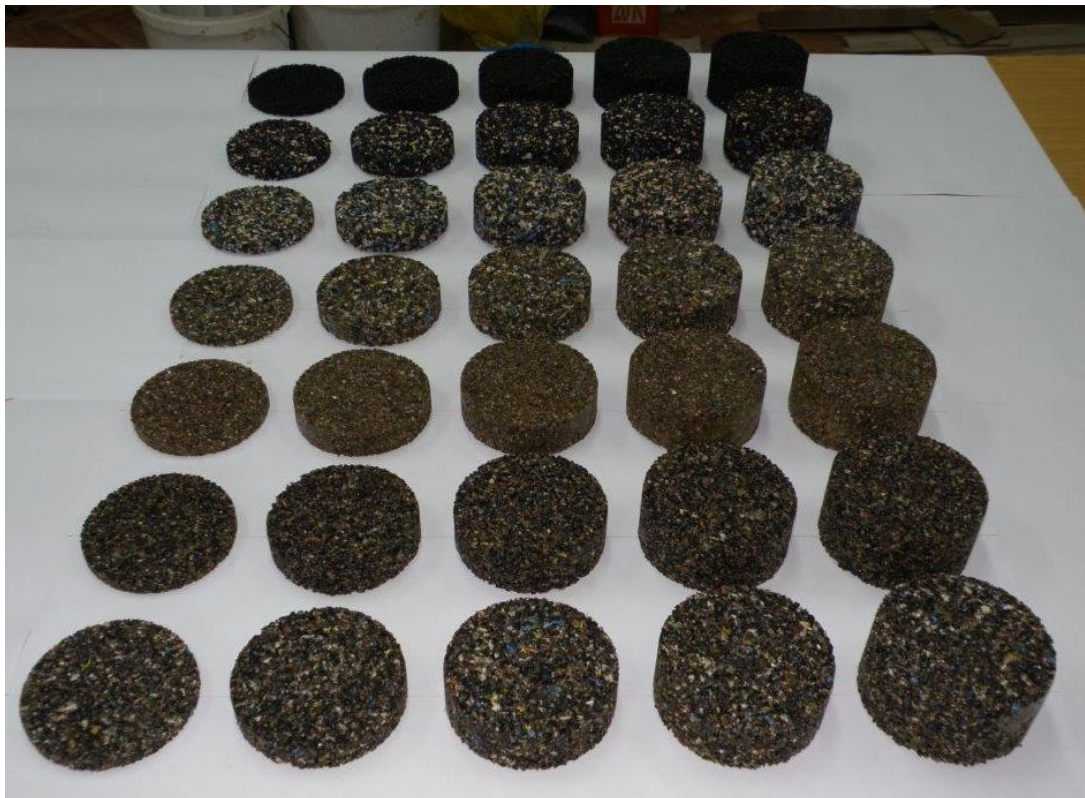


Слика 3.64. Микроскопска структура тројног система смеше

Као фактори процеса су укључени: дебљина материјала и фреквенција. Дебљина материјала је варирана за вредности 10, 20, 30, 40 и 50 mm што је захтевало израду 35 узорака за реализацију експеримената. Фреквенција је варирана по терцама и то: 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 и 1600 Hz. На тај начин се добија 420 експерименталних тачака (слика 3.65.).



Слика 3.65. Пројекат смеша-процес: седам мешавина зрнастих материјала (на троугловима) у 60 процесних комбинација (5 дебљина x 12 фреквенција на правоугаонику)



Слика 3.66. Узорци за комбиновани дизајн смеша-процес

3.6.2 Резултати мерења

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције тројних система смеше по терцама за различите дебљине материјала добијене мерењем у импедансној цеви су приказане у табели 3.34.

Табела 3.34. Вредности коефицијената апсорпције за комбиновани процесни и тројни систем смеше

	P	G	S	$\delta[m]$	α_{125}	α_{160}	α_{200}	α_{250}	α_{315}	α_{400}	α_{500}	α_{630}	α_{800}	α_{1000}	α_{1250}	α_{1600}
1	1	0	0	0.01	0.070452	0.045009	0.049988	0.039622	0.04424	0.0511	0.05196	0.054693	0.058152	0.073966	0.10531	0.13402
2	0	1	0	0.01	0.062079	0.046224	0.050688	0.033774	0.047438	0.052127	0.051058	0.057375	0.068572	0.077245	0.1062	0.14311
3	0	0	1	0.01	0.069242	0.060486	0.070067	0.051438	0.057444	0.057496	0.052838	0.045833	0.054505	0.06469	0.1003	0.11278
4	0.5	0	0.5	0.01	0.061304	0.036248	0.048701	0.036698	0.042091	0.043814	0.045054	0.051551	0.054799	0.073381	0.1089	0.1525
5	0.5	0.5	0	0.01	0.062953	0.04804	0.05439	0.044433	0.046279	0.049541	0.058912	0.05864	0.068345	0.081494	0.12031	0.17677
6	0	0.5	0.5	0.01	0.063384	0.047264	0.056085	0.037869	0.041937	0.053909	0.055349	0.054347	0.050953	0.060534	0.088065	0.12138
7	0.333333	0.333333	0.333333	0.01	0.063945	0.04625	0.047412	0.036987	0.045137	0.04031	0.046517	0.050349	0.060005	0.057798	0.091821	0.117
8	1	0	0	0.02	0.081595	0.061678	0.063427	0.053593	0.063935	0.07538	0.092672	0.11156	0.14845	0.22894	0.40526	0.71772
9	0	1	0	0.02	0.061709	0.048147	0.064102	0.043948	0.051707	0.067505	0.069412	0.086028	0.11138	0.14664	0.24529	0.41097
10	0	0	1	0.02	0.096456	0.075953	0.076318	0.067965	0.073531	0.092069	0.1029	0.12281	0.16871	0.22988	0.31607	0.38652
11	0.5	0	0.5	0.02	0.076063	0.058565	0.061085	0.043429	0.051713	0.065842	0.069842	0.090939	0.12477	0.20207	0.39709	0.76784
12	0.5	0.5	0	0.02	0.070525	0.057695	0.067191	0.056772	0.067988	0.072218	0.088029	0.095433	0.12375	0.17236	0.29117	0.50631
13	0	0.5	0.5	0.02	0.069716	0.053088	0.056022	0.040519	0.053535	0.06044	0.063834	0.079099	0.095854	0.13028	0.22188	0.42656
14	0.333333	0.333333	0.333333	0.03	0.055764	0.049572	0.058652	0.050239	0.055844	0.054032	0.062872	0.080362	0.1023	0.14315	0.24061	0.45639
15	1	0	0	0.03	0.063608	0.060597	0.075185	0.073073	0.086204	0.10281	0.13902	0.19746	0.31262	0.54481	0.89514	0.91522
16	0	1	0	0.03	0.074983	0.061382	0.071529	0.060364	0.078651	0.08809	0.11152	0.14524	0.20821	0.31118	0.54574	0.85543
17	0	0	1	0.03	0.083674	0.072598	0.084838	0.077476	0.096708	0.1366	0.19858	0.32756	0.41452	0.31575	0.22462	0.25632
18	0.5	0	0.5	0.03	0.070199	0.055836	0.066542	0.056816	0.066865	0.07809	0.10382	0.14289	0.24503	0.47612	0.86704	0.72912
19	0.5	0.5	0	0.03	0.061029	0.04762	0.068866	0.065002	0.083531	0.10365	0.13602	0.19208	0.29267	0.49274	0.83553	0.93465
20	0	0.5	0.5	0.03	0.082031	0.063325	0.072213	0.052395	0.069477	0.081273	0.10389	0.14802	0.22557	0.40767	0.77296	0.85942
21	0.333333	0.333333	0.333333	0.03	0.093553	0.065694	0.075066	0.063166	0.078213	0.092387	0.11411	0.15065	0.22941	0.37302	0.68961	0.9415
22	1	0	0	0.04	0.062299	0.067244	0.075543	0.081245	0.096306	0.1223	0.16619	0.23917	0.39413	0.66599	0.93225	0.82113
23	0	1	0	0.04	0.079582	0.072933	0.088792	0.095229	0.11827	0.17284	0.23979	0.36262	0.5924	0.85416	0.91899	0.72432
24	0	0	1	0.04	0.10345	0.094052	0.11187	0.11633	0.14634	0.20372	0.2868	0.34987	0.30303	0.24638	0.22934	0.26097
25	0.5	0	0.5	0.04	0.072322	0.061728	0.073841	0.073893	0.08784	0.12287	0.16892	0.27597	0.52809	0.83943	0.6975	0.40698
26	0.5	0.5	0	0.04	0.074103	0.06105	0.081838	0.096466	0.11467	0.1599	0.22956	0.35045	0.5957	0.89451	0.93591	0.6952
27	0	0.5	0.5	0.04	0.079104	0.073428	0.082008	0.084074	0.10526	0.14418	0.22217	0.38276	0.68574	0.77131	0.5062	0.34599
28	0.333333	0.333333	0.333333	0.05	0.078842	0.063172	0.083348	0.081497	0.10005	0.13135	0.18318	0.28177	0.49341	0.80483	0.86998	0.61551
29	1	0	0	0.05	0.11737	0.10029	0.12036	0.13322	0.1578	0.21353	0.30182	0.46519	0.76533	0.9724	0.79133	0.54213
30	0	1	0	0.05	0.078801	0.082575	0.093929	0.10363	0.13687	0.20107	0.28714	0.44561	0.72293	0.95535	0.87541	0.65755
31	0	0	1	0.05	0.099541	0.088581	0.1124	0.12575	0.17251	0.27152	0.3808	0.38066	0.26895	0.20439	0.21299	0.25652
32	0.5	0	0.5	0.05	0.085966	0.071743	0.080933	0.087975	0.11026	0.16642	0.24218	0.41564	0.77134	0.86565	0.53466	0.3452
33	0.5	0.5	0	0.05	0.081423	0.074295	0.10126	0.10585	0.14486	0.21671	0.31949	0.50702	0.79872	0.96045	0.80367	0.59629
34	0	0.5	0.5	0.05	0.10515	0.083843	0.097138	0.10215	0.13526	0.19889	0.32398	0.56417	0.71148	0.49569	0.31468	0.2951
35	0.333333	0.333333	0.333333	0.05	0.11707	0.10131	0.11433	0.11487	0.14927	0.21394	0.32696	0.55335	0.82444	0.72728	0.46751	0.37305

3.6.3 Обрада и анализа експерименталних резултата

а) Стохастички модели

Методологија за избор оптималног математичког модела се спроводи по истом алгоритму који је описан у поглављу 3.3.2 с тим да се бира оптимална комбинација математичког модела смеше и математичког модела процеса. Оба модела су у облику вишеструких полинома (узимају се полиноми до трећег степена) као и збирни полином који може бити највише шестог степена.

У поступку обраде и анализе података спроведена су два поступка:

- формиран су појединачни математички модели по терцама (табела 3.35.-а), и
- формиран је збирни (интегрални) модел смеша-процес (табела 3.35.-б).

На основу обрађених података у софтверском пакету *Design Expert* добијени су математички модели зависности коефицијента апсорпције од процентуалног удела сваке

компоненте у смеши, од фреквенције и од дебљине. Добијени модели су сигнификантни и доказују да је корелација испитиваних зависности изузетно висока.

Статистике на основу којих се оцењује адекватност математичког модела имају веома високе вредности (табела 3.38.) те се може закључити да добијени математички модели имају висок ниво поверења.

Када су у питању смеше састављене од компоненти песка, рециклиране гуме и рециклиране пластике, могу се у начелу констатовати следећа правила:

- на фреквенцијама до 1000 Hz вредност коефицијента апсорпције углавном расте са дебљином материјала,
- на фреквенцијама изнад 1000 Hz, у зависности од структуре смеше, повећање дебљине материјала до 30 mm има позитиван утицај на коефицијент апсорпције а даље повећање дебљине материјала смањује вредност коефицијента апсорпције,
- песак има знатно мању ефикасност по питању коефицијента апсорпције у односу на остале компоненте смеше и удео чисте компоненте песка не може остварити вредност апсорпције већу од 0,5. Међутим, позитивна особина песка је да је он ефикаснији на нижим фреквенцијама,
- компоненте гуме и пластике имају веома сличне карактеристике. Њихов утицај на повећање коефицијента апсорпције је веома мали на нижим фреквенцијама али је зато веома висок на фреквенцијама преко 1000 Hz.

Табела 3.35.-а Збирни преглед математичких модела смеше зрнастих материјала по терцним фреквенцијама

Терцна фреквенција (Hz)	Математички модел	Вредност статистичких параметара за оцену модела					
		C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
125	$(\alpha_{125})^{-1.28} = +61.88431*P + 27.67969*G + 52.01116*S - 4840.01503*P*d + 1401.25066*G*d - 2726.01909*S*d + 2.06930E+005*P*d^2 - 66724.86313*G*d^2 + 81451.72538*S*d^2 - 2.54964E+006*P*d^3 + 7.54230E+005*G*d^3 - 8.05123E+005*S*d^3$	15.30	782.89	0.7040	0.5624	0.4352	7.153
160	$1/\text{Sqrt}(\alpha_{160}) = +4.94953*P + 5.04627*G + 4.14096*S - 0.91433*P*G + 2.66703*P*S - 32.61492*P*d + 1.17609*G*S - 31.76502*G*d - 17.59514*S*d + 49.34509*P*G*d - 28.66599*P*S*d - 22.24530*G*S*d$	6.19	3.10	0.8275	0.7450	0.6264	11.155
200	$1/\text{Sqrt}(\alpha_{200}) = +4.75545*P + 4.61465*G + 4.00613*S - 0.35133*P*G + 1.40435*P*S - 34.44392*P*d + 1.49696*G*S - 28.82970*G*d - 21.51766*S*d + 9.48569*P*G*d + 5.03182*P*S*d - 20.69385*G*S*d$	4.33	1.33	0.9196	0.8811	0.8811	16.291
250	$1/\text{Sqrt}(\alpha_{250}) = +5.47615*P + 6.02718*G + 4.79794*S - 2.34677*P*G + 2.28668*P*S - 53.97846*P*d + 1.58263*G*S - 63.42793*G*d - 42.71338*S*d + 57.72495*P*G*d$	4.45	1.53	0.9630	0.9497	0.9278	28.871
315	$1/\text{Sqrt}(\alpha_{315}) = +5.02078*P + 5.19563*G + 4.63281*S + 2.11675*P*S - 49.38945*P*d + 1.41308*G*S - 53.14679*G*d - 47.13696*S*d$	4.88	1.32	0.9581	0.9473	0.9338	30.897
400	$\text{Ln}(\alpha_{400}) = -3.29186*P - 3.37726*G - 3.11783*S - 1.39301*P*S + 33.39879*P*d - 1.00944*G*S + 36.51758*G*d + 36.77398*S*d$	6.22	0.80	0.9460	0.9321	0.9221	28.134
500	$\text{Ln}(\alpha_{500}) = -3.21449*P - 3.46248*G - 3.24134*S - 1.51182*P*S + 39.39859*P*d - 0.88253*G*S + 46.26361*G*d + 48.14265*S*d$	8.56	1.31	0.9463	0.9324	0.9169	27.596

Табела 3.35.-а Збирни преглед математичких модела смеше зрнастих материјала по терчним фреквенцијама (наставак)

Терчна фреквенција (Hz)	Математички модел	Вредност статистичких параметара за оцену модела					
		C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
630	$1/\sqrt{\alpha_{630}} = +5.53972*P + 5.30844*G + 6.98408*S - 2.90289*P*S - 149.05820*P*d - 2.95691*G*S - 115.09578*G*d - 270.16388*S*d + 357.55448*P*S*d + 350.83210*G*S*d + 1385.34065*P*d^2 + 730.36686*G*d^2 + 3284.88119*S*d^2 - 5954.85800*P*S*d^2 - 6156.05860*G*S*d^2$	9.99	3.60	0.9649	0.9403	0.9098	18.916
800	$\ln(\alpha_{800}) = -3.77271*P - 3.42957*G - 4.65830*S + 2.22929*P*S + 106.41870*P*d + 0.46305*G*S + 70.00147*G*d + 201.56239*S*d - 286.50024*P*S*d - 169.45128*G*S*d - 752.62303*P*d^2 - 103.80862*G*d^2 - 2709.16751*S*d^2 + 5592.04317*P*S*d^2 + 3896.73932*G*S*d^2$	19.09	3.49	0.9472	0.9102	0.8830	15.486
1000	$\sqrt{\alpha_{1000}} = +0.092256*P + 0.031084*G + 0.26795*S + 19.66709*P*d + 19.65256*G*d + 6.89378*S*d$	16.35	0.42	0.8761	0.8548	0.8164	20.829
1250	$\ln(\alpha_{1250}) = -4.00111*P - 3.78337*G - 3.42055*S + 207.87450*P*d + 158.66675*G*d + 138.95995*S*d - 2603.43745*P*d^2 - 1718.52260*G*d^2 - 2051.97204*S*d^2$	29.92	3.51	0.8942	0.8616	0.8423	16.493
1600	$\ln(\alpha_{1600}) = -5.42786*P - 4.09109*G - 5.85857*S + 473.76329*P*d + 264.47458*G*d + 522.60665*S*d - 13015.74452*P*d^2 - 5592.74887*G*d^2 - 16975.34913*S*d^2 + 1.09751E+005*P*d^3 + 34644.96031*G*d^3 + 1.65862E+005*S*d^3$	25.50	2.33	0.9202	0.8820	0.8496	16.201

Табела 3.35.-6 Збирни преглед математичких модела смеше зрнастих материјала по терцним фреквенцијама (наставак)

Терцна фреквенција (Hz)	Математички модел	Вредност статистичких параметара за оцену модела					
		C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
Интегрални модел	$\begin{aligned} \text{Ln}(\alpha) = & -2.56640 * P - 1.36029 * G - 2.66358 * S + 39.29944 * P * d - 6.46000 E - \\ & 003 * P * f - 164.30258 * G * d - 4.94937 E - 003 * G * f - 17.58893 * S * d - \\ & 2.81482 E - 003 * S * f + 0.29564 * P * d * f + 0.25853 * G * d * f + 0.22940 * S * d * f - \\ & 3113.77780 * P * d ^ 2 + 6.16287 E - 006 * P * f ^ 2 + 4958.39446 * G * d ^ 2 \\ & + 4.19122 E - 006 * G * f ^ 2 + 240.05123 * S * d ^ 2 + 1.53284 E - 006 * S * f ^ 2 - \\ & 2.37633 * P * d ^ 2 * f - 8.02769 E - 005 * P * d * f ^ 2 - 1.59404 * G * d ^ 2 * f - \\ & 8.39546 E - 005 * G * d * f ^ 2 - 1.79297 * S * d ^ 2 * f - 7.50789 E - 005 * S * d * f ^ 2 \\ & + 44834.75170 * P * d ^ 3 - 1.73298 E - 009 * P * f ^ 3 - 47640.77867 * G * d ^ 3 - \\ & 9.18196 E - 010 * G * f ^ 3 \end{aligned}$	11.90	25.72	0.9367	0.9323	0.9264	54.737

Табела 3.36. Табела збирних статистичких података за избор математичких модела

Combined Model Mixture Process Fit Summary Table							
Mix Order	Process Order	Sequential p-value			Summary Statistics		
		Mix	Process	Lack of Fit	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
M	M						
M	L		< 0.0001	0.2831	0.7726	0.7695	
M	2FI		< 0.0001	0.3540	0.7857	0.7805	
M	Q		< 0.0001	0.5714	0.8172	0.8119	
M	C		< 0.0001	0.9979	0.9048	0.9013	
M	M						
L	M	0.7146		< 0.0001	-0.0032	-0.0123	
L	L	< 0.0001	< 0.0001	0.3806	0.7901	0.7832	
L	2FI	< 0.0001	< 0.0001	0.4895	0.8063	0.7918	
L	Q	< 0.0001	< 0.0001	0.7330	0.8379	0.8236	
L	C	< 0.0001	< 0.0001	1.0000	0.9322	0.9254	Suggested
L	M						
Q	M	0.8410		< 0.0001	-0.0084	-0.0252	
Q	L	0.0560	< 0.0001	0.4051	0.7940	0.7790	
Q	2FI	0.1429	< 0.0001	0.5077	0.8088	0.7732	
Q	Q	0.2644	< 0.0001	0.7436	0.8393	0.8022	
Q	C	< 0.0001	< 0.0001	1.0000	0.9414	0.9212	Suggested
Q	M						
SC	M	0.9999		< 0.0001	-0.0109	-0.0304	
SC	L	0.1591	< 0.0001	0.4124	0.7951	0.7766	
SC	2FI	0.1386	< 0.0001	0.5183	0.8102	0.7651	
SC	Q	0.1047	< 0.0001	0.7580	0.8412	0.7934	
SC	C	* < 0.0001	* < 0.0001	1.0000	0.9472	0.9166	Aliased
SC	M						
C	M	*	*	< 0.0001	-0.0109	-0.0304	Aliased
C	L	*	* < 0.0001	0.4124	0.7951	0.7766	Aliased
C	2FI	*	* < 0.0001	0.5183	0.8102	0.7651	Aliased
C	Q	*	* < 0.0001	0.7580	0.8412	0.7934	Aliased
C	C	*	* < 0.0001	1.0000	0.9472	0.9166	Aliased

Да би се побољшали резултати анализе тј. да би се обезбедило да резидуали имају нормалну расподелу, било је неопходно извршити трансформацију функције одговора помоћу “Natural Log” трансформације (константа $k=0$, и $\lambda=0$). Након редукције несигнификантних чланова из предложеног модела урађена је анализа варијанси (ANOVA)-табела 3.37.

Висока F вредност модела ($F= 214,82$) и ниска вредност вероватноће ($p=0,001$) указују да је модел сигнификантан. Коефицијент детерминације (R -Squared) и остале статистике (табела 3.38.) имају добре вредности што потврђује оправданост избора усвојеног математичког модела.

Како је коефицијент апсорпције изражен у функцији од 5 независних променљивих и представља веома сложен математички модел, то је његово тумачење на основу једначине

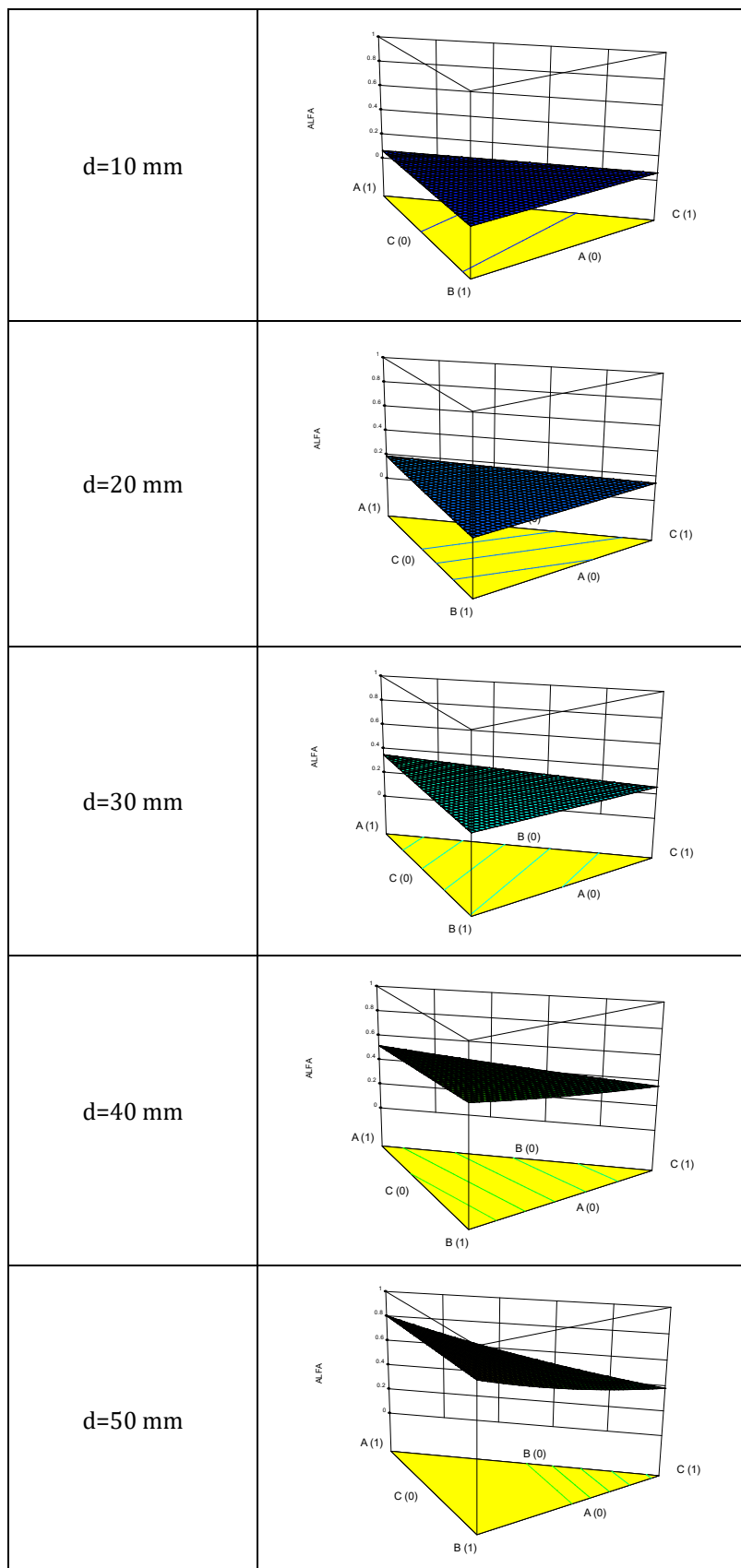
дате у табели 3.35.-б веома компликовано. Међутим, софтверски пакет *Design Expert* има могућност да на графичком приказу *модела смеше* динамички покаже одзив функције на промену фреквенције и дебљине материјала чиме се може закључити какав је утицај појединих параметара модела. На слици 3.67. је приказана промена коефицијента апсорпције у тројном систему смеше за различите дебљине материјала и за изабрану вредност фреквенције $f=862,5$ Hz. Исту анализу је могуће урадити за било коју другу вредност фреквенције.

Табела 3.37. ANOVA извештај за одабрану комбинацију математичких модела

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	327.41	27	12.13	214.82	< 0.0001	significant
<i>Linear Mixture</i>	0.56	2	0.28	4.99	0.0073	
AD	0.059	1	0.059	1.04	0.3077	
AE	3.50	1	3.50	61.95	< 0.0001	
BD	1.03	1	1.03	18.23	< 0.0001	
BE	2.05	1	2.05	36.36	< 0.0001	
CD	0.070	1	0.070	1.25	0.2650	
CE	1.36	1	1.36	24.18	< 0.0001	
ADE	7.67	1	7.67	135.87	< 0.0001	
BDE	5.87	1	5.87	103.90	< 0.0001	
CDE	4.62	1	4.62	81.80	< 0.0001	
AD ²	0.29	1	0.29	5.22	0.0228	
AE ²	2.50	1	2.50	44.27	< 0.0001	
BD ²	0.75	1	0.75	13.25	0.0003	
BE ²	1.16	1	1.16	20.48	< 0.0001	
CD ²	0.052	1	0.052	0.93	0.3367	
CE ²	1.34	1	1.34	23.77	< 0.0001	
AD ² E	2.91	1	2.91	51.47	< 0.0001	
ADE ²	4.08	1	4.08	72.26	< 0.0001	
BD ² E	1.31	1	1.31	23.16	< 0.0001	
BDE ²	4.46	1	4.46	79.03	< 0.0001	
CD ² E	1.65	1	1.65	29.30	< 0.0001	
CDE ²	3.57	1	3.57	63.20	< 0.0001	
AD ³	0.51	1	0.51	9.09	0.0027	
AE ³	1.43	1	1.43	25.28	< 0.0001	
BD ³	0.58	1	0.58	10.26	0.0015	
BE ³	0.40	1	0.40	7.10	0.0080	
Residual	22.13	392	0.056			
<i>Lack of Fit</i>	18.37	368	0.050	0.32	1.0000	not significant
<i>Pure Error</i>	3.76	24	0.16			
Cor Total	349.54	419				

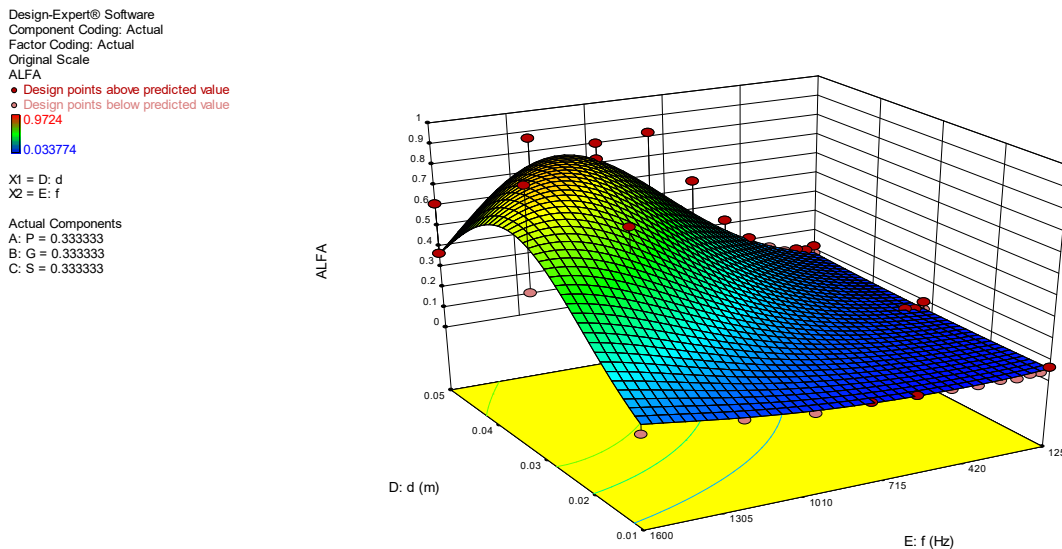
Табела 3.38. Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0.24	R-Squared	0.9367
Mean	-2.00	Adj R-Squared	0.9323
C.V. %	11.90	Pred R-Squared	0.9264
PRESS	25.72	Adeq Precision	54.737

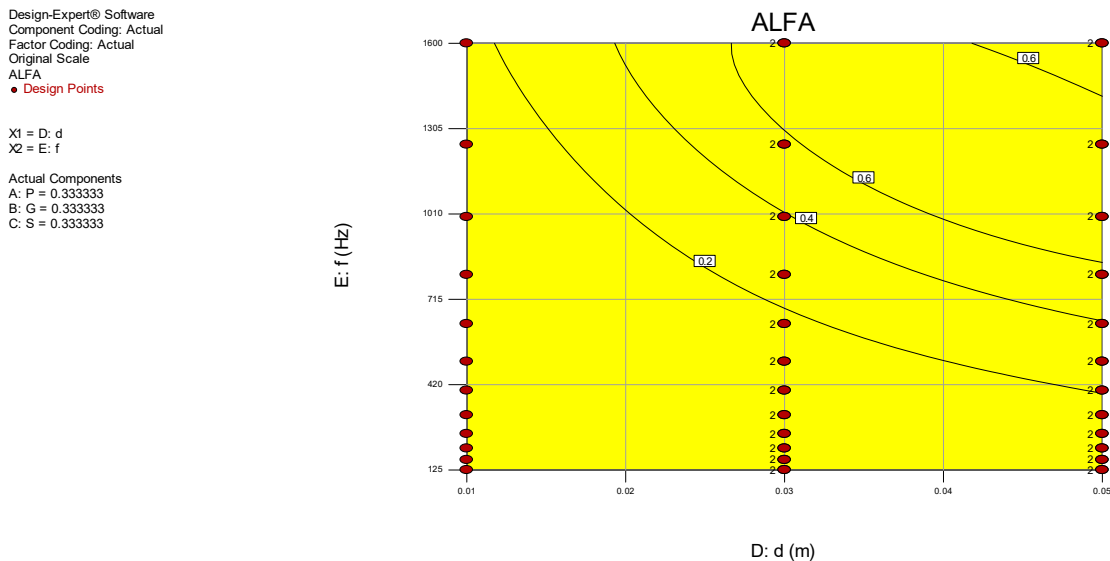


Слика 3.67. Графички приказ математичког модела тројног система смеше у зависности од промене дебљине материјала (d) за одабрану вредност фреквенције $f=862,5$ Hz

Варирањем појединачних параметара могу се уочити и друге зависности између анализираних фактора (слике 3.68. до 3.72.).



Слика 3.68. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од фреквенције и дебљине материјала за смешу са подједнаким уделима појединачних компоненти ($P=1/3, G= 1/3, S= 1/3$)



Слика 3.69. Контурни дијаграм промене коефицијента апсорпције у зависности од фреквенције и дебљине материјала за смешу са подједнаким уделима појединачних компоненти ($P=1/3, G= 1/3, S= 1/3$)

Design-Expert® Software
Component Coding: Actual
Factor Coding: Actual
Original Scale

ALFA

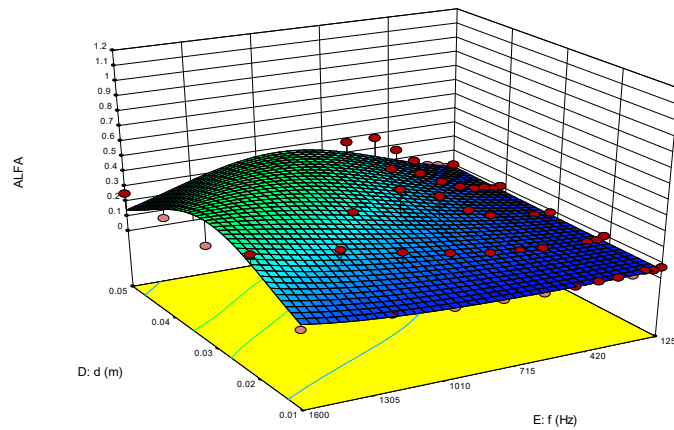
● Design points above predicted value
● Design points below predicted value

0.9724
0.033774

X1 = D: d
X2 = E: f

Actual Components

A: P = 0
B: G = 0
C: S = 1



Design-Expert® Software
Component Coding: Actual
Factor Coding: Actual
Original Scale

ALFA

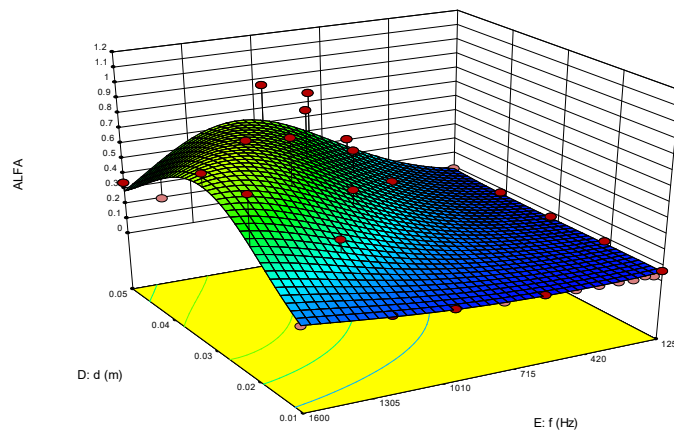
● Design points above predicted value
● Design points below predicted value

0.9724
0.033774

X1 = D: d
X2 = E: f

Actual Components

A: P = 0.5
B: G = 0
C: S = 0.5



Design-Expert® Software
Component Coding: Actual
Factor Coding: Actual
Original Scale

ALFA

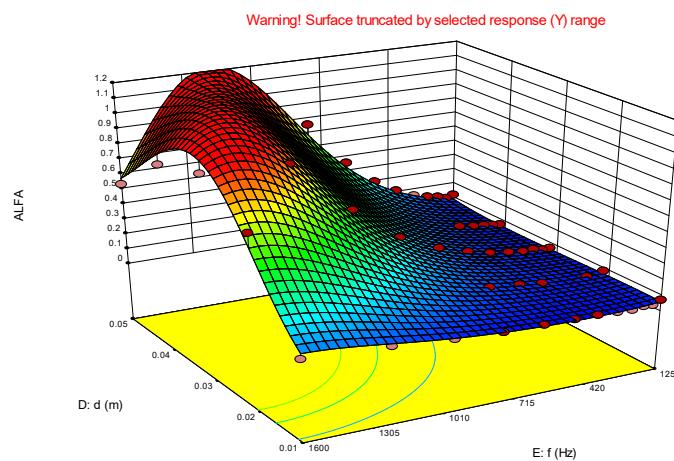
● Design points above predicted value
● Design points below predicted value

0.9724
0.033774

X1 = D: d
X2 = E: f

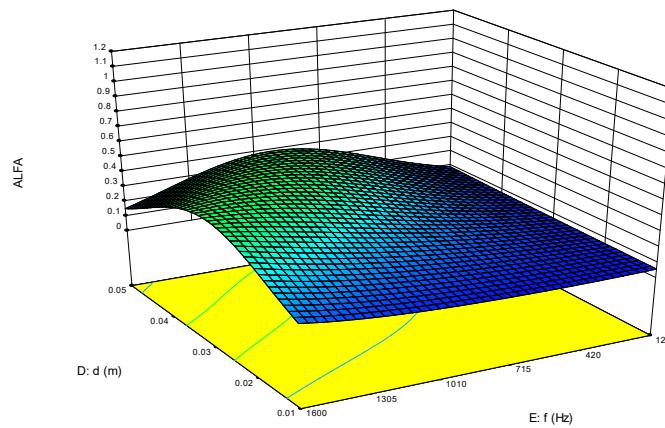
Actual Components

A: P = 1
B: G = 0
C: S = 0

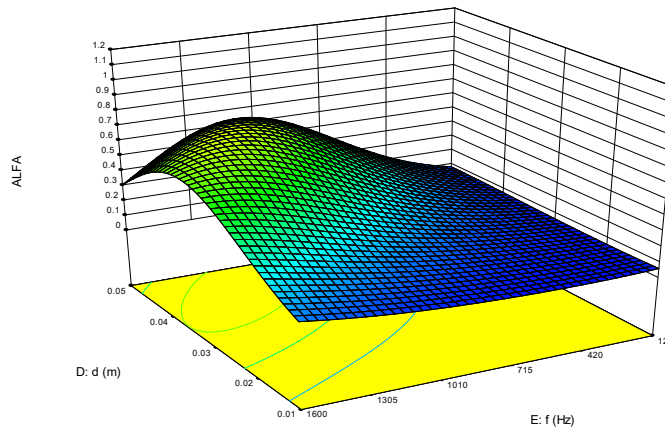


Слика 3.70. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела пластике:
а) 0%, б) 50% и в) 100%

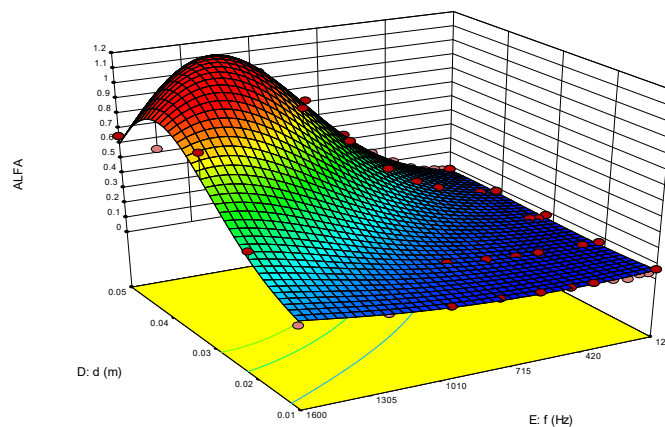
Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0.0405405
 B: G = 0
 C: S = 0.959459



Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0.0405405
 B: G = 0.5
 C: S = 0.459459

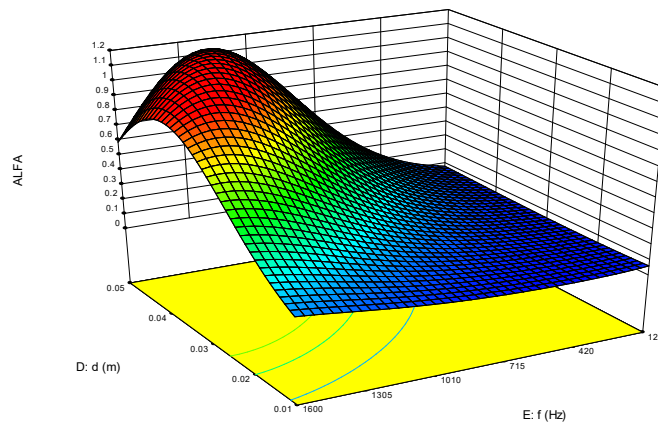


Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0
 B: G = 1
 C: S = 0

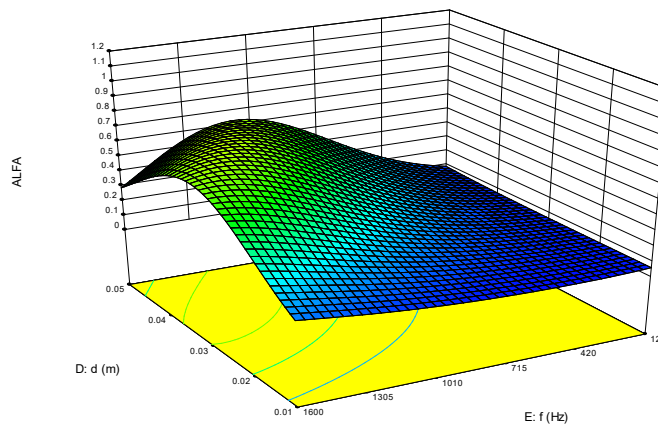


Слика 3.71. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела рециклиране гуме: а) 0%, б) 50% и в) 100%

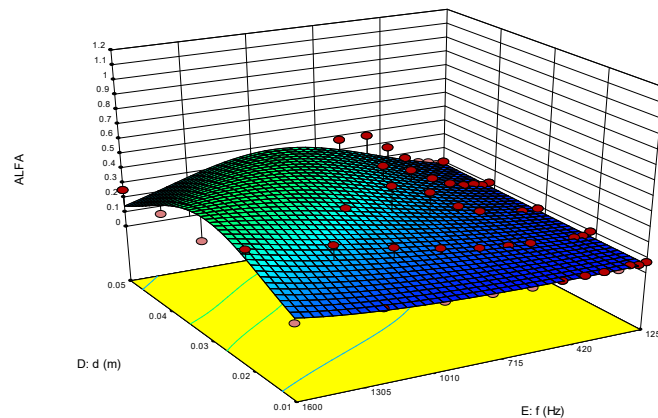
Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0.33333
 B: G = 0.66667
 C: S = 0



Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0.33333
 B: G = 0.16667
 C: S = 0.5



Design-Expert® Software
 Component Coding: Actual
 Factor Coding: Actual
 Original Scale
 ALFA
 ● Design points above predicted value
 ● Design points below predicted value
 0.9724
 0.033774
 X1 = D: d
 X2 = E: f
 Actual Components
 A: P = 0
 B: G = 0
 C: S = 1

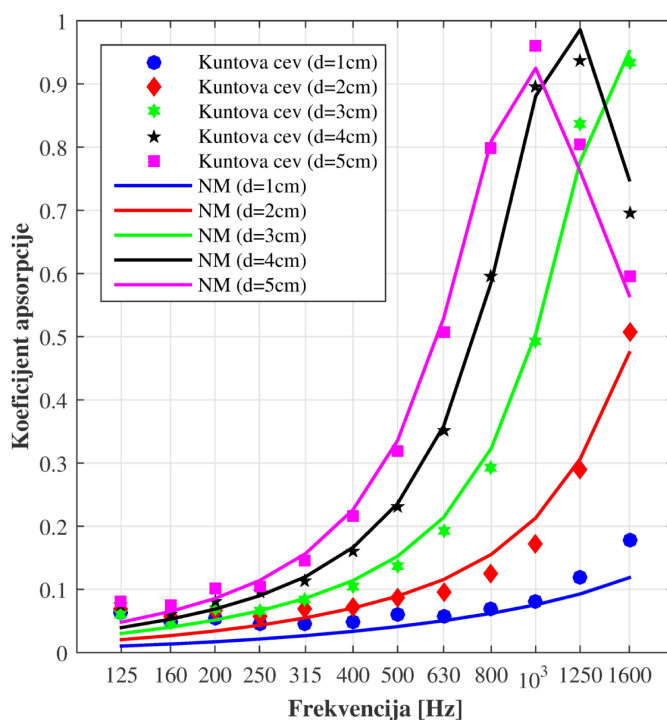


Слика 3.72. 3D приказ промене коефицијента апсорпције у зависности од процентуалног удела песка:
 а) 0%, б) 50% и в) 100%

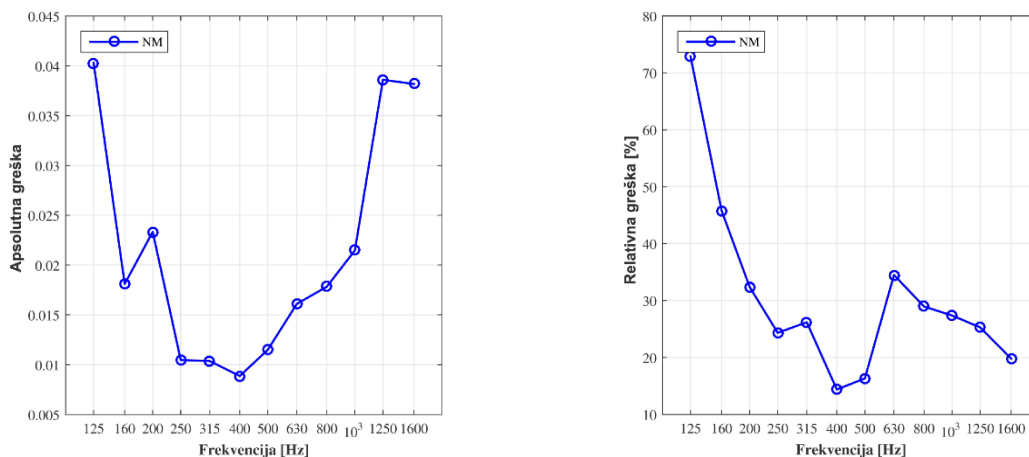
б) Емпиријски макроскопски модели

Табела 3.39. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-пластика

Материјал	РЕЦ. ГУМА 50% + РЕЦ. ПЛАСТИКА 50%	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	7255	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.270 \cdot C^{1.283}) - i(0.0139 \cdot C^{1.757}) \right]$	(3.63)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.064 \cdot C^{1.157}) + i(1 + 0.680 \cdot C^{0.137}) \right]$	(3.64)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0213	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	19.12	



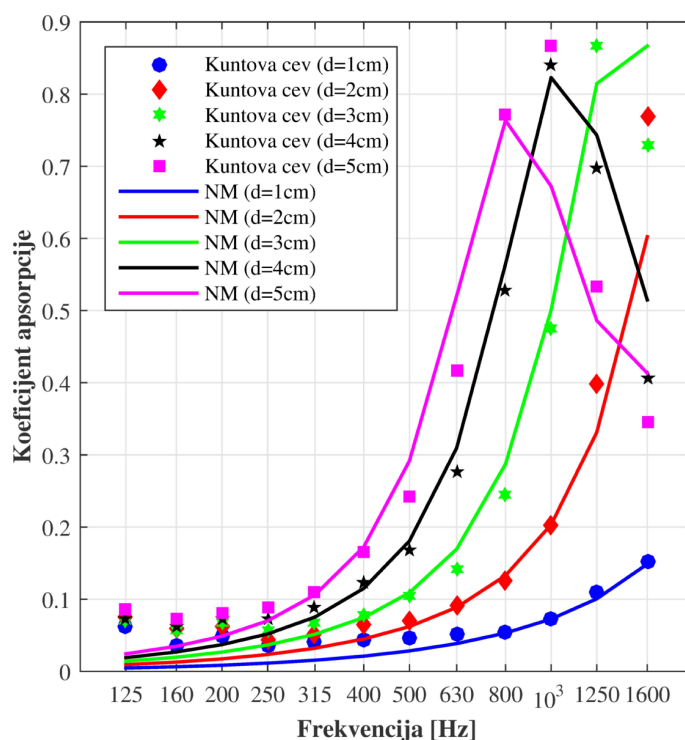
Слика 3.73. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције



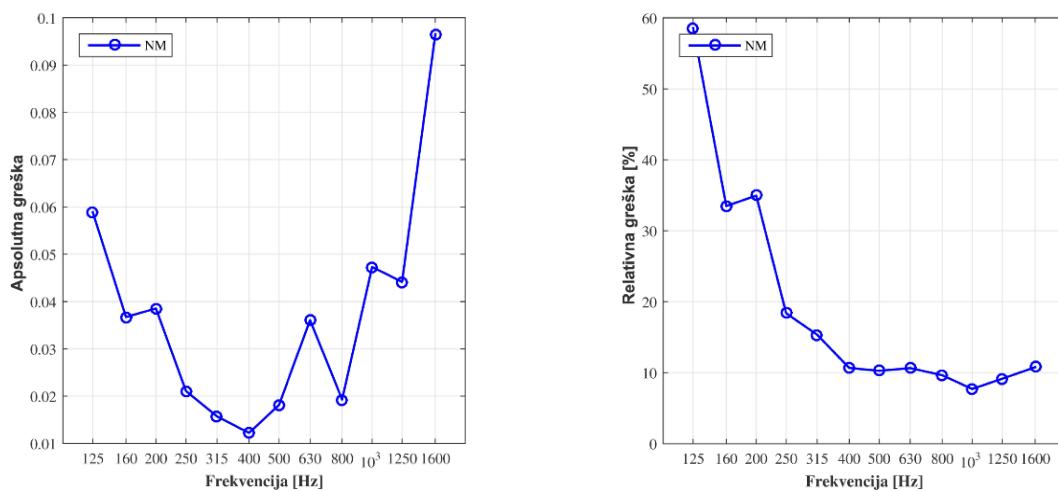
Слика 3.74. Апсолутне и релативне грешке модела

Табела 3.40. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше пластика-песак

Материјал	РЕЦ, ПЛАСТИКА 50% + ПЕСАК 50%	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, γ [Pas/m ²]	30779	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.570 \cdot C^{0.675}) - i(2.45E - 06 \cdot C^{0.343}) \right]$	(3.65)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.187 \cdot C^{0.331}) + i(1 + 0.680 \cdot C^{0.126}) \right]$	(3.66)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0371	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	30.82	



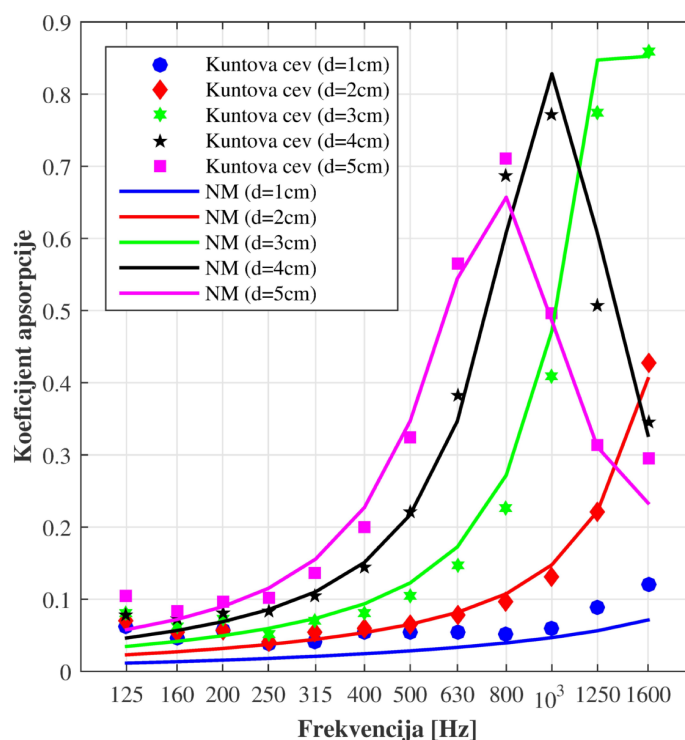
Слика 3.75. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције



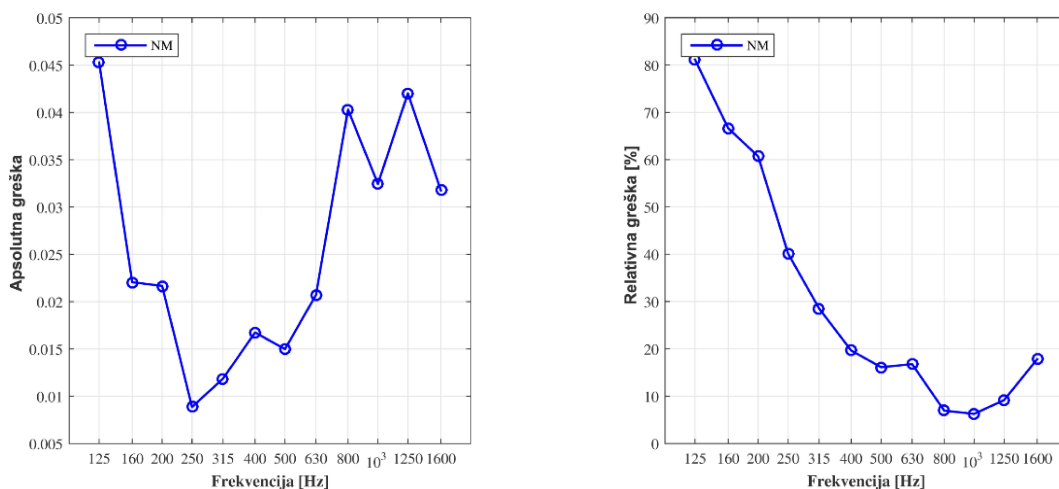
Слика 3.76. Апсолутне и релативне грешке модела

Табела 3.41. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-песак

Материјал	ПЕСАК 50% + РЕЦИКЛИРАНА ГУМА 50%	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	23505	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.570 \cdot C^{0.833}) - i(2.39E - 05 \cdot C^{0.488}) \right]$	(3.67)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.113 \cdot C^{1.168}) + i(1 + 0.358 \cdot C^{0.401}) \right]$	(3.68)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0257	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	22.71	



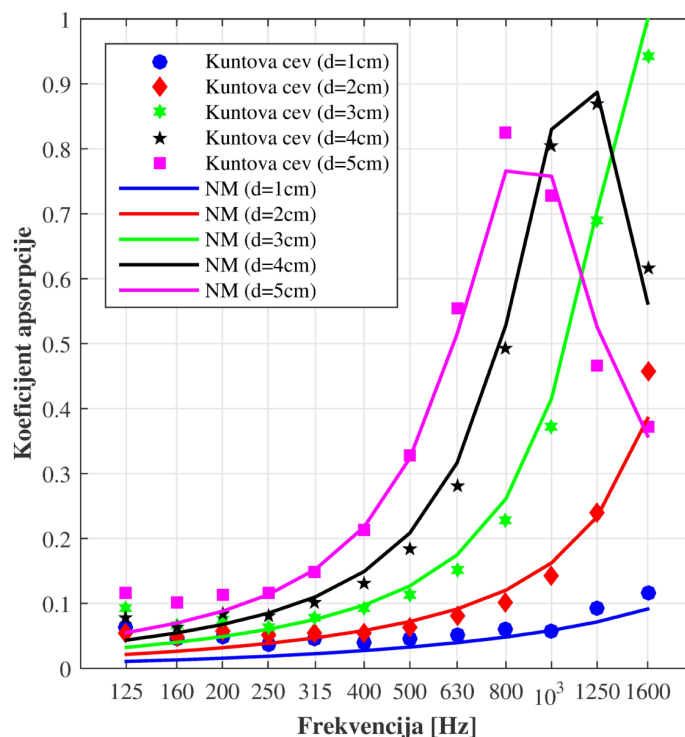
Слика 3.77. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције



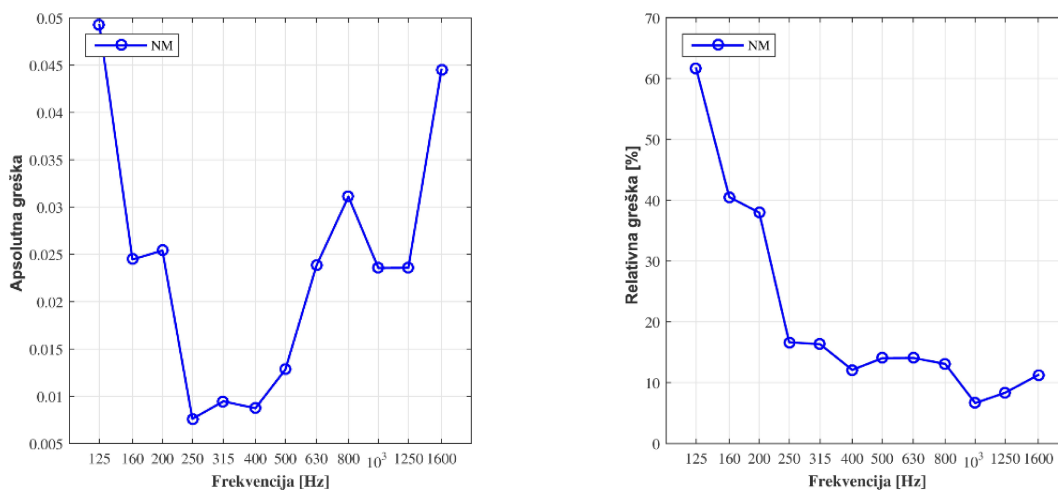
Слика 3.78. Апсолутне и релативне грешке модела

Табела 3.42. Емпиријски модел за одређивање акустичких својстава смеше гума-пластика-песак

Материјал	РЕЦ. ГУМА 33.3% + РЕЦ. ПЛАС. 33.3% + ПЕСАК 33.3%	Ознака
Подужна отпорност струјању ваздуха, r [Pas/m ²]	16879	
Карактеристична импеданса, Z_c	$Z_c = \rho_0 c_0 \left[(1 + 0.570 \cdot C^{0.825}) - i(0.0014 \cdot C^{0.937}) \right]$	(3.69)
Коефицијент простирања, γ	$\gamma = \frac{2\pi f}{c_0} \left[(0.033 \cdot C^{0.980}) + i(1 + 0.362 \cdot C^{0.361}) \right]$	(3.70)
Коефицијент апсорпције EN 12354-6:2003	$\alpha_s = \int_0^{\pi/2} \alpha_\varphi \sin 2\varphi d\varphi$	
Средња апсолутна грешка, $\Delta \bar{\alpha}$	0.0237	
Средња релативна грешка, $\bar{\varepsilon}$ [%]	21.05	



Слика 3.79. Емпиријске и експерименталне вредности коефицијента апсорпције



Слика 3.80. Апсолутне и релативне грешке модела

3.7. Апсорпциона својства вишеслојних зрнастих материјала

У претходном делу је показано да рециклирани материјали као што су гума и пластика имају изузетна апсорпциона својства. Такође је установљено да њихова комбинација с песком даје веома интересантне резултате и могућност да се на нижим фреквенцијама оствари знатно виши коефицијент апсорпције.

Међутим, прављење одговарајуће смеше за сваки конкретан случај је веома комплексан задатак. Зато се дошло на идеју да се зрнасти материјали комбинују у слојевима чистих компоненти. Примена вишеслојних апсорбера би знатно појефтинила израду будућих апсорбера буке.

За испитивање акустичких својстава вишеслојних апсорбера одабрани су материјали анализирани у претходним поглављима: песак, рециклирана гума и рециклирана пластика. Коришћени су узорци направљени од гранулата наведених чистих компоненти материјала и везивног средства од полиуретанских смола коришћени у претходним испитивањима. Узорци су пречника 100 mm и дебљине 10 mm, 20 mm и 30 mm.

Иако су акустичке особине појединачних зрнастих материјала већ обрађене потребно је установити какав ефекат на коефицијент апсорпције има њихова међусобна комбинација. Да би се у овој фази рационализовао број експеримената прављене су комбинације материјала укупне дебљине до 50 mm.

3.7.1 План експеримента

Одабране комбинације материјала које су коришћене у експериментима су приказане у табелама 3.43. до 3.48. Усвојене су ознаке:

- гума – **R**,
- пластика – **P**,
- песак – **S**.

Редни бр. 1 означава позицију компоненте у цеви која је најближа звучном извору. Допунска ознака система у индексу означава дебљину слоја. Тако нпр. ознака **RPS**₁₁₁ означава систем састављен од слојева гуме, пластике и песка респективно, при чему је слој гуме најближи звучном извору, слој пластике је у средини а слој песка на супротној страни од звучног извора. Дебљина сва три слоја је по 10 mm а укупна дебљина је 30 mm. Ознака **RSP**₁₂₂ означава систем састављен од слојева гуме, песка и пластике при чему је укупна дебљина апсорбера 50 mm а дебљина слоја гуме је 10 mm, песка 20 mm и пластике 20 mm. При том је слој гуме најближи звучном извору.

Табела 3.43. Трокомпонентни вишеслојни RPS систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Гума	Пластика	Песак		
1	10	10	10	30	RPS ₁₁₁
2	10	10	20	40	RPS ₁₁₂
3	10	10	30	50	RPS ₁₁₃
4	10	20	10	40	RPS ₁₂₁
5	10	20	20	50	RPS ₁₂₂
6	10	30	10	50	RPS ₁₃₁
7	20	10	10	40	RPS ₂₁₁
8	20	10	20	50	RPS ₂₁₂
9	20	20	10	50	RPS ₂₂₁
10	30	10	10	50	RPS ₃₁₁

Табела 3.44. Трокомпонентни вишеслојни RSP систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Гума	Песак	Пластика		
1	10	10	10	30	RSP ₁₁₁
2	10	20	10	40	RSP ₁₂₁
3	10	30	10	50	RSP ₁₃₁
4	10	10	20	40	RSP ₁₁₂
5	10	20	20	50	RSP ₁₂₂
6	10	10	30	50	RSP ₁₁₃
7	20	10	10	40	RSP ₂₁₁
8	20	20	10	50	RSP ₂₂₁
9	20	10	20	50	RSP ₂₁₂
10	30	10	10	50	RSP ₃₁₁

Табела 3.45. Трокомпонентни вишеслојни PRS систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Пластика	Гума	Песак		
1	10	10	10	30	PRS ₁₁₁
2	10	10	20	40	PRS ₁₁₂
3	10	10	30	50	PRS ₁₁₃
4	20	10	10	40	PRS ₂₁₁
5	20	10	20	50	PRS ₂₁₂
6	30	10	10	50	PRS ₃₁₁
7	10	20	10	40	PRS ₁₂₁
8	10	20	20	50	PRS ₁₂₂
9	20	20	10	50	PRS ₂₂₁
10	10	30	10	50	PRS ₁₃₁

Табела 3.46. Трокомпонентни вишеслојни PSR систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Пластика	Песак	Гума		
1	10	10	10	30	PSR ₁₁₁
2	10	20	10	40	PSR ₁₂₁
3	10	30	10	50	PSR ₁₃₁
4	20	10	10	40	PSR ₂₁₁
5	20	20	10	50	PSR ₂₂₁
6	30	10	10	50	PSR ₃₁₁
7	10	10	20	40	PSR ₁₁₂
8	10	20	20	50	PSR ₁₂₂
9	20	10	20	50	PSR ₂₁₂
10	10	10	30	50	PSR ₁₁₃

Табела 3.47. Трокомпонентни вишеслојни SPR систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Песак	Пластика	Гума		
1	10	10	10	30	SPR ₁₁₁
2	20	10	10	40	SPR ₂₁₁
3	30	10	10	50	SPR ₃₁₁
4	10	20	10	40	SPR ₁₂₁
5	20	20	10	50	SPR ₂₂₁
6	10	30	10	50	SPR ₁₃₁
7	10	10	20	40	SPR ₁₁₂
8	20	10	20	50	SPR ₂₁₂
9	10	20	20	50	SPR ₁₂₂
10	10	10	30	50	SPR ₁₁₃

Табела 3.48. Трокомпонентни вишеслојни SRP систем

Р.бр.	Дебљина слоја у (mm)			Ук. дебљина (mm)	Ознака
	Песак	Гума	Пластика		
1	10	10	10	30	SRP ₁₁₁
2	20	10	10	40	SRP ₂₁₁
3	30	10	10	50	SRP ₃₁₁
4	10	10	20	40	SRP ₁₁₂
5	20	10	20	50	SRP ₂₁₂
6	10	10	30	50	SRP ₁₁₃
7	10	20	10	40	SRP ₁₂₁
8	20	20	10	50	SRP ₂₂₁
9	10	20	20	50	SRP ₁₂₂
10	10	30	10	50	SRP ₁₃₁

3.7.2 Резултати мерења

Резултати мерења коефицијента апсорпције за различите комбинације дебљине и редоследа слојева у вишеслојним узорцима за опсег од 216 Hz до 1940 Hz су дати у Прилогу 1. Коефицијент апсорпције приказан је на графицима са фреквенцијском резолуцијом од 5 Hz (плаво) и по терцама – од 250 Hz до 1600 Hz (црвено).

3.7.3 Обрада и анализа експерименталних резултата

Експерименталне вредности коефицијента апсорпције комбинације три различита зрнаста материјала су измерене у импедансној цеви за терчне фреквенције: 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz и 1600 Hz.

Добијени резултати су анализирани на два начина:

1. по дебљини материјала за све комбинације слојева, и
2. по редоследу слагања слојева за све дебљине материјала.

Резултати ових анализа са графичким приказима су дати у Прилогу 2.

На основу обрађених података у софтверском пакету *Design Expert* добијени су математички модели зависности коефицијента апсорпције од фреквенције и дебљине слоја сваке од компоненти материјала за свих шест комбинација редоследа (табела 3.49.). Добијени модели су сигнификантни и доказују да је корелација испитиваних зависности веома висока [120].

Када су у питању вишеслојне комбинације састављене од компоненти песка, рециклиране гуме и рециклиране пластике, могу се у начелу констатовати следећа правила:

- најпоузданији математички модели су модели за комбинацију материјала PRS и RPS а веома добри модели за комбинације PSR и RSP, док моделе за комбинације SRP и SPR треба избегавати јер су мање поуздани,
- пресудан утицај на величину и положај максималне вредности коефицијента апсорпције има положај песка у односу на остале две компоненте у вишеслојној комбинацији,
- гума и пластика имају скоро идентичан утицај на вредност коефицијента апсорпције и замена њихове позиције у односу на песак у вишеслојној комбинацији скоро да нема никаквог утицаја,
- повећање дебљине слоја песка смањује коефицијент апсорпције и помера његов максимум према нижим фреквенцијама.

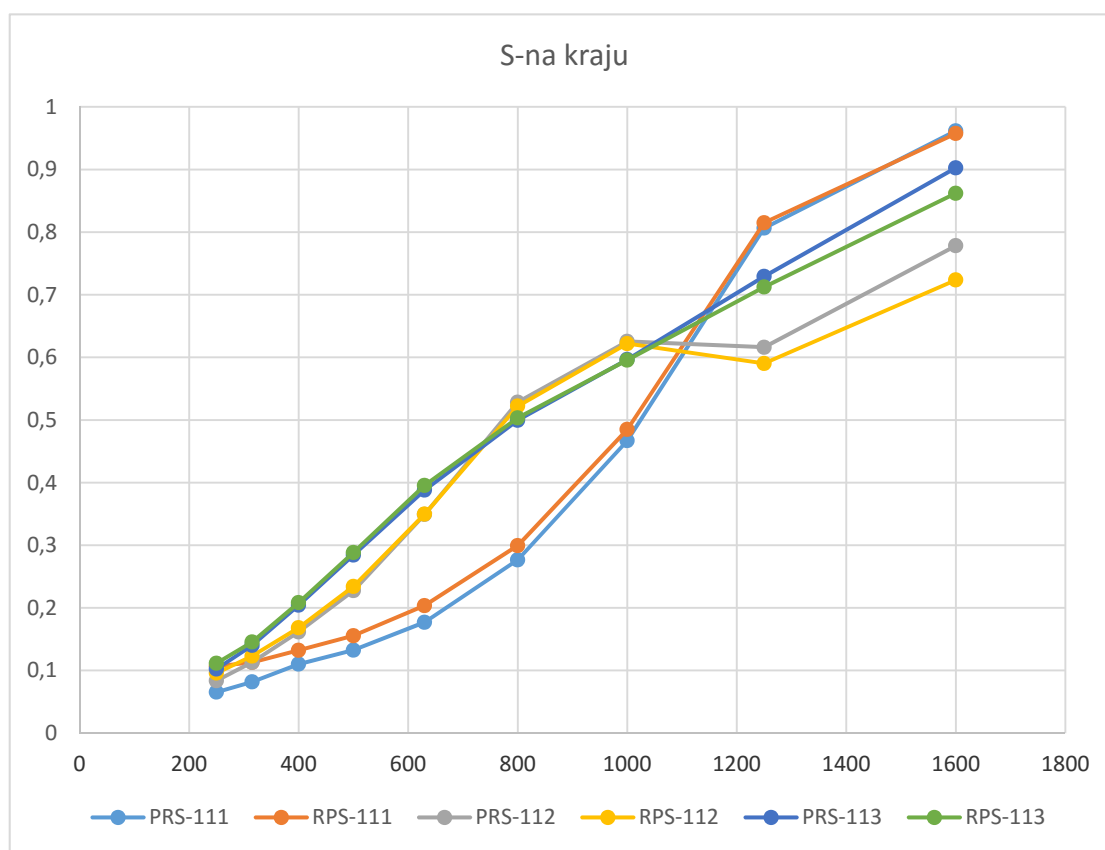
Како пресудни значај на интензитет и положај максималне вредности коефицијента апсорпције код вишеслојних материјала састављених од гуме, песка и пластике има песак, у наставку је дата посебна анализа утицаја дебљине и положаја песка у трослојној комбинацији.

Табела 3.49. Збирни преглед математичких модела вишеслојних зрнастих материјала

Редослед	Математички модел	Вредности статистичких параметара за оцену модела					
		C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
PRS	$\text{Ln}(\alpha_{\text{PRS}}) = -5.70317 + 0.58226*d(P) + 0.44526*d(R) + 0.37868*d(S) + 6.92013E-003*f - 4.14235E-004*d(P)*f - 2.89137E-004*d(R)*f - 2.36563E-004*d(S)*f - 2.18216E-006*f^2$	14.19	2.69	0.9674	0.9642	0.9554	58.430
RPS	$\text{Ln}(\alpha_{\text{RPS}}) = -5.04685 + 0.46607*d(P) + 0.32666*d(R) + 0.28425*d(S) + 6.26612E-003*f - 3.14220E-004*d(P)*f - 1.92660E-004*d(R)*f - 1.76699E-004*d(S)*f$	15.52	3.00	0.9592	0.9592	0.9441	50.668
PSR	$\text{Ln}(\alpha_{\text{PSR}}) = -4.75704 + 0.053604*d(P) + 0.59090*d(R) + 0.52324*d(S) + 6.29888E-003*f + 0.12278*d(P)*d(S) - 5.82265E-004*d(R)*f - 8.12457E-004*d(S)*f - 1.93544E-006*f^2$	34.79	14.33	0.7025	0.6731	0.5998	20.524
RSP	$\text{Ln}(\alpha_{\text{RSP}}) = -4.76521 + 0.67622*d(P) + 0.056538*d(R) + 0.57540*d(S) + 6.26320E-003*f - 6.80201E-004*d(P)*f + 0.081923*d(R)*d(S) - 8.75032E-004*d(S)*f - 1.83696E-006*f^2$	33.90	14.04	0.6869	0.6560	0.5793	19.634
SRP	$\text{Ln}(\alpha_{\text{SRP}}) = -4.63873 + 0.55537*d(P) + 0.44013*d(R) + 0.82977*d(S) + 6.21782E-003*f - 5.82236E-004*d(P)*f - 4.91150E-004*d(R)*f - 1.33687E-003*d(S)*f - 1.49576E-006*f^2$	44.15	24.71	0.4933	0.4433	0.3061	18.612
SPR	$\text{Ln}(\alpha_{\text{SPR}}) = -4.77007 + 0.53942*d(P) + 0.49770*d(R) + 0.83242*d(S) + 6.43198E-003*f - 5.73950E-004*d(P)*f - 5.35545E-004*d(R)*f - 1.31124E-003*d(S)*f - 1.62899E-006*f^2$	43.95	24.98	0.4940	0.4940	0.3136	18.252

Положај песка на супротној страни од звучног извора**Табела 3.50.** Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PRS и RPS

fc [Hz]	PRS	PRS	PRS	RPS	RPS	RPS
	111	112	113	111	112	113
250	0.065403	0.083639	0.102374	0.106768	0.095832	0.111479
315	0.081754	0.113109	0.140086	0.112977	0.123076	0.145393
400	0.110151	0.161671	0.20422	0.132228	0.168097	0.20825
500	0.132488	0.227436	0.284213	0.15544	0.234078	0.288417
630	0.176941	0.349116	0.387935	0.203529	0.349637	0.395575
800	0.276618	0.52846	0.499513	0.299444	0.522123	0.503391
1000	0.466964	0.625431	0.59657	0.484799	0.622038	0.59567
1250	0.806442	0.61617	0.729277	0.814937	0.59035	0.712378
1600	0.961704	0.778313	0.902714	0.957445	0.723645	0.861957

**Слика 3.81.** Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PRS и RPS**КОМЕНТАР:**

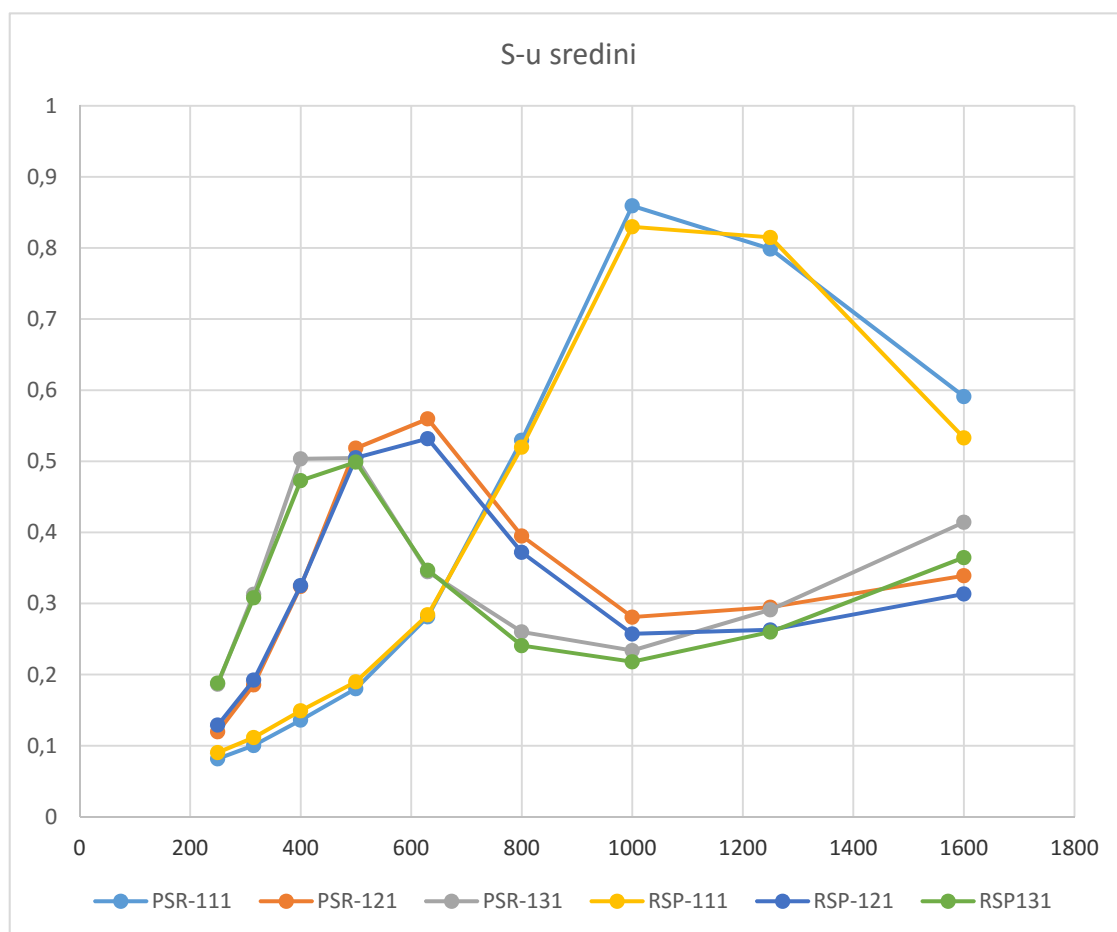
- Када је слој песка на супротној страни од звучног извора максимална вредност коефицијената апсорпције је на највишим терцама тј. за $f=1600$ Hz.
- За дебљину слоја песка $d=10$ mm вредност коефицијената апсорпције је веома мала и има спор раст за вредности фреквенција до 800 Hz. Најстрмији раст је у интервалу од 800 Hz до 1250 Hz а затим коефицијент апсорпције наставља спорије да расте до вредности $\alpha=0,95$ за $f=1600$ Hz.

- За дебљину слоја песка $d=20$ mm раст коефицијента апсорпције је знатно бржи до вредности $f=1000$ Hz, затим његова вредност благо опада до терце $f=1250$ Hz а након тога поново расте до максималне вредности $\alpha=0,72-075$ за $f=1600$ Hz.
- За дебљину слоја песка $d=30$ mm раст коефицијента апсорпције је скоро линеаран и достиже максимум $\alpha=0,85-09$ за $f=1600$ Hz.

Положај песка у средини

Табела 3.51. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PSR и RSP

	PSR	PSR	PSR	RSP	RSP	RSP
fc [Hz]	111	121	131	111	121	131
250	0.081669	0.119564	0.186553	0.090381	0.129033	0.188088
315	0.100337	0.185519	0.313087	0.111477	0.192289	0.308003
400	0.136019	0.324102	0.503427	0.149125	0.325261	0.472905
500	0.180264	0.518438	0.504423	0.189903	0.504926	0.498895
630	0.281283	0.559645	0.344683	0.284134	0.531921	0.346768
800	0.529618	0.395001	0.260038	0.519804	0.371932	0.240777
1000	0.859289	0.280838	0.233858	0.829825	0.257213	0.218
1250	0.798673	0.294774	0.291207	0.814791	0.2629	0.259906
1600	0.591062	0.339055	0.414196	0.533044	0.313358	0.364652



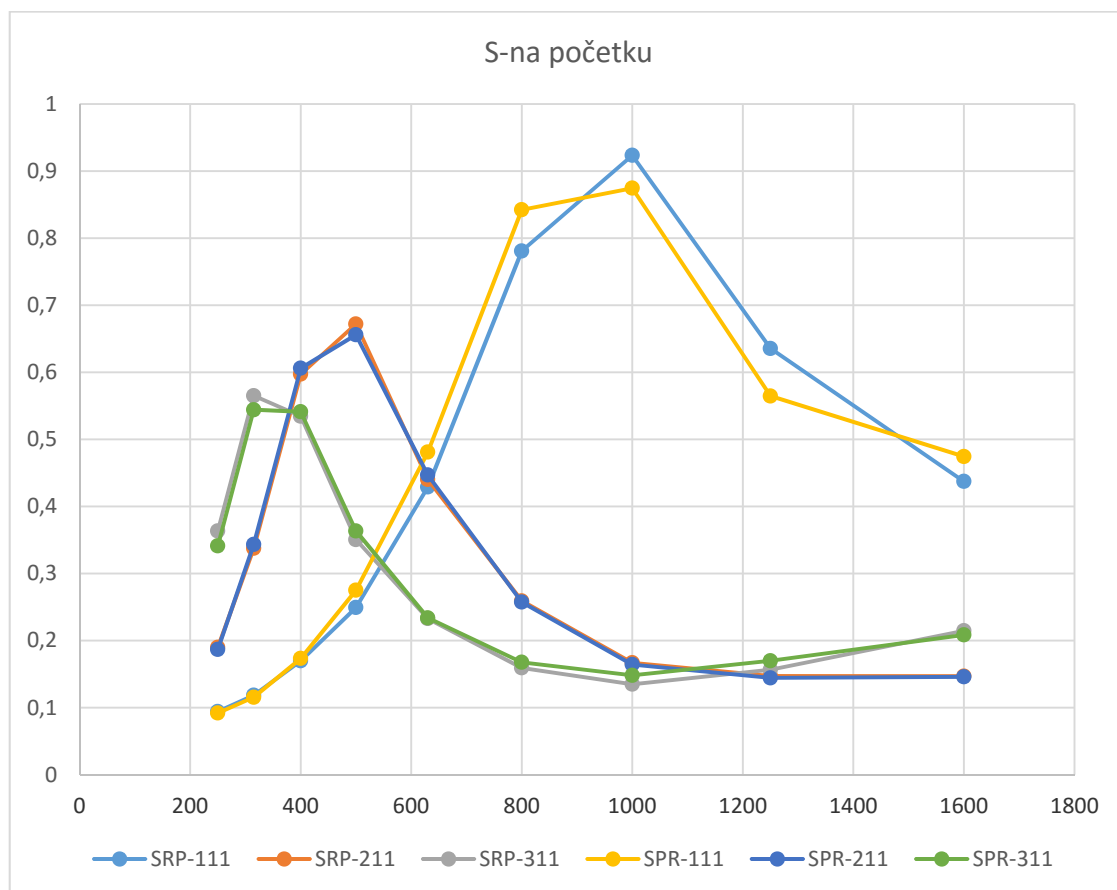
Слика 3.82. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације PSR и RSP

КОМЕНТАР:

- За дебљину слоја песка $d=10$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 1000 Hz до 1250 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,85-09$ за $f=1000$ Hz.
- За дебљину слоја песка $d=20$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 500 Hz до 630 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,55$ за $f=630$ Hz. Након максимума коефицијент апсорпције опада до вредности $\alpha=0,28$ за $f=1000$ Hz а након тога има благи раст до вредности $\alpha=0,33$ за $f=1600$ Hz.
- За дебљину слоја песка $d=30$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 400 Hz до 500 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,50$ за $f_1=400$ Hz и $f_2=500$ Hz. Након максимума коефицијент апсорпције опада до вредности $\alpha=0,22$ за $f=1000$ Hz а након тога има благи раст до вредности $\alpha=0,38-0,41$ за $f=1600$ Hz.

Положај песка на страни звучног извораТабела 3.52. Вредности коефицијената апсорпције за комбинације **SRP** и **SPR**

	SRP	SRP	SRP	SPR	SPR	SPR
fc [Hz]	111	211	311	111	211	311
250	0.094124	0.18979	0.363411	0.091864	0.186698	0.341122
315	0.118329	0.337431	0.565124	0.115381	0.343195	0.544013
400	0.169697	0.597172	0.534523	0.173294	0.606062	0.541079
500	0.249146	0.671976	0.350532	0.274927	0.655882	0.363356
630	0.428847	0.440179	0.232701	0.480895	0.446846	0.233807
800	0.780862	0.259045	0.159239	0.842337	0.25725	0.16754
1000	0.923467	0.16683	0.134863	0.874502	0.164202	0.148144
1250	0.635481	0.147223	0.156527	0.564559	0.144251	0.169785
1600	0.437243	0.146744	0.214596	0.474362	0.145836	0.20832



Слика 3.83. Вредности коефицијента апсорпције за комбинације SRP и SPR

КОМЕНТАР:

- За дебљину слоја песка $d=10$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 800 Hz до 1100 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,88-0,92$ за $f=1000$ Hz.
- За дебљину слоја песка $d=20$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 400 Hz до 500 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,67$ за $f=500$ Hz. Након максимума коефицијент апсорпције опада до вредности $\alpha=0,15$.
- За дебљину слоја песка $d=30$ mm вредност коефицијента апсорпције је највиша у интервалу од 250 Hz до 400 Hz и достиже максимум $\alpha_{\max}=0,57$ за $f=250$ Hz за комбинацију SRP и $\alpha_{\max}=0,55$ за $f_1=250$ Hz и $f_2=400$ Hz за комбинацију SPR. Након максимума коефицијент апсорпције опада до вредности $\alpha=0,15$ за $f=1000$ Hz а након тога има благи раст до вредности $\alpha=0,22$ за $f=1600$ Hz.

3.8. Апсорпциона својства влакнастих материјала

3.8.1 Материјал

Испитивање апсорпционих својстава влакнастих материјала је извршено на материјалу “Азнафон” који производи ВЕССИС OSIRIDE DOO, Крагујевац.

Азмафон је вишенаменски порозни апсорбер звука израђен на бази фино рашчешљаних памучних влакана повезаних смолом. Користи се за акустичку обраду радио и ТВ студија, позоришних и концертних дворана, фабричких хала, дискотека, кафића, пословних и стамбених објеката. Азмафон се лако поставља на зидове механичким причвршћивањем или лепљењем. Ради повећања коефицијента апсорпције на ниским фреквенцијама, поставља се на одређеном растојању од зида (9, 18 или 27 cm) на дрвену или металну подконструкцију.

Табела 3.53. Техничке карактеристике Азмафона

Боја	жуто-зелена
Дебљина	(10, 15, 20) + 3 mm
Ширина	стандардна димензија 1090 x 920 mm max 1150 mm
Дужина	по захтеву купца
Површинска маса	700 ÷ 1400 g/m ²
Дозвољена температура	-50 ÷ +160 °C
Коефицијент топлотне проводљивости	0,037 W/mK
Понашање на пламен	самогасив
Отпорност на труљење	без плесни
Отпорност на инсекте и глодаре	отпоран

Одобрењем предузећа ВЕССИС OSIRIDE DOO, Крагујевац добијени су резултати испитивања акустичких својстава материјала АЗМАФОН које је обавио 1997. године *Институт за материјале –ИМС, Београд*. Анализе које су урађене у наставку су добијене на основу података из ових испитивања.

3.8.2 План експеримента

Испитивање коефицијента апсорпције апсорбера “Азмафон” у реверберационој комори је урађено у две варијанте: у једном слоју (d=1 cm) и у два слоја (d=2 cm) и варирањем растојања апсорпционог материјала од неапсорпционе подлоге за четири случаја: h= 0 cm, 9 cm, 18 cm и 27 cm.

Мерење апсорпције је извршено у реверберационој комори Лабораторије за акустику Института ИМС у Београду. Испитивање је извршено према JUS U.J6.059.: Мерење коефицијента звучне апсорпције у реверберационој комори.

Остале карактеристике:

- Површина апсорбера P=12 m²
- Запремина коморе V=239 m³

- Звучни извори: Бели шум
- Услови: $t = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Psi = -\%$
- Утицај климе није посебно испитиван.

Коефицијент апсорпције одређиван је у терцним опсезима. Средње време реверберације празне коморе по терцама за празну комору током мерења апсорбера „АЗМА“ дато је у табели.

Табела 3.54. Време реверберације празне коморе по терцама током мерења апсорбера „АЗМА“

f [Hz]	80	100	125	160	200	250	315	400	500
T [s]	16.25	13.08	11.33	11.16	8.63	8.65	9.21	9.20	9.28
630	800	1к	1.25к	1.6к	2к	2.5к	3.15к	4к	5к
9.11	8.70	8.00	7.70	6.81	5.91	5.00	3.86	3.05	2.58

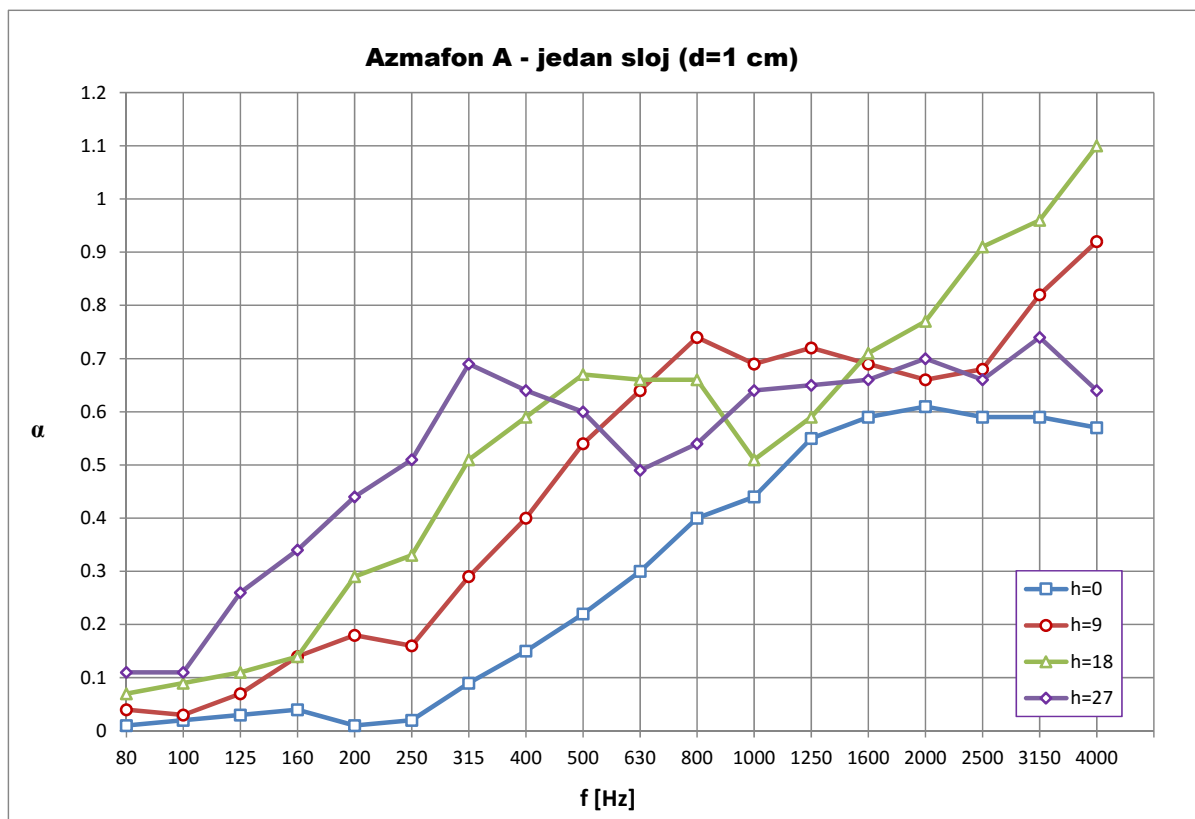
3.8.3 Резултати мерења

Добијени резултати за опсег од 80 Hz до 4000 Hz су приказани у табелама 3.55. и 3.56. и сликама 3.84. и 3.85.

Табела 3.55. Подаци за 1 слој Азмафона

f (Hz)	α			
	$h=0$	$h=9$	$h=18$	$h=27$
80	0.01	0.04	0.07	0.11
100	0.02	0.03	0.09	0.11
125	0.03	0.07	0.11	0.26
160	0.04	0.14	0.14	0.34
200	0.01	0.18	0.29	0.44
250	0.02	0.16	0.33	0.51
315	0.09	0.29	0.51	0.69
400	0.15	0.4	0.59	0.64
500	0.22	0.54	0.67	0.6
630	0.3	0.64	0.66	0.49
800	0.4	0.74	0.66	0.54
1000	0.44	0.69	0.51	0.64
1250	0.55	0.72	0.59	0.65
1600	0.59	0.69	0.71	0.66
2000	0.61	0.66	0.77	0.7
2500	0.59	0.68	0.91	0.66
3150	0.59	0.82	0.96	0.74
4000	0.57	0.92	1	0.64

Када је у питању једнослојни материјал дебљине $d=1\text{ cm}$ може се уочити да висина уградње од подлоге знатно повећава коефицијент апсорпције на ниским фреквенцијама (слика 3.84).



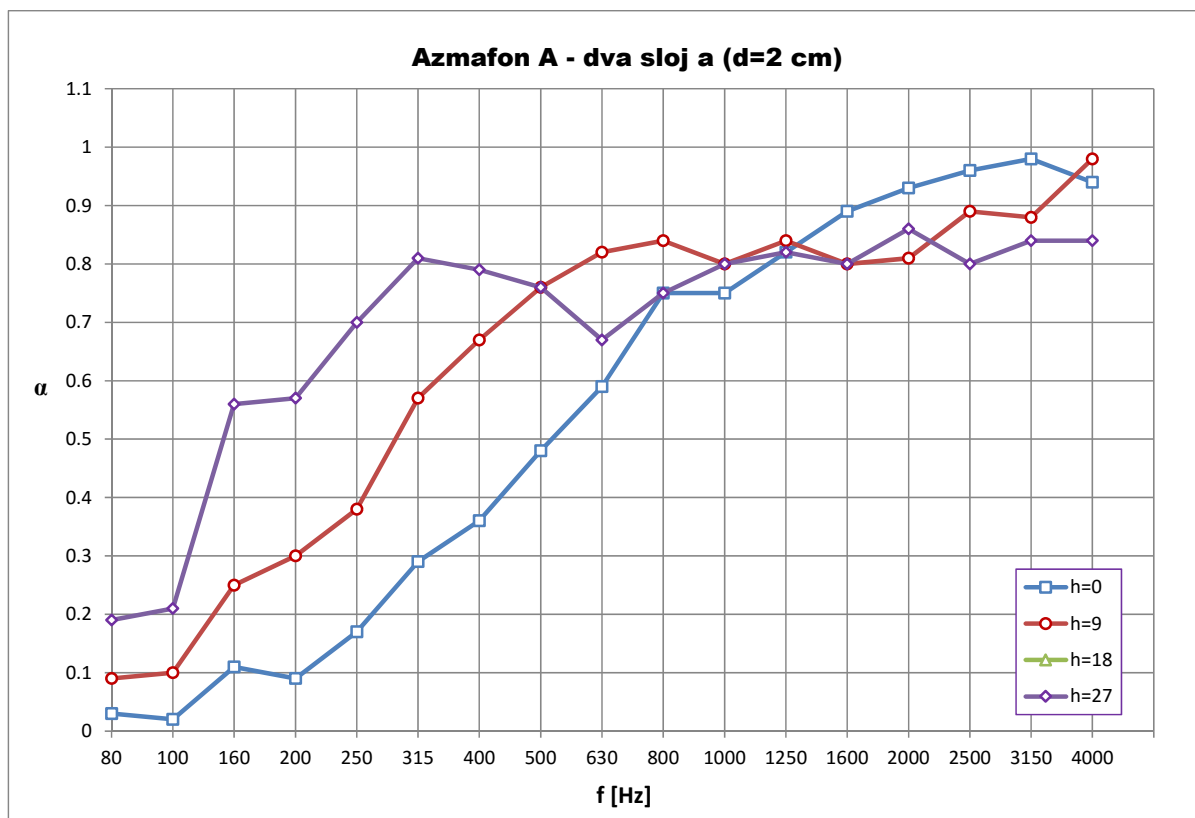
Слика 3.84. Вредности коефицијента апсорпције за 1 слој Азмафона

Табела 3.56. Подаци за 2 слоја Азмафона

f (Hz)	α			
	$h=0$	$h=9$	$h=18$	$h=27$
80	0.03	0.09		0.19
100	0.02	0.1		0.21
125	0.02	0.15		0.13
160	0.11	0.25		0.56
200	0.09	0.3		0.57
250	0.17	0.38		0.7
315	0.29	0.57		0.81
400	0.36	0.67		0.79
500	0.48	0.76		0.76
630	0.59	0.82		0.67
800	0.75	0.84		0.75
1000	0.75	0.8		0.8
1250	0.82	0.84		0.82
1600	0.89	0.8		0.8
2000	0.93	0.81		0.86
2500	0.96	0.89		0.8
3150	0.98	0.88		0.84
4000	0.94	0.98		0.84

Кода двослојног материјала (дебљина $d=2$ cm) може се уочити да висина уградње од подлоге знатно повећава коефицијент апсорпције на ниским фреквенцијама као и да већа

дебљина слоја доприноси повећању коефицијента апсорпције на свим фреквенцијама (слика 3.85.).



Слика 3.85. Вредности коефицијената апсорпције за 2 слоја Азмафона

3.8.4 Обрада и анализа експерименталних резултата

Обрада података и формирање стохастичких модела је урађено на два начина:

1. Формирани су математички модели за сваку комбинацију дебљине материјала и висину уградње (7 модела) од подлоге на основу података из табеле 3.57.
2. Урађен је збирни математички модел зависности коефицијента апсорпције од дебљине (d), висине уградње (h) и фреквенције (f).

Математички модели зависности коефицијента апсорпције од фреквенције са параметрима за оцену модела је приказан у табели 3.58. Веома високе вредности параметари за оцену модела потврђују адекватност дефинисаних математичких модела.

За формирање збирног математичког модела сви експериментални подаци су сложени у једну табелу (табела 3.57.). Оба модела су урађена за фреквентни спектар од 100 Hz до 4000 Hz.

Табела 3.57. Експериментални подаци за збирни модел

ODABRANI PODACI ZA OBRADU																			
	D	H	f	α		D	H	f	α		D	H	f	α		D	H	f	α
1	0.01	0	100	0.02	43	0.01	0	400	0.15	85	0.01	0	1600	0.59					
2	0.01	9	100	0.03	44	0.01	9	400	0.4	86	0.01	9	1600	0.69					
3	0.01	18	100	0.09	45	0.01	18	400	0.59	87	0.01	18	1600	0.71					
4	0.01	27	100	0.11	46	0.01	27	400	0.64	88	0.01	27	1600	0.66					
5	0.02	0	100	0.02	47	0.02	0	400	0.36	89	0.02	0	1600	0.89					
6	0.02	9	100	0.1	48	0.02	9	400	0.67	90	0.02	9	1600	0.8					
7	0.02	27	100	0.21	49	0.02	27	400	0.79	91	0.02	27	1600	0.8					
8	0.01	0	125	0.03	50	0.01	0	500	0.22	92	0.01	0	2000	0.61					
9	0.01	9	125	0.07	51	0.01	9	500	0.54	93	0.01	9	2000	0.66					
10	0.01	18	125	0.11	52	0.01	18	500	0.67	94	0.01	18	2000	0.77					
11	0.01	27	125	0.26	53	0.01	27	500	0.6	95	0.01	27	2000	0.7					
12	0.02	0	125	0.02	54	0.02	0	500	0.48	96	0.02	0	2000	0.93					
13	0.02	9	125	0.15	55	0.02	9	500	0.76	97	0.02	9	2000	0.81					
14	0.02	27	125	0.13	56	0.02	27	500	0.76	98	0.02	27	2000	0.86					
15	0.01	0	160	0.04	57	0.01	0	630	0.3	99	0.01	0	2500	0.59					
16	0.01	9	160	0.14	58	0.01	9	630	0.64	100	0.01	9	2500	0.68					
17	0.01	18	160	0.14	59	0.01	18	630	0.66	101	0.01	18	2500	0.91					
18	0.01	27	160	0.34	60	0.01	27	630	0.49	102	0.01	27	2500	0.66					
19	0.02	0	160	0.11	61	0.02	0	630	0.59	103	0.02	0	2500	0.96					
20	0.02	9	160	0.25	62	0.02	9	630	0.82	104	0.02	9	2500	0.89					
21	0.02	27	160	0.56	63	0.02	27	630	0.67	105	0.02	27	2500	0.8					
22	0.01	0	200	0.01	64	0.01	0	800	0.4	106	0.01	0	3150	0.59					
23	0.01	9	200	0.18	65	0.01	9	800	0.74	107	0.01	9	3150	0.82					
24	0.01	18	200	0.29	66	0.01	18	800	0.66	108	0.01	18	3150	0.96					
25	0.01	27	200	0.44	67	0.01	27	800	0.54	109	0.01	27	3150	0.74					
26	0.02	0	200	0.09	68	0.02	0	800	0.75	110	0.02	0	3150	0.98					
27	0.02	9	200	0.3	69	0.02	9	800	0.84	111	0.02	9	3150	0.88					
28	0.02	27	200	0.57	70	0.02	27	800	0.75	112	0.02	27	3150	0.84					
29	0.01	0	250	0.02	71	0.01	0	1000	0.44	113	0.01	0	4000	0.57					
30	0.01	9	250	0.16	72	0.01	9	1000	0.69	114	0.01	9	4000	0.92					
31	0.01	18	250	0.33	73	0.01	18	1000	0.51	115	0.01	18	4000	1.1					
32	0.01	27	250	0.51	74	0.01	27	1000	0.64	116	0.01	27	4000	0.64					
33	0.02	0	250	0.17	75	0.02	0	1000	0.75	117	0.02	0	4000	0.94					
34	0.02	9	250	0.38	76	0.02	9	1000	0.8	118	0.02	9	4000	0.98					
35	0.02	27	250	0.7	77	0.02	27	1000	0.8	119	0.02	27	4000	0.84					
36	0.01	0	315	0.09	78	0.01	0	1250	0.55										
37	0.01	9	315	0.29	79	0.01	9	1250	0.72										
38	0.01	18	315	0.51	80	0.01	18	1250	0.59										
39	0.01	27	315	0.69	81	0.01	27	1250	0.65										
40	0.02	0	315	0.29	82	0.02	0	1250	0.82										
41	0.02	9	315	0.57	83	0.02	9	1250	0.84										
42	0.02	27	315	0.81	84	0.02	27	1250	0.82										

Табела 3.58. Збирни преглед математичких модела зависности коефицијента апсорпције од фреквенције вишеслојних влакнастих материјала

Р.бр.	d [cm]	h [cm]	Математички модел	Вредности статистичких параметара за оцену модела					
				C.V. %	PRESS	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared	Adeq Precision
1	1	0	$\alpha = -2.050E-17f^5 + 2.054E-13f^4 - 6.916E-10f^3 + 7.733E-07f^2 + 2.210E-04f - 2.477E-02$	8.41	2.07	0.9932	0.9903	-0.9713	43.310
2	1	9	$\text{Sqrt}(\alpha) = +1.68448E-017f^5 - 2.18883E-013f^4 + 1.06836E-009f^3 - 2.38357E-006f^2 + 2.37574E-003f + 3.84288E-003$	5.01	0.27	0.9897	0.9854	0.7657	42.575
3	1	18	$\alpha = 7.162E-17f^5 - 7.600E-13f^4 + 2.901E-09f^3 - 4.814E-06f^2 + 3.453E-03f - 2.260E-01$	10.89	12.84	0.9737	0.9628	-7.3786	29.342
4	1	27	$\alpha = -8.763E-20f^6 + 1.036E-15f^5 - 4.660E-12f^4 + 1.001E-08f^3 - 1.052E-05f^2 + 5.014E-03f - 2.312E-01$	13.13	560.87	0.9212	0.8782	-849.84	14.966
5	2	0	$\alpha = -2.687E-14f^4 + 2.716E-10f^3 - 1.011E-06f^2 + 1.691E-03f - 1.534E-01$	6.80	0.032	0.9934	0.9914	0.9867	55.204
6	2	9	$\alpha = 4.804E-17f^5 - 5.339E-13f^4 + 2.200E-09f^3 - 4.121E-06f^2 + 3.458E-03f - 2.056E-01$	5.12	0.023	0.9928	0.9897	0.9856	52.083
7	2	27	$\alpha = -9.180E-20f^6 + 1.099E-15f^5 - 5.027E-12f^4 + 1.102E-08f^3 - 1.191E-05f^2 + 5.882E-03f - 2.426E-01$	14.70	605.93	0.8930	0.8346	-623.16	12.178

За збирни модел је усвојен *редуковани 2FI модел* (2FI-two-factor interaction). Анализа варијанси (ANOVA) је потврдила сигнификантност модела (табела 3.59.).

Табела 3.59. ANOVA извештај за одабрани математички модел

ANOVA for Response Surface Reduced 2FI model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6.08	4	1.52	45.52	< 0.0001	significant
A-d	0.69	1	0.69	20.65	< 0.0001	
B-h	0.92	1	0.92	27.60	< 0.0001	
C-f	3.13	1	3.13	93.80	< 0.0001	
BC	0.29	1	0.29	8.74	0.0038	
Residual	3.81	114	0.033			
Cor Total	9.89	118				

Коефицијент детерминације (*R-Squared*) и остале статистике (табела 3.60.) имају добре вредности што потврђује оправданост избора усвојеног математичког модела.

Табела 3.60. Рачунске вредности статистика за оцену математичког модела

Std. Dev.	0.18	R-Squared	0.6150
Mean	0.54	Adj R-Squared	0.6015
C.V. %	33.88	Pred R-Squared	0.5710
PRESS	4.24	Adeq Precision	27.560

Коначна једначина математичког модела који адекватно описује зависност коефицијента апсорпције од *d*, *h* и *f* гласи:

$$\alpha = -0.023160 + 15.42292*d + 0.011673*h + 2.25224E-004*f - 4.12502E-006*h*f \quad (3.71)$$

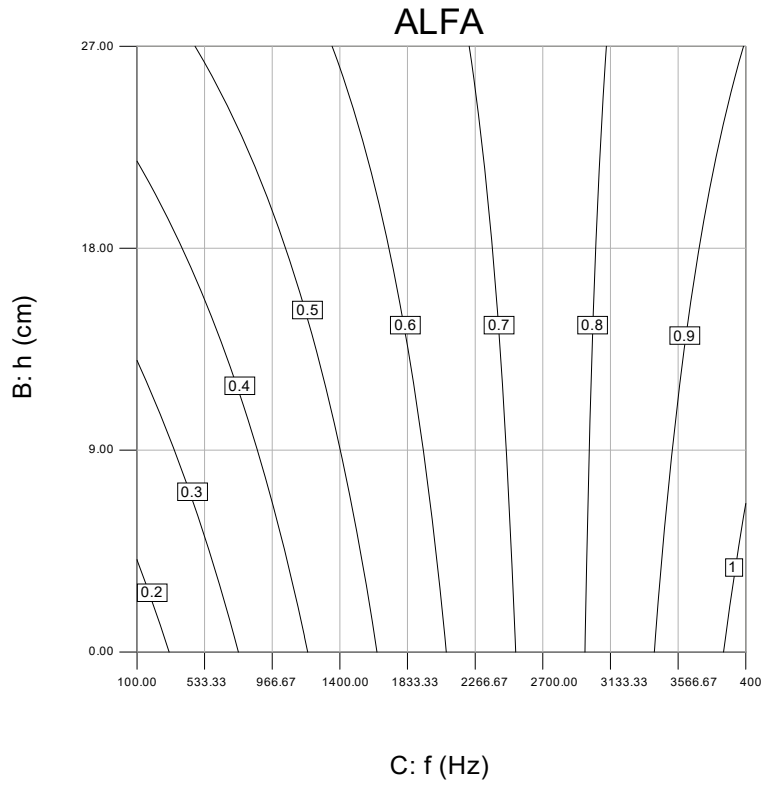
Дијагностика статистичких особина модела (дијаграм нормалне расподеле резидуала, Вох-Соx дијаграм и др.) показују да су резидуали нормално распоређени и да модел има задовољавајуће статистичке особине [121].

Графички приказ математичког модела описаног једначином (3.71) је дат на сликама 3.86. и 3.87.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 ALFA

X1 = C: f
 X2 = B: h

Actual Factor
 A: d = 0.01

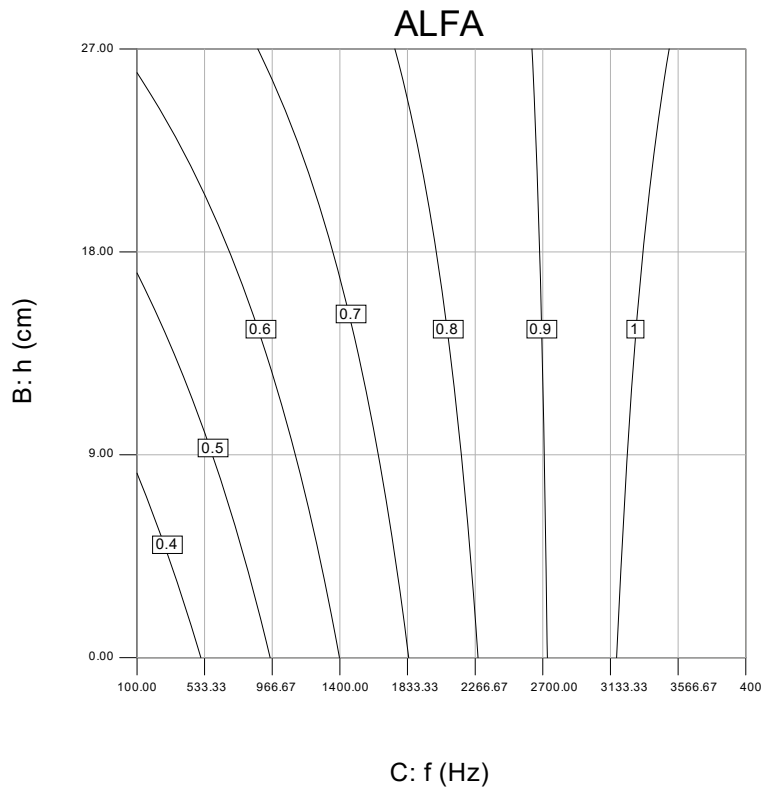


Слика 3.86. Коэффициент апсорпције за d=1 cm-контурни дијаграм

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 ALFA

X1 = C: f
 X2 = B: h

Actual Factor
 A: d = 0.02



Слика 3.87. Коэффициент апсорпције за d=2 cm-контурни дијаграм

ПОГЛАВЉЕ

4

РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА

4.1. Приступ развоју модела

Бука у животној средини или како се веома често зове – комунална бука, дефинише се као „бука коју стварају сви извори буке који се јављају у човековом окружењу, искључујући буку која настаје на самом радном месту у индустријским погонима“ [5].

Главни извори комуналне буке су [5]:

- извори буке на отвореном простору, и
- извори буке у затвореном простору.

Извори комуналне буке на отвореном простору су:

- саобраћај (друмски, железнички и авионски),
- грађевинске машине,
- индустрија,
- машине за кућну употребу,
- машине и возила за комунално одржавање,
- спортке активности, културно-забавни програми и сл.

Извори комуналне буке у затвореном простору су:

- кућни апарати,
- вентилациони системи, клима уређаји, трафостанице, пумпне станице,
- уређаји за музичку репродукцију и сл.

Контрола буке се врши [5]:

- на самом извору буке,
- на путевима преношења,
- на месту пријема.

Главни задатак ове дисертације је развој модела одлучивања за избор звучно апсорпционих материјала и њихових смеша у циљу реализације звучне заштите извора буке на отвореном и у затвореном простору. Основни задатак звучно апсорпционих материјала је да смање рефлексију звучних таласа и апсорбују део енергије звука. Њихова основна акустичка карактеристика је коефицијент апсорпције, који је фреквенцијски зависна величина а дефинише способност материјала да апсорбује и трансформише део енергије звука у други облик, најчешће топлотни.

У зависности од карактера буке у фреквенцијском домену (широкопојасна бука, ускопојасна бука, тонална бука) се разликују и захтеви које треба испунити када је у питању избор акустичких особина материјала.

Приступ развоју модела одлучивања за избор апсорпционих материјала се заснива на формирању базе знања о коефицијентима апсорпције за различите врсте порозних материјала и узимање у обзир карактеристика извора буке изражене фреквенцијским спектром буке или нормализованим фреквенцијским спектром буке. Формирање базе знања је реализовано путем развоја математичких модела за предикцију акустичких

особина а пре свега коефицијента апсорпције. Да би се формирао модел избора било је пре свега неопходно извршити мерења и формирање математичких модела коефицијента апсорпције различитих врста материјала у зависности од физичких, структурних и геометријских параметара. На основу тако формиране базе знања је могуће методама оптимизације одабрати могуће алтернативе тј. комбинације материјала и њихових геометријских параметара који испуњавају акустичке захтеве за сваки конкретан проблем заштите од буке.

За реализацију модела одлучивања је неопходно решити низ проблема:

- мерење и фреквенцијску анализу генерисане буке,
- дефинисање фактора (критеријума) који утичу на избор материјала,
- избор могућих апсорпционих материјала, њихове смеше или комбинације који задовољавају акустичке и друге задате критеријуме,
- избор адекватних алата за подршку одлучивању.

Решавање проблема избора најпогодније варијанте апсорпционог материјала представља веома сложен процес одлучивања који се састоји од четири основне фазе [122]:

- формулација проблема,
- креирање модела,
- решавање проблема,
- имплементација решења.

4.2. Развој модела

Предложени приступ избора најповољнијег материјала за заштиту од буке је подељен у четири фазе од којих се свака састоји из неколико подфаза:

1. Дефинисање проблема
 - идентификација проблема,
 - класификација проблема,
 - мерење буке и фреквенцијска анализа,
 - декомпозиција проблема,
 - дефинисање „надлежности“.
2. Креирање модела
 - дефинисање критеријума (циљева) одлучивања,
 - генерисање алтернатива,
 - формирање модела одлучивања.
3. Решавање проблема
 - оцена и рангирање алтернатива,
 - анализа осетљивости,
 - избор најпогодније алтернативе.
4. Имплементација решења
 - план имплементације,
 - имплементација решења,
 - корекција процеса решавања проблема.

4.2.1 Дефинисање проблема

Фаза дефинисања проблема се састоји од:

- *Идентификације проблема* која започиње анализом чињеничног и жељеног стања. Проблем и потреба за заштитом од буке настаје као: а) жеља да се побољшају услови радне и животне средине, б) потреба да се испоштују важећи прописи и стандарди који се односе на ову област или в) потреба реализације налога надлежних инспекцијских органа.
- *Мерење нивоа буке и фреквенцијска анализа*. Мерењем је неопходно одредити: а) јачину буке, б) фреквенцијски спектар буке и в) трајање буке. Ова три параметра у потпуности описују карактер буке и дају могућност да се оцени стање нивоа буке, изврши процена штетног дејства буке на човека и дефинишу мере за смањење буке.
- *Класификација проблема*. У зависности од карактера буке у временском домену се разликују следећи типови буке: а) непроменљива бука, б) променљива бука, в)

испрекидана бука и г) импулсна бука. У зависности од карактера буке у фреквенцијском домену могу се разликовати: а) широкопојасна бука, б) ускопојасна бука и в) тонална бука [5]. Анализа и класификација буке су основ за примену стандарда и препорука који се односе на дозвољени ниво буке и дефинисање критеријума за избор апсорпционих материјала за решење проблема заштите од буке.

- *Декомпозиција проблема.* Сложене проблеме је потребно расчланити на потпроблеме ради једноставнијег решавања.
- *Дефинисање „надлежности“* тј. одређивање појединача, група или тмова који ће бити задужени и одговорни за решавање проблема [122].

4.2.2 Креирање модела

„Модел представља концептуализацију проблема и његову апстракцију у квантитативној и/или квалитативној форми“ [122]. Да би се креирао математички модел проблема вишекритеријумског одлучивања, потребно је:

- дефинисати циљеве и критеријуме одлучивања
- генерисати могуће алтернативе и
- формирати модел одлучивања.

а) Дефинисање критеријума одлучивања

Дефинисање критеријума одлучивања у процесу избора апсорпционих материјала за решење конкретног проблема заштите од буке је једна од кључних фаза и директно је везана са циљевима који се желе постићи. Задатак је веома комплексан с обзиром да су циљеви а самим тим и критеријуми често супротстављени.

У већини случајева, главни циљеви су: смањење буке на задовољавајући ниво, повећање квалитета живота, минимални трошкови, одрживост пројекта, употреба рециклираних материјала и сл.

На дефинисање критеријума одлучивања утиче широк спектар фактора из области екологије, технике и технологије, економије, правне и законске регулативе и политике. Сви критеријуми се могу сврстати у две категорије: акустички и неакустички.

Акустички критеријуми се свде на ефикасност примене материјала са аспекта његове могућности апсорпције звука. Основни параметар је вредност коефицијента апсорпције као фреквенцијски зависне величине. Поред њега, често је потребно познавати и коефицијент смањења буке (Noise Reduction Coefficient – NRC) дефинисан америчким стандардом ASTM C432-90 а који се израчунава као средња вредност коефицијента апсорпције у октавним опсезима од 250 до 2000 Hz [5].

Од *неакустичких критеријума* најважнији су: естетски захтеви, конструкциони захтеви, безбедност, еколошки фактори, трошкови, технологичност, одрживост и др.

Естетски захтеви

Естетика је питање које треба да буде предмет интересовања свих субјеката који су укључени у процес избора и пројектовања система заштите од буке. Често се естетика по важности ставља у исту раван као и акустична својства. Постоје различити приступи решавању питања естетике и они се обично разматрају са аспекта архитектонских захтева и визуелног утицаја посебно када је неопходно уклапање акустичког објекта у постојеће окружење [123,124].

Конструкциони фактори

Правилно пројектовање акустичких објеката захтева разматрање низа структурно повезаних фактора. Конструкциони критеријуми на које је потребно обратити пажњу су:

- димензије објекта,
- оптерећења којима је изложен објекат у условима примене у спољашњем и унутрашњем простору (тежина апсорпционог слоја, оптерећење услед ветра, снега, леда, ударна оптерећења и др.),
- конструкционо решење носеће структуре,
- ширење и скупљање материјала услед промене температуре,
- међусобне везе елемената и могућност њиховог повезивања, заптивања и сл.,
- избор начина финансирања.

Безбедност

Безбедност је још један у низу критеријума на који се мора обратити посебна пажња нарочито приликом пројектовања система заштите од буке у боравишном простору. Ништа мање није значајна ни безбедност у спољашњој средини. Карактеристичан пример за то су звучне баријере, где се мора водити рачуна да се не угрози безбедност саобраћаја у окружењу у коме се баријера поставља.

У ову категорију се може уврстити и пожарна сигурност тј. избор материјала који је отпоран на пожар као и поштовање против пожарних прописа у процесу пројектовања објекта.

Еколошки фактори

Еколошки фактори су посебно значајни при пројектовању елемената система заштите од буке, било да се они уграђују у боравишном простору или у спољашњој средини. И у једном и у другом случају они утичу на здравље људи и загађење животне средине.

Иако се поједини елементи звучне заштите користе за заштиту животне средине од штетног дејства буке, они могу представљати опасност по животну средину. Зато се приликом пројектовања морају сагледати еколошки фактори и утицај елемената заштите на животну средину.

Баријере као препреке простирању звука могу представљати и препреке за кретање људи и животиња. Природне миграције птица али и других животиња могу бити угрожене постављањем звучних баријера. Такође, постављање звучних баријера захтева заузимање

одређеног земљишта поред саобраћајница. Често се дешава да се зарад постављања звучних баријера уништава обрадиво земљиште. Пројектант посебну пажњу мора да обрати и у случајевима када баријере треба поставити у близини или у самим националним парковима како се не би нарушило заштићено природно подручје. Дренажа подручја око звучних баријера је фактор који може изазвати поремећаје у локалној хидрологији.

Један од фактора који привлачи највише пажње а везан је за екологију је токсичност материјала. Токсични материјали се не смеју уграђивати у боравишном простору. Избор материјала, његов квалитет, реакција са атмосферским утицајима и окружењем, као и употреба разних боја и премаза може оставити трајне последице на животну средину. Зато пројектант мора да проучи како саму средину у којој се елементи заштите постављају, тако и локалне еколошке прописе како не би нарушио квалитет животне средине.

Одржавање

Као објекти за заштиту од буке у боравишном простору најчешће се користе преграде у систему суве градње на потконструкцији од лимених профила. У већини случајева су развијене и стандардизоване читаве фамилије таквих производа тако да у принципу, оваква решења немају посебне захтеве за одржавањем сем редовног грађевинског одржавања.

Када су у питању објекти за заштиту од буке у спољашњој средини, у неком тренутку може доћи до оштећења акустичког објекта услед временских услова којима је изложен, услед различитих оптерећења или неких других разлога. Правилним и правовременим одржавањем може се продужити животни век објекта. Да би одржавање било могуће, током самог пројектовања треба предвидети неке детаље: дефинисати животни век објекта, приступ објекту ради чишћења и замене оштећених делова или евентуалној поправци на лицу места итд.

Животни век акустичког објекта зависи од више фактора: материјала од ког је направљен, изложености хемикалијама, атмосферским утицајима итд. Да би се правилно извршило одржавање и продужио животни век акустичког објекта потребно је познавати оштећења која могу настати на њима. На примеру баријере то су:

- корозија која настаје због влаге или присуства агресивне средине,
- оштећења пигмената боје услед изложености УВ зрачењу,
- оштећења и губитак функционалности услед наслага прашине,
- оштећења услед оптерећења и атмосферских утицаја (деформације, пукотине, ломови, влага, лед), итд.

Трошкови

Велики је број фактора који утичу на трошкове производње, транспорта и монтаже акустичких објеката што има велики утицај на коначну цену производа. Овај критеријум је веома битан при избору врсте материјала, конструкционог решења, избора технологије израде и монтаже као и захтева за минималним утрошком материјала и времена уз ангажовање минимума производне опреме. Поред основних трошкова ту су и додатни трошкови који зависе од:

- локације градилишта у односу на материјал, опрему и радну снагу,
- потреба за специјалном опремом и посебним кадровима,
- обима производње,
- времена пројектовања потребног за задовољење специфичних захтева,
- специфичних радова,
- временских услова,
- посебних захтева од стране инспекцијских служби итд.

Технологичност израде и монтаже

Функционална и употребна својства су захтеви које пројектант треба првенствено да задовољи, али истовремено мора да мисли и на производне поступке који ће бити употребљени као и на њихову економичност. То значи да пројектант треба да буде упознат са производњом и њеним специфичностима. Ради постизања што бољих и економичнијих решења, пројектант би требао да оствари сарадњу са технологом још у фази пројектовања производа.

Неке смернице за оцену технологичности су:

- исправна градња производа од појединачних делова, подсклопова и склопова до комплетног производа,
- лако руковање и лака уградња појединих делова и поступност изградње при формирању склопова и целог производа,
- повољно обликовање делова са циљем уштеде материјала и времена израде,
- уважавање специфичности појединих примењених поступака при изради,
- економичност захтева за површинском обрадом и дозвољеним одступањима појединих величина,
- примена методе стандардизације делова и елемената производа, и др.

б) Генерисање алтернатива

Поступак генерисања и избора могућих алтернатива (акустичких материјала) зависи од типа и карактера буке и стандарда и препорука који дефинишу ову област. Зато ће овај поступак бити посебно обрађен за:

- ускопојасну и тоналну буку,
- саобраћајну буку и
- и буку у зградама.

в) Формирање модела одлучивања

Основни задатак у процесу вишекритеријумског одлучивања (вишекритеријумске анализе) је избор најбољег решења из скупа свих могућих алтернатива у зависности од постављених критеријума. У математичком облику оптимизација се своди на максимизацију функција критеријума:

$$\text{Max}\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x), \quad n \geq 2\} \quad (4.1)$$

при задатим ограничењима:

$$x \in A [A1, A2, \dots, Am] \quad (4.2)$$

где су:

- n – број критеријума ($j=1,2,\dots,n$),
- m – број алтернатива ($i=1,2,\dots,m$),
- f_j – критеријуми \mathbf{Kj} ($j=1,2,\dots,n$),
- A_i – алтернативе за разматрање ($i=1,2,\dots,m$),
- A – скуп свих алтернатива.

При том су познате вредности f_{ij} сваког разматраног критеријума f_j за сваку од могућих алтернатива A_i :

$$f_{ij} = f_j(A_i) \quad \forall(i, j); \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Модел вишекритеријумске анализе се може приказати одговарајућом матрицом вредности критеријума за поједине алтернативе која се зове матрица одлучивања [125,126]:

$$\begin{array}{cccc} \text{max} & \text{max} & \dots & \text{max} \\ & f_1 & f_2 & \dots & f_n \\ A1 & \left[\begin{array}{cccc} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Am & f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{array} \right. & & & \end{array} \quad (4.4)$$

Критеријуми типа минимизације се могу одговарајућим трансформацијама претворити у критеријуме максимизације.

4.2.3 Решавање проблема

Решавање проблема се спроводи у три фазе:

- оцена и рангирање алтернатива,
- анализа осетљивости, и
- избор најпогодније алтернативе.

За решење проблема се користе Системи за подршку одлучивању тј. интерактивни рачунарски софтвери дизајнирани да помогну доносиоцима одлука у избору најповољније алтернативе.

За потребе овог рада је одабрана метода MODIPROM (модификована PROMETHEE метода) која је развијена на Машинском факултету у Краљеву [127] а која се заснива на побољшању групе метода за вишекритеријумско рангирање познате под називом PROMETHEE.

С обзиром да примена MODIPROM методе захтева обимна рачунања, поступак вишекритеријумске анализе је аутоматизован развојем истоименог софтверског алата.

Ограничење датог алата се огледа у могућности решавања проблема рангирања 10 алтернатива помоћу 25 функција критеријума. На улазној масци програма уносе се: подаци о вредности критеријумских функција за поједине алтернативе, вредности релативних тежина критеријумских функција, бира се врста оптимизације за сваку функцију (*min* или *max*) и уносе остали подаци.

а) Оцена и рангирање алтернатива

Генерисање коначног рангирања у софтверу *MODIPROM* се изводи кроз следеће фазе [128]:

- формирање табеле парцијалног (делимичног) поретка по методи Promethee I,
- формирање табеле потпуног поретка по методи Promethee II,
- формирање табеле интервалног поретка по методи Promethee III и
- компаративна анализа резултата рангирања.

Резултати вишекритеријумске анализе се приказују у виду извештаја на коме се даје коначан редослед алтернатива по варијантама PROMETHEE I, PROMETHEE II и PROMETHEE III и график интервалног поретка алтернативе.

Програм MODIPROM омогућује да се за сваку критеријумску функцију виде и облици усвојених генерализованих критеријума и положај експерименталних тачака у односу на њих јер се на основу методе најмањих квадрата бира генерализовани критеријум код кога је збир квадрата одступања експерименталних тачака од теоријске криве најмањи [125,128].

б) Анализа осетљивости

Проблем свих метода за вишекритеријумску анализу је у субјективности при одређивању тежинских коефицијената критеријума. Зато је након добијања оптималног решења неопходно урадити и анализу осетљивости тј. тестирање осетљивости алтернатива на мале промене у вредностима тежинских коефицијената. Уколико је након промене вредности тежинских коефицијената редослед алтернатива остао непромењен може се сматрати да су грешке у процени тежина критеријума занемарљиве. Међутим, уколико дође до промене у редоследу алтернатива, потребно је детаљно преиспитати вредности тежинских коефицијената критеријума.

Анализа осетљивости се изводи тако што се постојећим вредностима тежинских коефицијената насумично мења вредност у интервалу од $\pm 5\%$.

Програм MODIPROM има могућност и графичког приказа анализе осетљивости. Ефекти утицаја тежинских коефицијената на коначан редослед алтернатива се могу видети на графичком приказу „Покретних тежина“ чиме се знатно олакшава доношење коначне одлуке.

в) Избор најпогодније алтернативе

На основу спроведене свеобухватне вишекритеријумске анализе и анализе осетљивости се коначно врши избор најповољније алтернативе тј. апсорпционог материјала. Том приликом је потребно дискутовати усвојено решење и у закључку предложити најповољнију алтернативу.

4.2.4 Имплементација решења

Фаза имплементације представља процес у ком је усвојено решење потребно применити у реалним условима за решење конкретног проблема. Пре примене је потребно направити план имплементације а у зависности од успешности имплементације често је неопходно кориговати читав процес решавања проблема [122].

Искуство стечено кроз примену предложеног модела на конкретним примерима треба да доведе до унапређења модела како би процес избора звучно апсорпционих материјала био квалитетнији и успешнији.

На основу напред реченог се може констатовати да се фаза имплементације састоји из следећих подфаза:

- плана имплементације,
- имплементације решења и
- корекција процеса решавања проблема.

4.3. Избор алтернатива за заштиту од ускопојасне и тоналне буке [СРПС 1996-2]

Како су у претходном поглављу дефинисани математички модели за одређивање коефицијента апсорпције за различите материјале, то ће овде бити приказан поступак избора могућих алтернатива пенастих, зрнастих и влакнастих материјала.

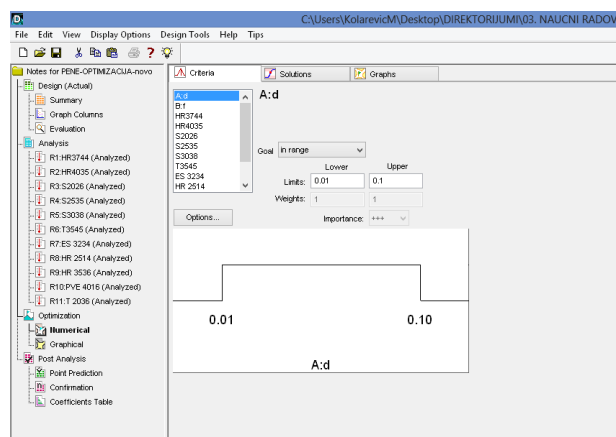
С обзиром да су стохастички модели формирану у софтверском пакету Design Expert и да овај софтвер има модул за оптимизацију то је могуће упоредо анализирати више математичких модела и извршити оптимизацију за више модела одједном. За потребе избора апсорпционог материјала је коришћен модул за нумеричку оптимизацију.

4.3.1 Избор алтернатива из базе ПУ пена

За задати интервал фреквенције и минималне и максималне вредности дебљине материјала софтвер рачуна оптималну дебљину материјала и вредности коефицијената апсорпције за све типове ПУ пена за које поседује математичке моделе.

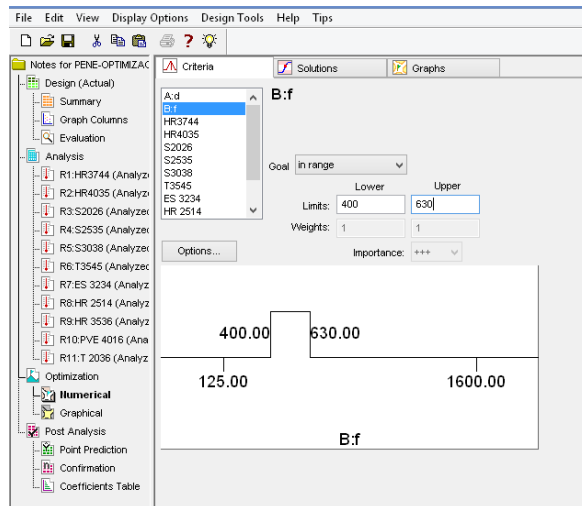
У процесу оптимизације је потребно дефинисати критеријуме и циљеве за сваки регресиони модел како би се добио предлог најбољих решења тј. препорука за избор врсте и дебљине материјала са аспекта коефицијента апсорпције.

С обзиром да су својства коефицијента апсорпције пенастих материјала испитивана у распону од 10 до 100 mm (0,01 – 0,1 m) то је потребно као циљну вредност за параметар **A** (дебљина материјала) одабрати вредност између 10 и 100 mm (слика 4.1.).



Слика 4.1. Избор критеријума за дебљину материјала

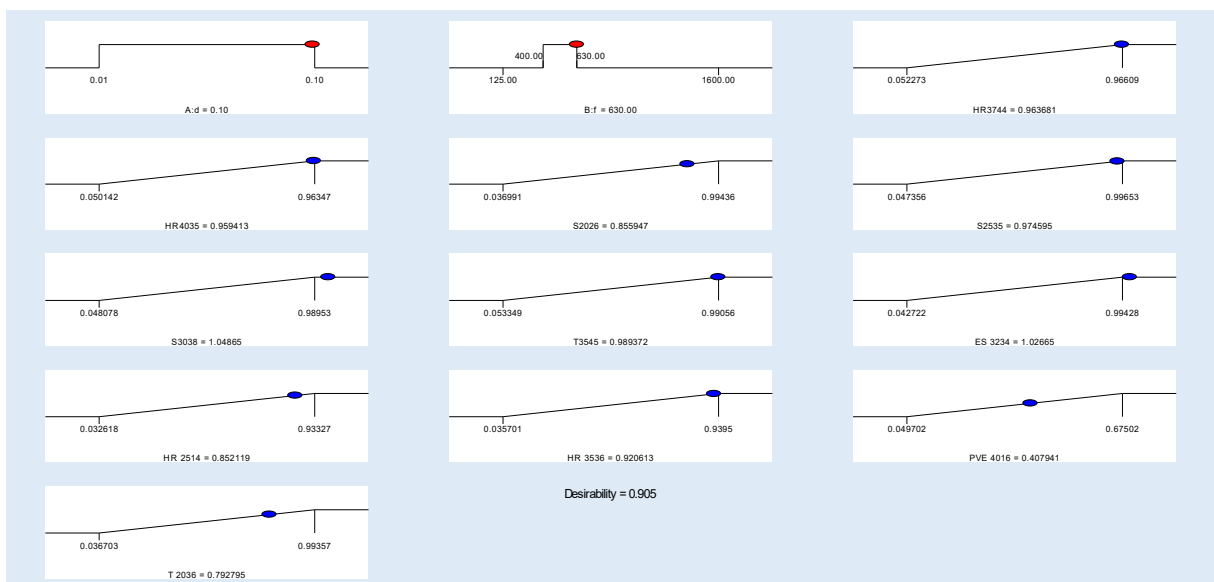
За параметар **B** (фреквенција) се бира распон фреквенције у ком је ниво буке највиши и за који је потребно одабрати материјал који ће највише апсорбовати буку. Нпр. уколико се утврди да је ниво буке највиши у интервалу од 400 до 630 Hz онда се као циљ дефинише распон фреквенције од 400 до 630 Hz (доња граница-Lower limit LL=400 Hz а горња граница -Upper Limit UL=630 Hz) (слика 4.2.).



Слика 4.2. Избор критеријума за фреквенцију

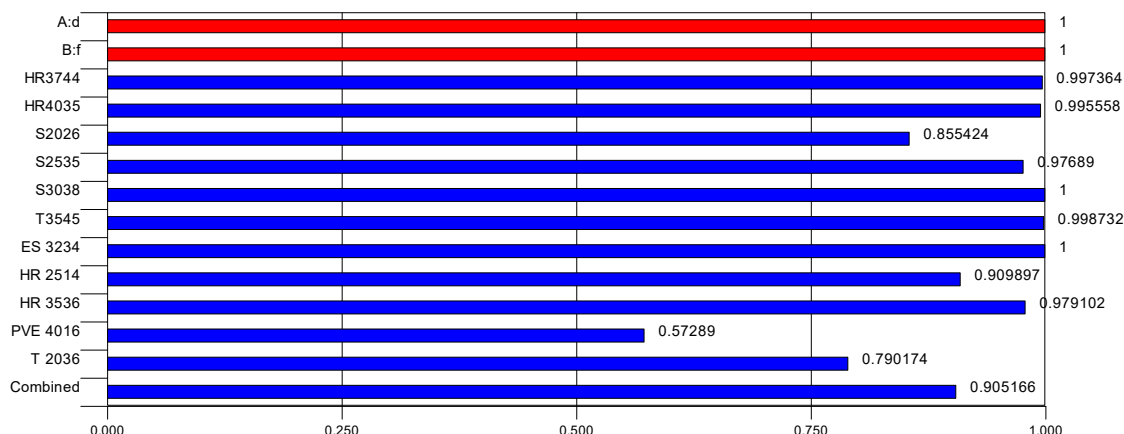
За све врсте материјала се захтева максимална вредност коефицијента апсорпције тако да се за циљ бира вредност “maximize”. У софтверском пакету Design Expert је могуће дефинисати “тежину” критеријума (Weight) у распону од 0,1 до 10 и “значај” критеријума (Importance) од 1 до 5. Променом вредности за “значај” критеријума се може дати предност некој врсти пене у односу на друге пене.

За задате критеријуме софтвер даје оптималну варијанту за сваку врсту пене и “жељену вредност” (Desirability) за предложену варијанту. За предложено решење, програм црта циљеве као узлазне рампе да укаже на то да циљ постаје пожељнији са порастом вредности коефицијента апсорпције (слика 4.3.).



Слика 4.3. Графички приказ жељених вредности задатих циљева

Жељене вредности сваког критеријума за одабрану солуцију се приказују и дијаграмом у облику стуба (Bar Graph) при чему је дужина стуба пропорционална оствареној жељеној вредности критеријума (слика 4.4.).



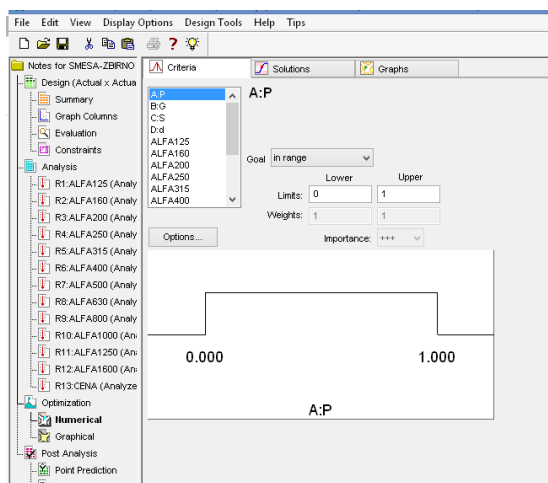
Слика 4.4. Графички приказ жељених вредности задатих циљева

4.3.2 Избор алтернатива из базе смеше зрнастих материјала

Стохастички модели за смеше зрнастих материјала су добијени на два начина: по терцама и као збирни (интегрални) модел.

Уколико је потребно извршити избор материјала само за одређену фреквенцију онда се из модела за задату фреквенцију у модулу за нумеричку оптимизацију дефинишу следећи критеријуми:

- дебљина материјала –(параметар **D**) у интервалу од 10 до 50 mm,
- процентуални удео компоненте смеше (параметри **A**, **B** и **C**) у интервалу од 0 до 1 што одговара процентуалном уделу компоненте у смеси од 0% до 100% (слика 4.5.),
- за терцну фреквенцију (или за више њих) коју треба апсорбовати се уноси критеријум “maximize”,
- „тежина“ критеријума (Weight) у распону од 0,1 до 10,
- „значај „ критеријума (Importance) у распону од 1 до 5.



Слика 4.5. Избор критеријума за компоненте смеше

Променом вредности за „значај“ критеријума се може дати предност једној или више терцних фреквенција у односу на друге.

У процес нумеричке оптимизације је могуће укључити и цене материјала тако да се може захтевати максимално повећање процентуалног удела најјефтинијег састојка и свођење удела најскупљег материјала на минимум.

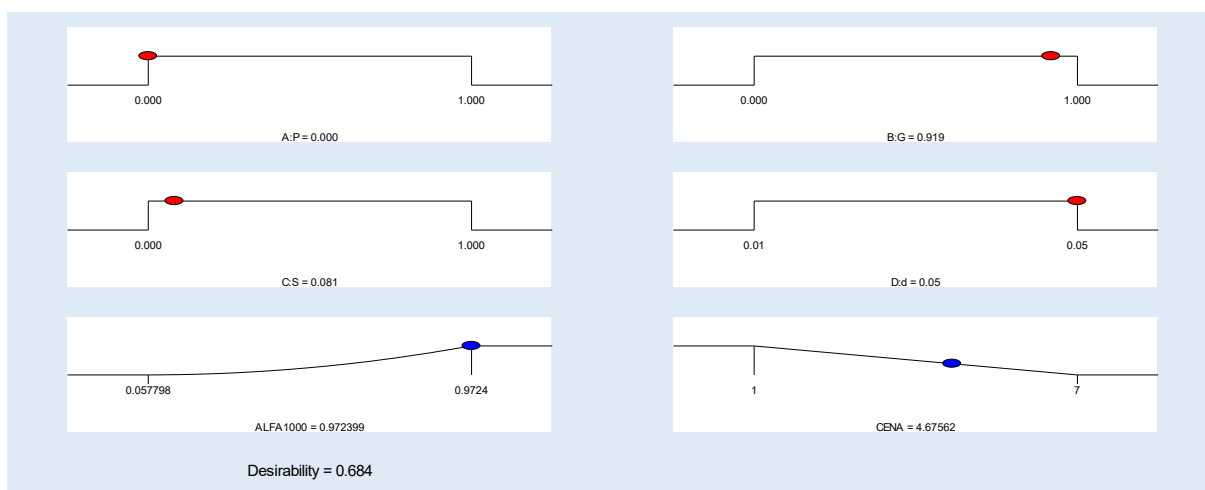
Укупна цена смеше се може изразити линеарном једначином која представља производ цене јединице мере појединачне компоненте и процентуалног удела те компоненте у смеси:

$$C = c_p * P + c_g * G + c_s * S \quad (4.5)$$

где је:

- C – јединична цена смеше зрнастих материја,
- c_p, c_g и c_s – цена јединице мере појединачних компоненти (пластика, гума и песак),
- P, G, S – процентуални удео појединачне компоненте у смеси (пластике, гуме и песка).

Из скупа решења, софтвер предлаже решење које има највећу „жељену вредност“. Сва решења се приказују табеларно а за предложено решење се црта график на коме се види жељена вредност и остварене вредности задатих ограничења (слика 4.6.).



Слика 4.6. Графички приказ жељених вредности задатих циљева

Уместо базе у којој се налази 12 математичких модела по терцама може се користити збирни модел коефицијента апсорпције у функцији од 5 независних променљивих: 3 компоненте смеше (процентуални удео пластике, гуме и песка) и 2 компоненте процеса (дебљина материјала и фреквенција).

Дефинисање критеријума оптимизације је исто као у претходном случају с тим да се за фреквенцију уноси интервал фреквенције за који се тражи максимална вредност коефицијента апсорпције.

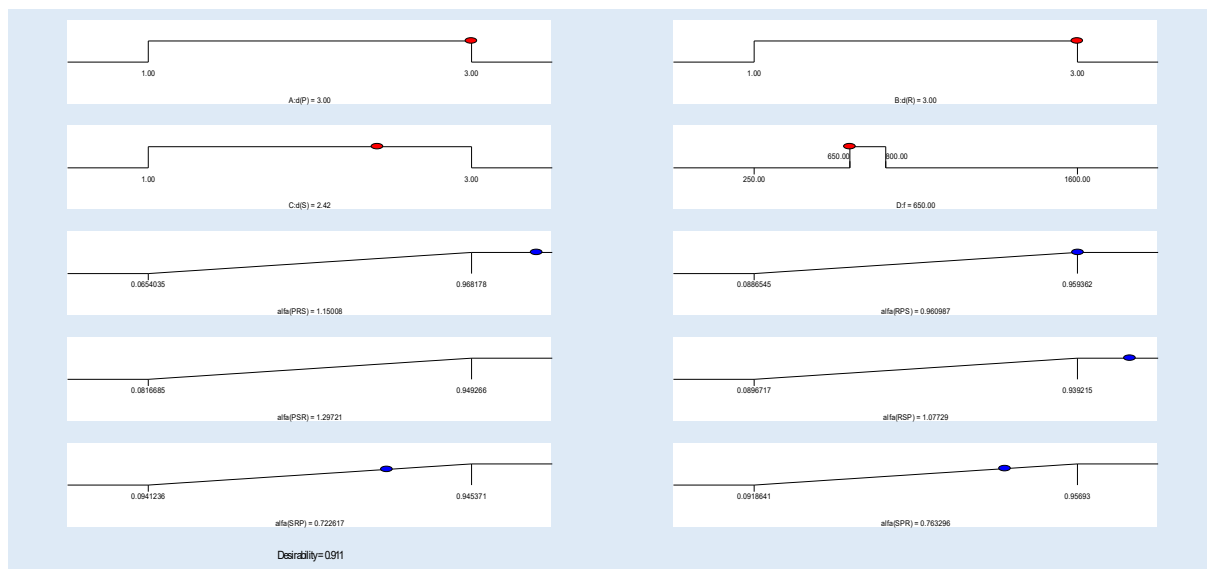
4.3.3 Избор алтернатива из базе вишеслојних зрнастих материјала

За вишеслојне зрнасте материјале је формирано 6 математичких модела у зависности од редоследа слагања слојева. За избор могућих комбинација је потребно дефинисати следеће критеријуме:

- дебљине појединачних слојева материјала треба дефинисати у интервалу од 10 до 30 mm тј. потребно је као циљну вредност за параметре: **A** (дебљина слоја пластике), **B** (дебљина слоја гуме) и **C** (дебљина слоја песка) одабрати вредности између 10 и 30 mm,
- за параметар **D** - фреквенцију коју треба апсорбовати се уноси доња (“Lower”) и горња (“Upper”) граница фреквентог опсега,
- за коефицијент апсорпције сваке комбинације редоследа слојева, за које су урађени математички модели, критеријум треба да буде максимизација (“maximize”).

Уколико је потребно, може се додатно дефинисати “тежина” критеријума (Weight) у распону од 0,1 до 10 и “значај” критеријума (Importance) од 1 до 5.

Из мноштва могућих решења, софтвер предлаже решење које има највећу „жељену вредност“. Вредности свих критеријума за сва могућа решења софтвер приказује табеларно а за предложено решење се даје и графички приказ (слика 4.7.)



Слика 4.7. Графички проказ остварених вредности задатих циљева за комбинације вишеслојних зрнастих материјала

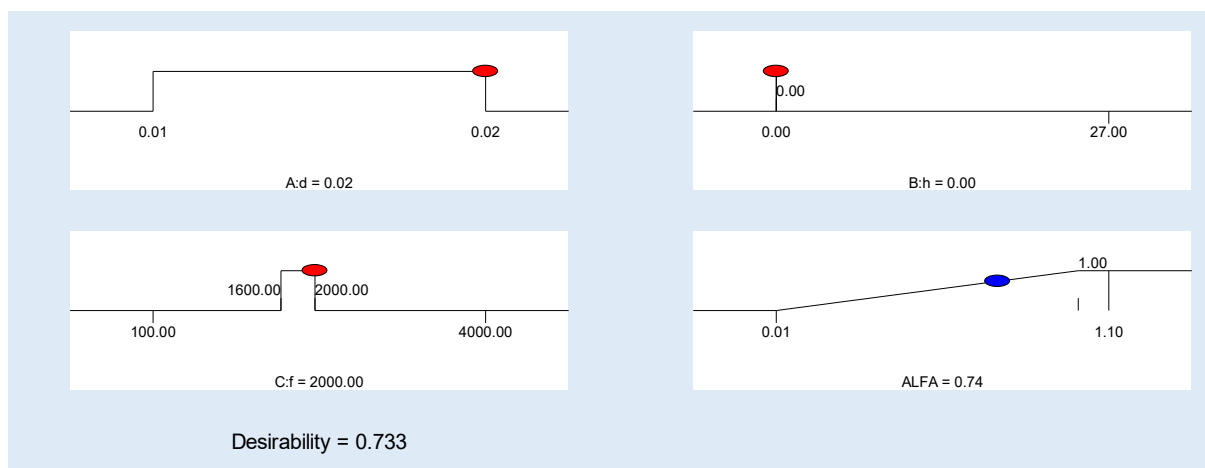
У процес нумеричке оптимизације је могуће укључити и цене материјала тако да се као додатни критеријум може уврстити и минимална цена вишеслојне комбинације материјала.

4.3.4 Избор алтернатива из базе влакнастих материјала

За избор најповољније варијанте влакнастих материјала у модулу за нумеричку оптимизацију софтверског пакета Design Expert је потребно дефинисати:

- дебљину апсорпционог материјала у распону од 1 cm до 2 cm,
- најнижу и највишу вредност фреквенције за коју се тражи максимизација коефицијента апсорпције материјала.

Из фонда могућих решења софтвер предлаже најповољнију варијанту са највећом „жељеном вредношћу“ и даје графички приказ остварених вредности задатих критеријума (слика 4.8.).



Слика 4.8. Графички приказ остварених вредности задатих циљева за влакнасти материјал

4.4. Утврђивање карактеристика звучне апсорпције и избор материјала за заштиту од широкопојасне саобраћајне буке

Оцена апсорпције елемената за заштиту од саобраћајне буке ефикасно се може извршити једнобројном вредношћу звучне апсорпције ($DL\alpha$) дефинисане стандардом BS EN 1793-1.

4.4.1 Друмски саобраћај као извор буке

Бука друмског саобраћаја у урбаним срединама има значајну улогу у загађењу животне средине и представља велики еколошки проблем. Настаје као последица рада мотора са унутрашњим сагоревањем, контакта пнеуматика, површине коловоза и аеродинамичке буке при проласку возила. Број возила на путевима је у сталном порасту, што условљава повишење нивоа буке у зонама око саобраћајница. Истраживања су показала да се тршкови настали као последица друмског саобраћаја крећу од 0,2 до 2% БДП [129]. Од свих извора буке највећи проценат отпада на буку саобраћаја, са око 81%, док на остале изворе буке (индустрија, грађевински послови и бука од активности у слободно време) отпада око 19% [129]. У укупном износу од 81%, који се односи на буку саобраћаја, у већим урбаним срединама, 50% отпада на друмски саобраћај, 18% на железнички саобраћај и 13% на ваздушни саобраћај.

Бука друмског саобраћаја је највећи извор буке у животној средини, па јој са становишта заштите од буке треба посветити посебну пажњу. Без обзира на наведене податке, активности за смањење буке у животној средини по правилу су мањег приоритета од оних које се спроводе када су у питању загађење воде и ваздуха. Овакво стање је неопходно мењати, јер је у многим високоразвијеним земљама бука најзначајнији фактор загађења животне средине [5].

Србија, као потенцијални кандидат за чланство у Европској унији, већ настоји да своју регулативу усклади са европским препорукама. За регулативу буке друмског саобраћаја у Србији непосредно су везана следећа документа:

1. Закон о заштити од буке у животној средини ("Сл. гласник РС" бр. 36/2009, 88/2010)
2. Уредба о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини ("Сл. гласник РС" бр. 75/2010)

Пошто не постоји правилник или пропис, стандард или верификована национална метода за прорачун нивоа саобраћајне буке, у пројектантској пракси се примењују норме других земаља. Преглед метода које се користе за пројектовање мера заштите од буке у европским земљама показује да постоје два основна приступа решавању овог проблема [129]:

- државе као што су Немачка, Велика Британија, Швајцарска, Аустрија, Француска и скандинавске земље имају своје властите методе,
- земље које немају своје властите методе (Словенија, Пољска) усвојиле су неке од метода претходно наведених држава које су се најбоље уклопиле у њихове специфичне услове.

При формирању нове методе мора се водити рачуна о препорукама Европске комисије [130].

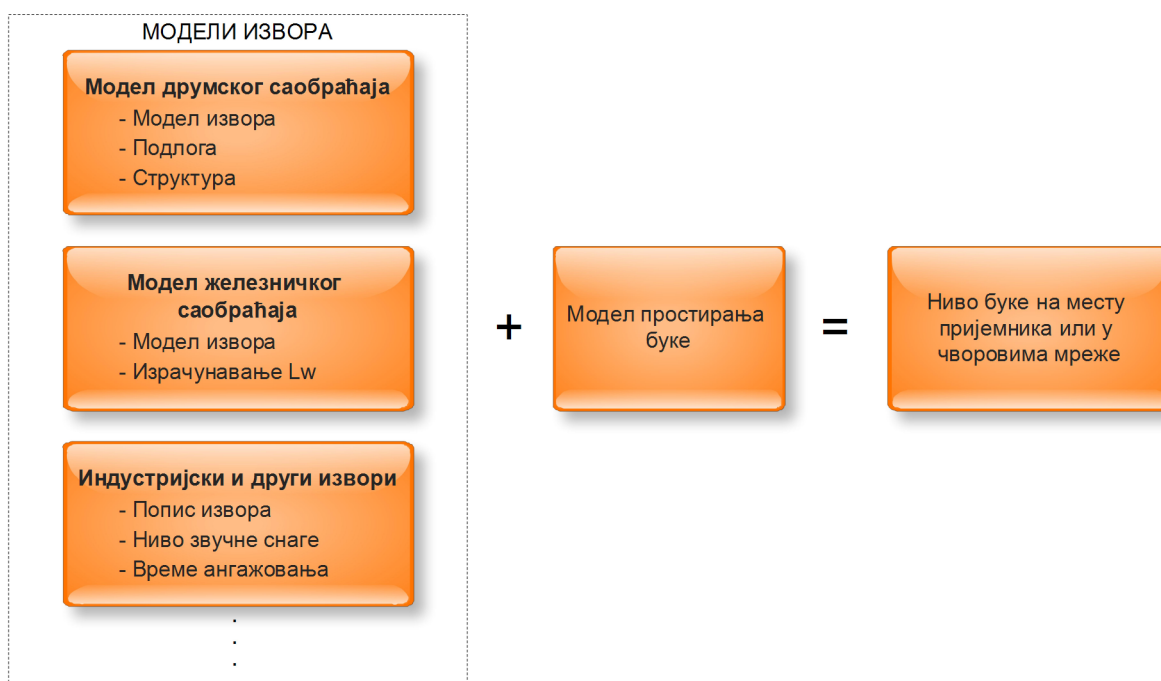
4.4.2 Модели за прогнозу буке

Нивои буке на месту пријемника или прорачунске тачке могу се одредити применом различитих модела, који често могу заменити дуготрајна и скупа мерења. Израчунавање нивоа бвуке је бољи, а у извесним случајевима и једини начин за оцену нивоа буке, као на пример када се:

- мерење врши у условима високе резидуалне буке,
- даје прогноза нивоа буке,
- анализирају алтернативна решења заштите од буке,
- указује потреба за израдом контролних карата буке.

Нивои буке се израчунавају применом међународних или националних стандарда који дефинишу процедуру прорачуна нивоа буке која се може представити у виду алгоритма. Алгоритми су најчешће оријентисани ка одређеном типу извора. Изузетак представља ИСО 9613 који одређује ниво буке на основу звучне снаге извора. Због тога се овај стандард може применити за све врсте звучних извора за које је познат податак о нивоу звучне снаге.

Алгоритми се углавном базирају на комбинацији модела извора буке и модела простирања буке. Комбинацијом ова два модела може се одредити ниво буке у прорачунској тачки. Стандардизовани алгоритми су емпиријске природе и базирају се на физичким законима простирања таласа. Потреба да се истовремено рачуна ниво буке који потиче од више извора на више различитих тачака, довела је до неопходности потребе примене рачунара за решавање овакве врсте проблема.



Слика 4.9. Дводелни модел алгоритма за израчунавање нивоа буке

За примену алгоритма потребно је дефинисати карактеристике извора, топографију терена и геометрију објеката који утичу на простирање буке. Прорачунске тачке се најчешће дају преко чворова мреже. Због практичности примене у прорачунским тачкама се израчунава укупни еквивалентни ниво буке у dB(A). Неки алгоритми имају могућност израчунавања нивоа буке у октавним опсезима а укупни ниво буке се добија енергетским сабирањем октавних нивоа.



Слика 4.10. Модели за предвиђање нивоа саобраћајне буке

4.4.3 Методе прорачуна саобраћајне буке

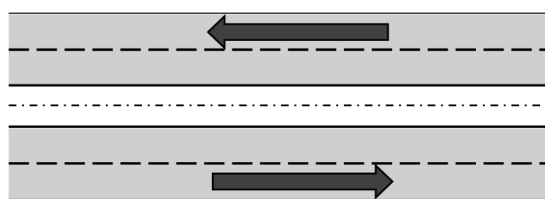
Познате су бројне методе за прорачун нивоа саобраћајне буке. Поред сличности када су у питању утицајни параметари на прорачун имисије нивоа буке, постоје и одређене разлике међу методама, узимајући у обзир да се базирају на емпиријским истраживањима која су се спроводила у различитим земљама у којима саобраћај често има нека специфична обележја. Посебно су интересантне две методе: немачка која се примењује у многим земљама које немају сопствену регулативу за израду карата буке, и француска метода која је препоручена од стране Европске комисије за израду стратешких карата буке. Ове методе се неретко у литератури називају и модели [131], или пак само стандарди [5].

Заједничке карактеристике немачке методе прорачуна нивоа буке (RLS 90) и француске препоручене методе прорачуна (NMPB-Routers-96), према [132] су:

- примењен индикатор буке је $L_{A,eq}$,
- модел се може прилагодити ради предвиђања L_{den} и L_{night} ,
- приступ прорачуну: растављање линијских извора у еквивалентне тачкасте изворе
- опис (линијског) извора: тачка,

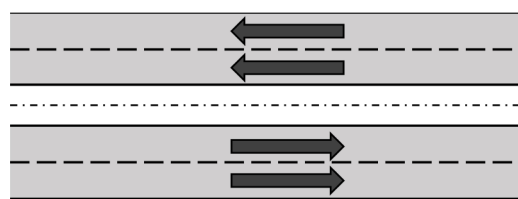
- утицајни параметри за прорачун емисије нивоа буке: удео теретних возила у саобраћајном оптерећењу, саобраћајно оптерећење, брзина,
- остали корекциони фактори извора: уздужни нагиб пута, врста подлоге коловоза,
- корекциони фактори ширења буке су: утицај геометрије на ширење звука, апсорпција звука од тла и ваздуха, метеоролошке прилике, конфигурација терена, звучне баријере и друге препреке и рефлексација од оближњих фасада.

У немачкој и француској методи разликују се модели извора (место емисије). Према немачкој методи код саобраћајница које имају више коловозних трака, извор буке је смештен у спољашње коловозне траке, док је код француске методе свака коловозна трака засебан извор, као што је приказано на сликама 4.11. и 4.12.



RLS 90

Слика 4.11. Положај места емисије према немачкој методи RLS 90



NMPB

Слика 4.12. Положај места емисије према француској методи NMPB

Француска метода узима у обзир све параметре као и немачка метода, те додатно и стање саобраћајног тока. Врста саобраћајног тока, осим брзине, укључује убрзање, успорење, снагу мотора и пулсирајуће или континуално кретање возила.

Саобраћајни ток се дефинише кроз четири категорије [132]:

- *Континуални ток*: на посматраном делу пута возила се крећу константном брзином. Саобраћајни ток је временски и просторно стабилан најмање десет минута.
- *Континуирано – пулсирајући ток*: није стабилан ни у времену ни у простору. Може се одредити просечна брзина која је током довољно дугог периода стабилна. Овај тип саобраћајног тока је карактеристичан за градски центар и путеве са великим бројем чворишта.
- *Пулсирајући убрзавајући ток*: значајан део возила убрзава. Типичан пример је саобраћај на брзим путевима иза раскрснице, на изласцима са ауто-пута, код наплатних рампи и сл.
- *Пулсирајући успоравајући ток*: значајан део возила успорава. Уобичајено се појављује на прилазу главним градским раскрсницама.

Свака од ове четири категорије разликује се по томе, да ли је саобраћајница на успону, низбрдици или је нивелета хоризонтална.

4.4.4 Интегрални модел за одређивање једнобројне вредности оцене звучне апсорпције DLa

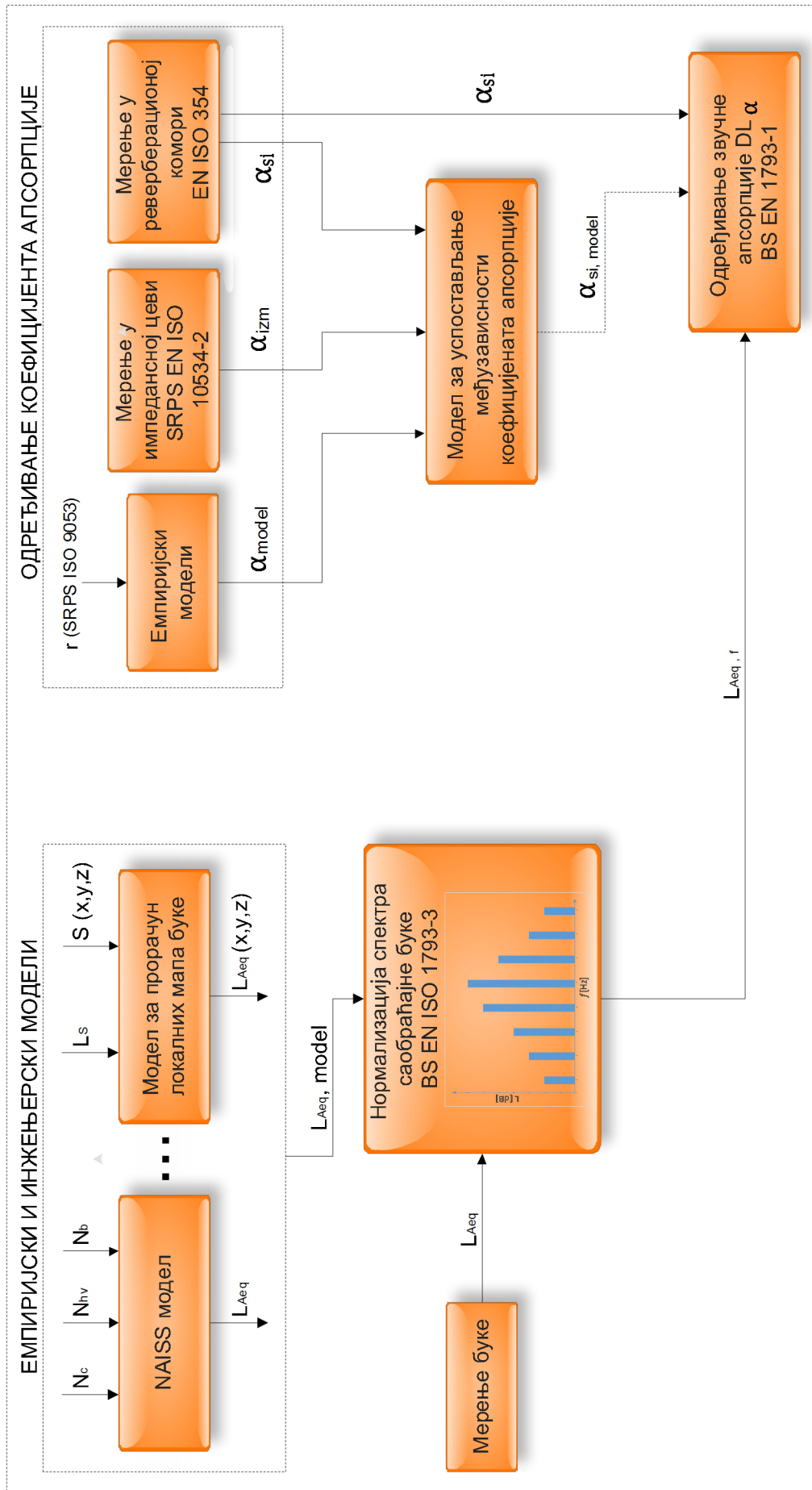
Употреба једнобројне вредности оцене звучне апсорпције DLa у смислу поређења укупног учинка смањења буке елемената не узимајући у обзир локалне услове као што су структура саобраћаја и врста коловоза, може представљати једноставан начин за рангирање алтернатива у процесу избора елемената за заштиту од буке.

Шематски приказ интегралног модела за одређивање једнобројне вредности оцене звучне апсорпције DLa материјала за заштиту од широкопојасне саобраћајне буке је приказан на слици 4.13.

Нормализовани спектар саобраћајне буке се може утврдити на више начина. Еквивалентни ниво буке (L_{Aeq}), било да је добијен предвиђањем помоћу емпиријских или инжењерских модела или мерењем, може се нормализовати применом стандарда BS EN ISO 1793-3.

Одређивање коефицијента апсорпције (α_{si}) елемената за заштиту од саобраћајне буке потребно је измерити у реверберационој комори према стандарсу EN ISO 354, како би испитивања у лабораторијским условима што више одговарала условима реалне примене на терену. Мерења у реверберационој комори су веома захтевна и скупа, па развијање модела за утврђивање међузависности коефицијента апсорпције који је одређен применом различитих метода може бити од велике користи.

Узимајући у обзир вредности коефицијента апсорпције материјала и елемената за заштиту од саобраћајне буке и нормализовани спектар саобраћајне буке могу се одредити вредности звучне апсорпције према стандарду BS EN 1793-1.



Слика 4.13. Интегрални модел за одређивање звучне апсорпције елемената за заштиту од саобраћајне буре

а) NAISS модел за прорачун нивоа емисије буке друмског саобраћаја у урбаним срединама

За предузимање одговарајућих мера заштите од буке саобраћаја, неопходно је познавати функционалну везу између емисије буке, параметара саобраћаја и карактеристика саобраћајница. Модели за прогнозу нивоа саобраћајне буке су веома значајни јер омогућавају предикцију индикатора буке у функцији од структуре и фреквенције саобраћаја и карактеристика саобраћајница.

Полазећи од постојећег стања нивоа саобраћајне буке и прогнозираног нивоа буке помоћу модела, могуће је проценити утицај буке за потребе развојних пројеката нових стамбених насеља, нових саобраћајница или проширењу постојећих, при преумеравању токова саобраћаја или пак увођењу елемената саобраћајне инфраструктуре као што су семафори, пружни прелази, спојнице мостова, надвожњака и препуста и сл. Моделирање нивоа буке омогућава акустичко зонирање урбаних средина према намени простора.

У Србији не постоји развијени модел за прорачун емисије буке друмског саобраћаја, већ се углавном користе развијени софтверски пакети за прорачун буке или модели расположиви у литератури.

NAISS модел за прорачун нивоа емисије буке друмског саобраћаја у урбаним срединама заснован је на функционалним зависностима које омогућавају прорачун нивоа буке поред градских саобраћајница. Модел је формиран и верификован коришћењем података резултата мерења добијених при систематском мониторингу буке друмског саобраћаја на територији града Ниша.

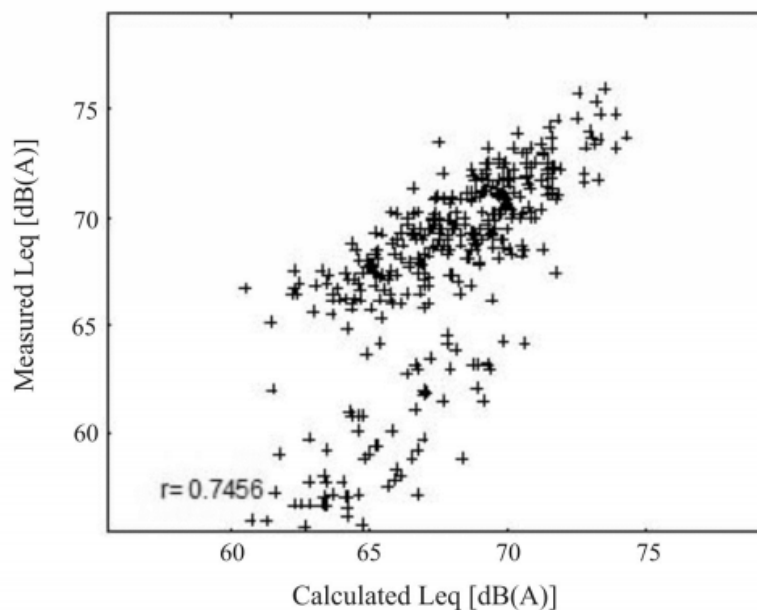
Утицај променљивости компонента саобраћајног тока се одражава на еквивалентни ниво буке. Укупан број возила је разложен на број путничких и теретних возила и број аутобуса. Модел користи три улазна параметра: број путничких возила (N_c), број теретних возила (N_{hv}) и број аутобуса (N_b). Као излазни резултат модел даје еквивалентни ниво буке на растојању 7,5 m од саобраћајнице.

Еквивалентни ниво буке је логаритамска функција еквивалентног флуksа моторних возила, где су константе модела одређене у процесу фитовања експерименталних података [1]. Модел се може реализовати и са једним улазним параметром – укупни број возила у току једног сата. Модел са три улазна параметра даје могућност оцењивања променљивости појединих категорија саобраћајног тока на еквивалентни ниво буке.

Као референтно возило узето је путничко возило, а одређивањем константи одређен је еквивалентан број путничких возила који замењује дејство једног теретног возила, односно једног аутобуса.

Константе модела су добијене у процесу оптимизације модела фитовањем експерименталних података применом модела Nelder-a и Mead-a за одређивање минимума функције више независних променљивих [133]. Функција која се минимизира формира се као разлика измереног и израчунатог нивоа буке са A пондеризацијом. Процес фитовања је извршен помоћу програма написаног у програмском пакету „Matlab“. Програм поред могућности фитовања у циљу одређивања оптималних вредности константи у моделу, омогућава предикцију еквивалентног нивоа буке на основу протока друмског саобраћаја

подељеног у три класе возила: путничка, теретна и аутобуси. Поред тога, програм омогућава статистичку анализу одступања израчунатог и измереног нивоа буке, као и корелациону анализу ова два нивоа.



Слика 4.14. Измерене вредности L_{eq} у односу на израчунате по NAISS моделу са једном једначином за све мерне тачке [133]

У циљу формирања модела најпре је извршено фитовање на основу експерименталних података за 11 мерних тачака и на тај начин је добијен модел са једном једначином за предикцију нивоа саобраћајне буке. Поделом мерних тачака на дијаграму распршености на два подскупа извршено је груписање мерних тачака према нивоу буке, тако да прва група обухвата нивое од 65 до 75 dB(A) а у друга група нивое буке од 55 до 65 dB(A). За тако формиране групе података извршено је фитовање и добијен је модел са једначинама које дефинишу еквивалентни ниво буке друмског саобраћаја у функцији структуре саобраћајног флукса:

$$L_{eq} = 10 \log(N_c + 3.7N_{hv} + 1.9N_b) + 38.2$$

$$55 \text{ dB}(A) \leq L_{eq} \leq 65 \text{ dB}(A) \quad (4.6)$$

$$L_{eq} = 10 \log(N_c + 11.7N_{hv} + 3.1N_b) + 44.3$$

$$65 \text{ dB}(A) \leq L_{eq} \leq 75 \text{ dB}(A) \quad (4.7)$$

где је:

- N_c - број путничких возила,
- N_{hv} - број теретних возила,
- N_b - број аутобуса.

Помоћу NAISS модела еквивалентни ниво буке друмског саобраћаја на растојању 7,5 m од саобраћајнице одређује се на основу познатог протока саобраћаја који се састоји од броја путничких и теретних возила и аутобуса.

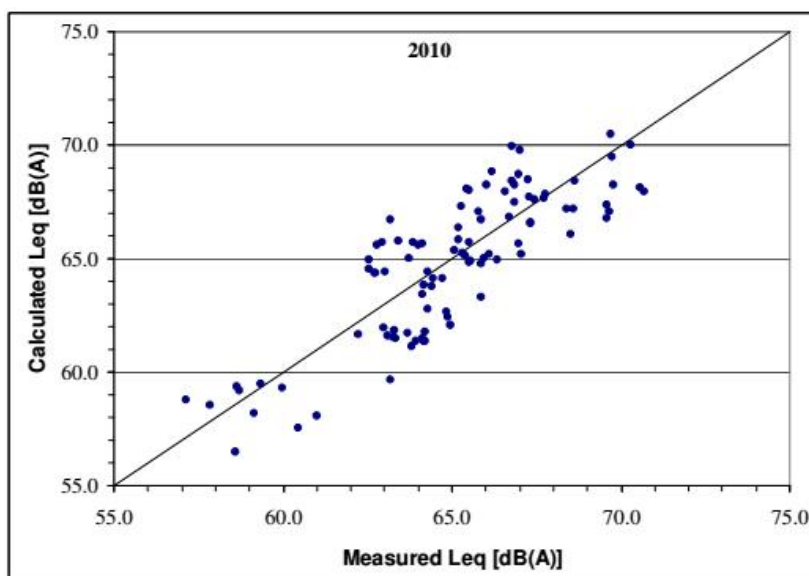
За верификацију NAISS модела, резултати прорачуна нивоа буке друмског саобраћаја упоређени су са измереним вредностима нивоа буке на територији града Ниша у периоду од 2008 - 2010. године. Да би се испитала исправност NAISS модела извршена је статистичка анализа а резултати су приказани у табели 4.1.

Табела 4.1. Резултати статистичке анализе разлике нивоа буке израчунатих помоћу NAISS модела и измерених вредности [133]

	2008.	2009.	2010.
$\Delta\bar{L}$	1,63	1,66	1,52
σ	1,08	1,10	0,95
N	110	97	98

Где су:

- $\Delta\bar{L}$ - разлика израчунатог и измереног нивоа буке,
- σ - стандардна девијација,
- N - број мерења.



Слика 4.15. Дијаграм расипања прорачунатих и измерених нивоа буке на узорку саобраћајног тока из 2010. године [133]

Највећа стандардна девијација је утврђена за 2009. годину и износи 1,1. Стога се може очекивати да ће израчуната вредност нивоа буке L_{eq} за ниво поверења од 95% бити у интервалу $L_{eq} \pm 2,2$ dB(A). Добијене вредности интервала поузданости одговарају проширеној мерној несигурности.

Веће девијације за појединачне узорке настају услед појаве појединачних звучних догађаја као што су звук сирене аутомобила или неисправан издувни систем аутомобила. Овакви појединачни догађаји не могу се предвидети NAISS моделом, као уосталом ни ма којим другим моделом.

Модел NAISS је математички модел са три улазна параметра (број лаких и тешких возила и аутобуса) и једним излазом (еквивалентни ниво буке) и две одвојене једначине за два опсега нивоа буке. Резултати упоредне анализе показују да NAISS модел даје боља

предвиђања нивоа буке на територији града Ниша од било ког другог модела из литературе. Верификација модела је потврђена на више од 300 мерних узорака (подаци о нивоу буке и структури саобраћаја) прикупљени од 2008-2010. године у граду Нишу.

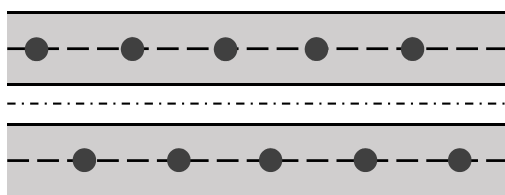
Полазећи од нивоа саобраћајне буке израчунатог помоћу модела NAISS могуће је проценити ефекте буке за потребе пројеката урбаног развоја, планирања нових или проширења постојећих саобраћајница, преусмеравања саобраћајних токова и увођење елемената саобраћајне инфраструктуре. Модел NAISS може се користити при акустичком зонирању урбаних средина.

б) Предлог модела извора буке код метода за прорачун саобраћајне буке

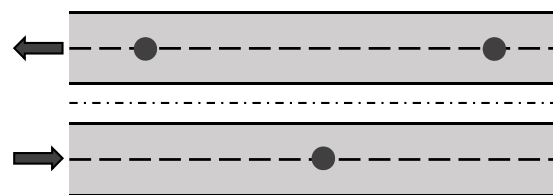
Употребљивост методе највише зависи од њене поузданости и прецизности предвиђања нивоа буке на месту имисије. Поузданост методе се може описати њеном тачношћу, односно одступањем резултата прорачуна у односу на мерења на терену. Важно је да метода буде једноставна и разумљива пројектантима. Примена модела захтева одговарајућа акустичка знања и процене при избору параметара за конкретни случај примене.

Један од најважнијих параметара код метода за прорачун саобраћајне буке је извор буке. Моделирање извора буке и избор индикатора буке који га карактеришу је један од кључних задатака. Саобраћајни ток представља линијски извор буке који се зарад поједностављења може представити скупом тачкастих извора.

Код саобраћајница са више коловозних трака у градским срединама, најчешће се између коловозних трака са супротним смеровима налази разделно острво. Овај простор је погодан за постављање мерне опреме за мерење буке. Овако добијене мерне вредности се могу искористити као индикатори који карактеришу тачкасти извор у моделу извора саобраћајне буке.



Слика 4.16. Положај тачкастих извора буке у моделу извора саобраћајне буке [134]



Слика 4.17. Положај тачкастих извора буке одређених у односу на проток саобраћаја

Познато је да највећи утицај на ниво буке имају најближи звучни извори. Да би се узео у обзир и ниво буке који потиче из свих коловозних трака, тачкасти извори су смештени на средини растојања које чине саобраћајне траке истог смера, као што је приказано на сликама 4.16. и 4.17.

Према [134] тачкасти извори буке су описани еквивалентним нивоом буке ($L_{A,eq}$) који је измерен на разделном острву саобраћајнице. Извори су постављени наизменично са једне и друге стране разделног острва, на међусобном растојању које возило пређе за једну секунду, крећући се просечном брзином на тој деоници пута.

На слици 4.17. приказан је предлог новог модела извора саобраћајне буке који као индикатор узима ниво изложености звуку (L_{AE}). Број извора који истовремено емитује буку је одређен просечним протоком возила и средњом брзином на посматраној локацији. Еквивалентни ниво буке појединачног тачкастог извора који у неком временском периоду ствара друмски саобраћај, одређује се на основу израза:

$$L_{eq} = L_{AE} + 10 \log(N) - 10 \log(T) \quad (\text{dB(A)}) \quad (4.8)$$

где су:

- L_{AE} – ниво изложености звуку dB(A)
- N – просечан број пролазака возила у посматраном временском интервалу
- T – временски интервал

в) Модел за прорачун локалних мапа буке

Основни проблем при прорачуну мапа буке представља модел простирања буке који се користи. Приближне формуле које се користе у инжењерским моделима су изведене под одређеним ограничењима, па зато њихова примена захтева пажљиво коришћење улазних података.

У Србији у овом тернутку не постоји комерцијални софтверски алат за прорачун локалних мапа буке [131]. Сви примери мапирања буке искључиво користе комерцијална софтверска решења развијена у иностранству [135,136]. Развој домаћег софтверског алата за мапирање буке је веома значајно питање у циљу унапређења заштите животне средине у Србији. Развој софтвера за прорачун локалних мапа буке је први корак ка реализацији таквог софтвера.

Софтвер за прорачун локалних мапа буке омогућава прорачун поља буке које ствара више тачкастих извора у простору у коме постоји више линијских баријера. Поље буке је представљено чворовима тродимензиооналне мреже која је формирана тако да тачке припадају површима чије све тачке имају једнаку висину у односу на терен („паралелне“ су са тереном). Терен може бити нераван, а поред поља буке које је одређено у чворовима мреже, могуће је израчунати нивое буке у изабраним карактеристичним тачкама у простору и на површинама равних фасада, при чему постоји могућност корекције због рефлексије од површине фасаде [131].

Прорачун поља буке заснива се на стандарду ISO 9613-2, према концепцији усвојеној у домаћој пракси [5]. При прорачуну се претпоставља да извори буке немају изражену директивност и да су све баријере и фасаде много шире од таласне дужине звука, тако да се дифракција може занемарити. Под тим претпоставкама, ниво буке у пријемној тачки (L) се може израчунати према изразу:

$$L = L_w + C \quad (4.9)$$

где је са L_w означен ниво звучне снаге извора, а са C корекције нивоа звука која се у примењеном моделу може изразити следећом сумом:

$$C = C_{DA} + C_G + C_B \quad (4.10)$$

где су:

- C_{DA} – корекција која настаје услед ширења таласног фронта и апсорпције у ваздуху, а израчунава се према изразу:

$$C_{DA} = 11 - 20 \log(s_{\perp}) - s_{\perp} / 200 \text{ [dB]} \quad (4.11)$$

- где s_{\perp} представља најкраће нормално растојање између извора буке и пријемне тачке;

- C_G – корекција апсорпције терена, која се израчунава према изразу:

$$C_G = \frac{h_m}{d} \left(34 + \frac{600}{d} \right) - 4,8 \text{ [dB]} \quad (4.12)$$

- у коме је са h_m означена средња висина линије која спаја извор буке и пријемну тачку,
- d - дужина те линије.

- C_B – корекција због баријере, а израчунава се према изразу:

$$C_B = -7 \cdot \log \left(5 + \frac{70 + 0,25s_{\perp}}{1 + 0,2s_{\perp}} z_{\perp} K_{w\perp}^2 \right) \text{ [dB]} \quad (4.13)$$

- у коме z_{\perp} представља разлику путева дифрактованог и директног таласа изражену формулом

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} + C_{\perp} - s_{\perp} \quad (4.14)$$

- где A_{\perp} представља растојање од извора до горње ивице баријере, B_{\perp} представља растојање од пријемника до горње ивице баријере, а C_{\perp} представља суму дужина преломних ивица код баријера са више преломних ивица. Метеоролошка корекција $K_{w\perp}$ се одређује према формули:

$$K_{w\perp} = \exp \left(-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{A_{\perp} B_{\perp} s_{\perp}}{2z_{\perp}}} \right) \text{ [dB]} \quad (4.15)$$

г) Нормализовани спектар саобраћајне буке

Главне карактеристике саобраћајне буке као што су губици услед простирања и апсорпције су фреквенцијски зависне величине. Због тога постоји потреба да се дефинише спектар саобраћајне буке. Стандард BS EN 1793-3:1998 дефинише основне особине саобраћајне буке измерене на путу у погледу карактеристичног нормализованог спектра саобраћајне буке.

Стандард [137] даје нормализовани спектар за оцену и процену акустичких перформанси решења намењених за смањење саобраћајне буке у близини путева.

Табела 4.2. Нормализовани спектар саобраћајне буке

Фреквенција [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
L_i [dB]	- 20	- 20	- 18	- 16	- 15	- 14	- 13	- 12	- 11
Фреквенција [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
L_i [dB]	- 9	- 8	- 9	- 10	- 11	- 13	- 15	- 16	- 18

Нормализовани спектар саобраћајне буке се користи за прорачун звучне апсорпције и звучне изолације исказане једним бројем код елемената за заштиту од буке у близини путева. Спектар се изражава у релативном А-пондерисаном нивоу звучног притиска у децибелима, за централне фреквенције терци у фреквенцијском опсегу од 100 Hz до 5000 Hz.

д) Унутрашње карактеристике звучне апсорпције према стандарду BS EN 1793-1

Уградња рефлексионих површина поред путева често се примењује као начин заштите од буке. Често се јавља случај да је рефлектовани звук проблем са друге стране саобраћајнице. Таква ситуација се може јавити код:

- звучних баријера, потпорних зидова или стена који рефлектују звучне таласе према незаштићеним зонама,
- рефлексионих површина које су окренуте једна према другој,
- тунели и њихови прилази.

Стандард [138] утврђује методе тестирања за одређивање звучне апсорпције елемената намењених за смањење буке поред путева. Стандард се не бави анализом губитака који нису карактеристика унутрашњих перформанси. Овај метод се може користити код елемената заштите од буке дуж железничких пруга или близу индустријских локација. У овом случају за одређивање акустићких перформанси исказаних једним бројем потребно је користити одговарајући спектар буке.

У тренутној верзији овог европског стандарда [138], основни метод је изведен из стандарда EN ISO 354:2003. У односу на претходну верзију уведена је корекција по основу губитака у ваздуху услед промене температуре и релативне влажности током испитивања. Одступања у односу на претходну верзију стандарда могу износити 1 dB до 2 dB ако се исказивање апсорпције врши једнобројном вредношћу, било у позитивном или негативном смислу. Ефекат примене корекције је веома приметан на вишим фреквенцијама. Да би се избегла могућа забуна, резултати старих мерења нису препоручљиви за примену.

Стандард [138] наводи лабораторијску методу за мерење звучне апсорпције за равне звучне баријере или равне облоге за потпорне зидове и тунеле. Она обухвата процену суштинске звучне апсорпције елемената за смањење буке који могу да се испитују у реверберационој комори према стандарду EN ISO 354, који важи само за област апсорбера не укључујући слабо пригушне резонаторе. Стандард [60] се привремено сматра релевантним за процену апсорпције елементима за заштиту од буке уз претпоставку да се лабораторијска мерења могу применити и у слободним теренским условима.

h) Једнобројна вредност оцене звучне апсорпције

Оцена апсорпције једним бројем је изведена да би се означиле перформансе производа. Појединачни коефицијент апсорпције се вреднује према нормализованом саобраћајном спектру буке дефинисаном стандардом EN 1793-3.

Оцена једним бројем звучне апсорпције DL_{α} , у децибелима, се одређује према изразу:

$$DL_{\alpha} = -10 \log \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{si} 10^{0.1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right| [dB] \quad (4.16)$$

где су:

- DL_{α} - једнобројна вредност оцене перформанси звучне апсорпције изражена као разлика А-пондерисаних вредности нивоа звучног притиска у децибелима,
- α_{si} - коефицијент звучне апсорпције на централним фреквенцијама једне трећине октаве,
- L_i - нормализован А-пондерисан ниво звучног притиска, у децибелима саобраћајне буке на централним фреквенцијама једне трећине октаве према стандарду EN 1793-3.

Ако поред навођења једнобројне вредности DL_{α} постоји потреба за категоризацијом апсорпционих перформанси она се врши према табели:

Табела 4.3. Категоризација апсорпционих перформанси према стандарду BS EN 1793-1:2012

DL_{α}	Nije određeno	$DL_{\alpha} < 4$	4 do 7	8 do 11	12 do 15	> 15
Kategorija	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅

Употреба једнобројне оцене DL_{α} користи се искључиво у сврху поређења укупног учинка смањења буке елемената, не узимајући у обзир локалне услове, структуру саобраћаја и врсту коловоза.

Основа ове смернице је нормализовани спектар саобраћајне буке дефинисан према стандарду EN 1793-3 који је релевантан за категоризацију апсорпционих перформанси површина кроз које пролази директни звучни талас путујући од извора до пријемника. При томе се не узимају у обзир рефлектовани таласи од других површина или дифрактовани таласи од ивица баријера или препрека.

4.4.5 Избор материјала

Да би се извршио избор могућих алтернатива за решење проблема саобраћајне буке неопходно је за све расположиве материјале израчунати једнобројну вредност оцене звучне апсорпције DL_{α} према напред изложеној процедури и одабрати оне материјале који имају задовољавајућу вредност овог параметра.

4.5. Оцена звучне апсорпције и избор материјала који се користе за заштиту у зградама

Оцењивање апсорпционих карактеристика звучних апсорбера који се користе у зградама се врши према стандарду BS EN ISO 11654:1997.

4.5.1 Оцена звучне апсорпције материјала за заштиту од буке у зградама

Стандардом BS EN ISO 11654:1997 су утврђене методе којима се коефицијент апсорпције који је фреквенцијски зависна величина може конвертовати у једнобројну вредност. За таква прерачунавања потребно је измерити коефицијент апсорпције према стандарду ISO 354 за сваку терцу у подручју које је од интереса за оцену. Одређени број процена дефинисаних стандардом се користи за опис акустичких својстава звучно апсорпционих производа који се користе за рутинске захвате. Овакве оцене нису примерене када се захтевају строжији захтеви у пројектовању, па се тада користе апликације које покривају цео спектар фреквенција дефинисаних референтним кривама.

Овај међународни стандард је у принципу применљив за све грађевинске производе за које је коефицијент апсорпције звука одређен у складу са стандардом ISO 354, међутим често није прикладан за примену код појединих елемената као што су ојачања, баријере и коловози.

Практичан коефицијент звучне апсорпције, α_{pi}

Појединачне вредности коефицијента апсорпције α_s измерене по опсезима 1/3 октаве према стандарду ISO 354, прерачунавају се у практични коефицијент апсорпције α_p за сваки октавни опсег.

$$\alpha_{pi} = \frac{(\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3})}{3} \quad (4.17)$$

Средња вредност се заокружује на две децимале са кораком од 0,05 а максимална вредност α_{pi} износи 1.

Пондерисан коефицијент звучне апсорпције, α_w

За израчунавање пондерисаног коефицијента звучне апсорпције α_w користе се вредности α_{pi} . Референтна крива, дефинисана стандардом, помера се према кривој α_p све док се не постигне њихово највеће могуће поклапање. Неповољно одступање (негативна разлика) се јавља на одређеној фреквенцији, када је измерена вредност мања од вредности референтне криве. При том померању потребно је негативне разлике криве α_p , у односу на стандардну криву, учинити мањим од граничне вредности која је дефинисана стандардом. Када се тај услов испуни, вредност коју референтна крива има на 500 Hz, узима се као меродавна вредност коефицијента апсорпције α_w за испитивани узорак. Уколико постоје већа премештања у односу на референтну криву, то се може исказати увођењем индикатора форме (L, M, H). Они показују да крива α_p лежи знатно изнад померене референтне криве у области ниских (L), средњих (M) или високих фреквенција (H) и да у том случају испитивани узорак у том опсегу фреквенција апсорбује више од исказане вредности α_w .

Када практични коефицијент апсорпције α_{pi} превазилази вредност референтне криве за 0,25 или више, један или више индикатора се додаје на α_w вредност.

4.5.2 Смернице за избор материјала за заштиту од буке у зградама

Предикција звучне изолације у зградама је веома важна област грађевинске акустике, јер представља део свакодневне инжењерске праксе при пројектовању зграда. Временом су развијене методе прорачуна звучне изолације које се заснивају на комплексној анализи путања проласка звука између суседних просторија у зградама.

Током 2000. године појавили су се међународни стандарди серије EN 12354, којима су дефинисани алгоритми за прорачун звучне изолације. Улазни подаци у овим прорачунима су звучне изолације појединачних преграда добијене лабораторијским мерењима. Упоредо са појавом овакве регулативе на тржишту се појавило више софтвера за прорачун звучне изолације (Insul, 2014; SONarchitrct ISO, 2014; AcouBAT, 2014; Bastian, 2014; URSA, 2014).

За прорачун звучне изолације потребан је изванредан број улазних параметара [139]:

- изолациона својства зидова и таванице,
- допринос изолационој моћи преграда зидних облога и спуштених плафона,
- изолациона својства малих елемената који се могу наћи на преградама,
- изолациона својства додатних елемената, прозора, врата.

Избор материјала битно утиче на све ове параметре. Један од практичних проблема произилази из чињенице да за многе од преграда нису познате стварне вредности изолационих својстава, као ни допринос изолационих моћи зидних облога.

Основни физички параметри материјала преграде који утичу на звучну изолацију [139]:

- густина материјала,
- брзина лонгитудиналног таласа,
- фактор унутрашњег губитака,
- индекс преноса вибрација.

Наведени утицајни параметри (осим густине) најчешће нису доступни. За неке од ових параметара се може пронаћи међузависност са апсорпционим својствима материјала. Овакве међузависности ће бити предмет будућих истраживања.

ПОГЛАВЉЕ

5

ВЕРИФИКАЦИЈА МОДЕЛА

5.1. Идентификација проблема

Ниво буке у протеклим деценијама у граду Краљеву је у сталном порасту. Таква ситуација је последица повећаног саобраћаја, грађевинских радова, рада индустријских постројења а у летњем периоду знатан утицај имају и системи за хлађење. Врло чест извор буке су и угоститељски објекти, дискотеке, занатске радње, мања предузећа лоцирана у близини стамбених зона и друго. Поред тога, лоша економска ситуација довела је до тога да постоји велики број старих возила, застарелих машина, лифтова и др. који доприносе повишењу нивоа буке.

Законом о заштити од буке у животној средини („Службени гласник РС” бр. 36/09 и 88/10) и пратећим прописима и правилницима, створен је законски оквир да се област штетног дејства буке регулише на начин усклађен са важећим прописима ЕУ (Директива 2002/49/ЕС о процени и управљању буком у животној средини).

Национални програм заштите животне средине утврђује циљеве и мере у области заштите од буке до 2019. године. Приоритетни циљеви у области заштите буке, груписани као краткорочни, континуирани и средњорочни обухватају употпуњавање законске регулативе, израду стратешких карата и акционих планова, одређивање акустичних зона, унапређење мониторинга и спровођење мера заштите од буке.

Праћење нивоа буке у животној средини се врши на основу вредности прописаних Уредбом о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини („Службени гласник РС” број 75/10).

У складу са Законом о заштити од буке у животној средини и Правилником о методологији за одређивање акустичких зона (“Сл. гласник РС”, бр.72/10), град Краљево је донео Одлуку о мерама за заштиту од буке (“Сл. лист града Краљева”, бр. 20/2010). Овом Одлуком извршено је акустично зонирање подручја града Краљева.

Градска управа преко овлашћене и акредитоване стручне институције обезбеђује систематски мониторинг буке на територији града Краљева. Систематско мерење нивоа буке се врши од 2006. године, а обавља га Факултет за машинство и грађевинарство из Краљева.

Градска управа Краљева обавештава грађане о резултатима мерења преко сајта града Краљева. Годишње Извештаје о резултатима мерења Факултет доставља градској Управи Краљева која их објављује и чини доступним на сајту градске управе.

Мерење буке и процена нивоа комуналне буке се врши у складу са следећим прописима [1-9: ово су закони и стандарди који су доле наведени] :

- Закон о заштити од буке у животној средини (“Сл. Гласник РС” бр. 36/2009, 88/2010),
- Уредба о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини (“Сл. гласник РС” бр. 75/2010),

- Правилник о методама мерења буке, садржини и обиму извештаја о мерењу буке ("Сл. гласник РС" бр. 72/2010),
- Правилник о условима које мора да испуњава стручна организација за мерење буке, као и о документацији која се подноси уз захтев за добијање овлашћења за мерење буке ("Сл. гласник РС" бр. 72/2010),
- Правилник о методологији за одређивање акустичких зона ("Сл. гласник РС" бр. 72/2010),
- SRPS EN ISO 1996-1: Акустика – Описивање, мерење и оцењивање буке у животној средини – Део 1: Основне величине и процедуре оцењивања,
- SRPS EN ISO 1996-2: Акустика – Описивање, мерење и оцењивање буке у животној средини – Део 2: Одређивање нивоа буке у животној средини,
- Упутство за мерење буке у животној средини (Министарство надлежно за послове заштите животне средине),
- Правилник о садржини и методама израде стратешких карата буке и начину њиховог приказивања у јавности ("Сл. гласник РС" бр. 80/2010).

Систематско мерење нивоа буке се обавља на 40 мерних места и то: два мерења у току дневног референтног времена, једно мерење у току вечерњег референтног времена и два мерења у току ноћног референтног времена.

Сва мерења се врше у току 15-минутних интервала а истовремено се утврђује и саобраћајна статистика. Поред еквивалентног нивоа буке ($L_{Aeq,15min}$) приказани су и статистички параметри буке: L_{AFmax} , L_{AFmin} , L_{AF50} , L_{AF95} . За сва три референтна временска интервала одређени су основни индикатори буке: L_{day} , $L_{evening}$, L_{night} , и на основу њих израчунат целодневни меродавни ниво буке L_{den} .

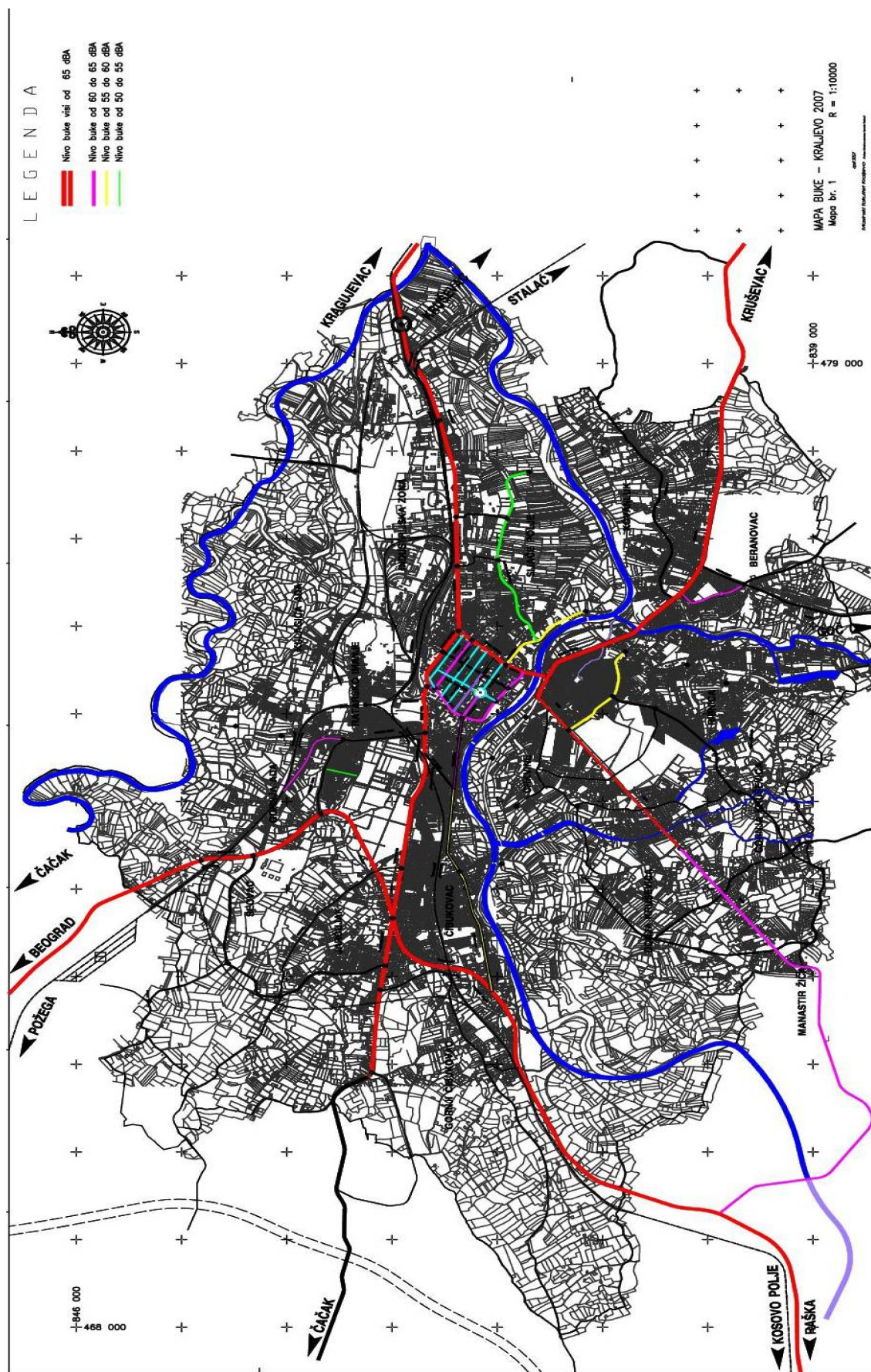
Дозвољене вредности еквивалентног нивоа буке по зонама дефинисане су према Уредби о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини („Сл. Гласник РС бр. 75/2010).

Резултати броја мерних места са прекораченом вредношћу целодневног меродавног нивоа буке у односу на утврђене акустичке зоне при систематском мерењу нивоа буке у току 2014. и 2015. године у граду Краљеву, приказани су у табели 5.1.

Табела 5.1. Број мерних места са прекорачењем целодневног меродавног нивоа буке утврђен при систематском мерењу буке у граду Краљеву за 2014. и 2015. годину

Година	Број мерних места са прекорачењем индикатора буке L_{den} [dB(A)] у току референтних временских интервала			
	дан		ноћ	
	укупан број	%	укупан број	%
2014.	18	45	39	97,5
2015.	28	70	40	100

Посебно треба истаћи угроженост школа, здравствених објеката и културно историјских локалитета.



Слика 5.1. Нивои буке уз главне градске саобраћајнице, Краљево 2007

Табела 5.2. Резултати систематског мерења буке за 2014. и 2015. годину

Година	Мерно место и акустичка зона	Индикатори буке и њихове вредности		L _{den} [dB(A)]	Дозвољени ниво буке [dB(A)]
		Ознака	[dB(A)]		
2014.	ОШ "Димитрије Туцовић" (II зона)	L _{day}	62.6	66.1	50
		L _{evening}	63.5		50
		L _{night}	57.8		45
2015.	ОШ "Димитрије Туцовић" (II зона)	L _{day}	66.5	67.5	50
		L _{evening}	63.2		50
		L _{night}	58.3		45

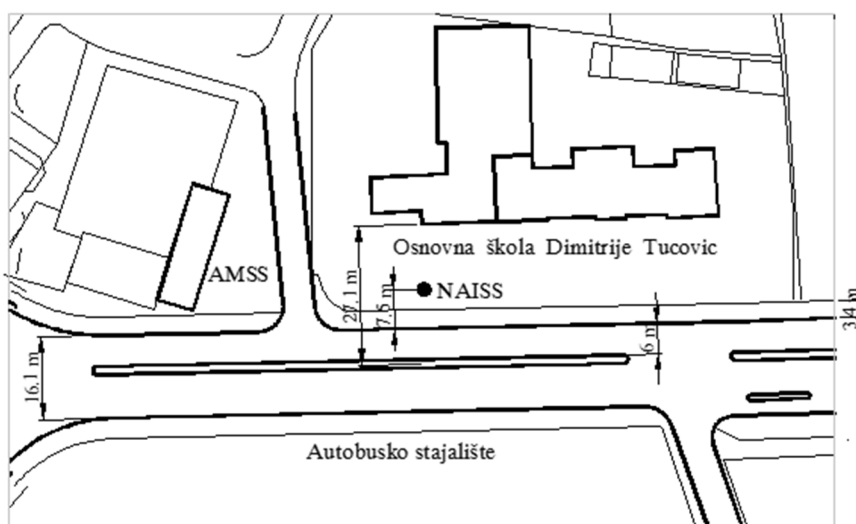
Извор података: Извештаји о систематском мерењу буке за 2014. и 2015. годину, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу

Основна школа „Димитрије Туцовић“ је најугроженији школски објекат у граду Краљеву. Школа се налази поред магистралног пута и радионице Ауто мото савеза Србије. Преко пута школе је аутобуско стајалиште.

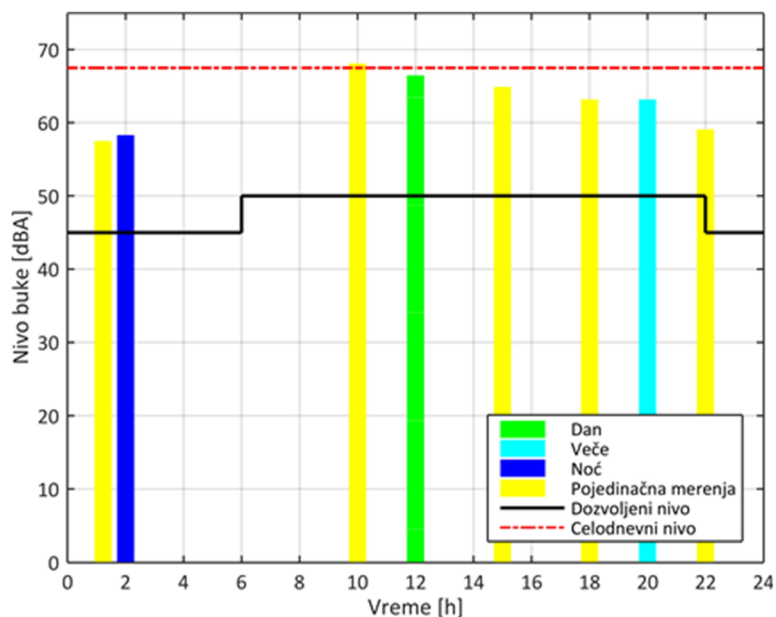
Основни извори буке су:

- Саобраћај на магистралном путу који се одвија у четири траке (по две у једном смеру). Друмска возила свих категорија користе овај путни правац, а ограничење брзине је 30 km/h. Раскрсница са семафором се налази на растојању од око 50 m од школе. При укључивању семафора настаје повишени ниво буке.
- Галама ученика у школском дворишту за време извођења наставе физичког васпитања.
- Радионица Ауто мото савеза Србије.

Као што се види у табели 5.2. вредности целодневног меродавног нивоа буке (L_{den}) прелазе граничне вредности индикатора буке за школску зону и до 17.5 dB(A).



Слика 5.2. Положај школе у односу на Доситејеву улицу (извор: Мапа града Краљева, Дирекција за планирање и изградњу „Краљево“)

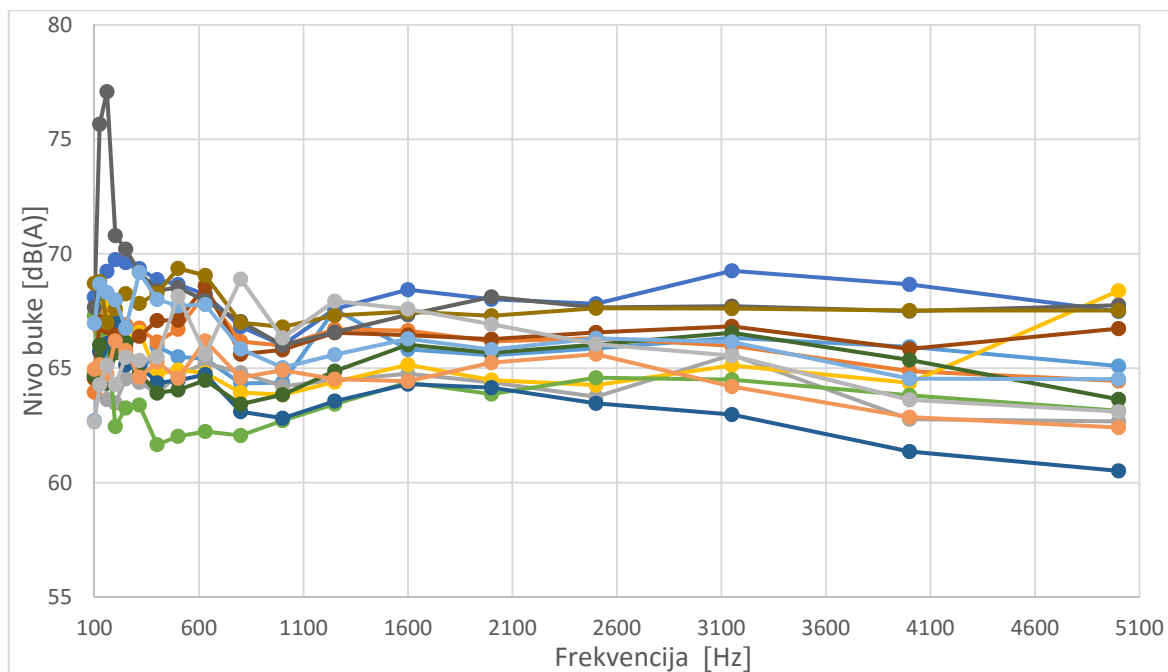


Слика 5.3. Измерени, дозвољени и меродавни нивои буке у нивоу фасаде школе

5.2. Класификација проблема

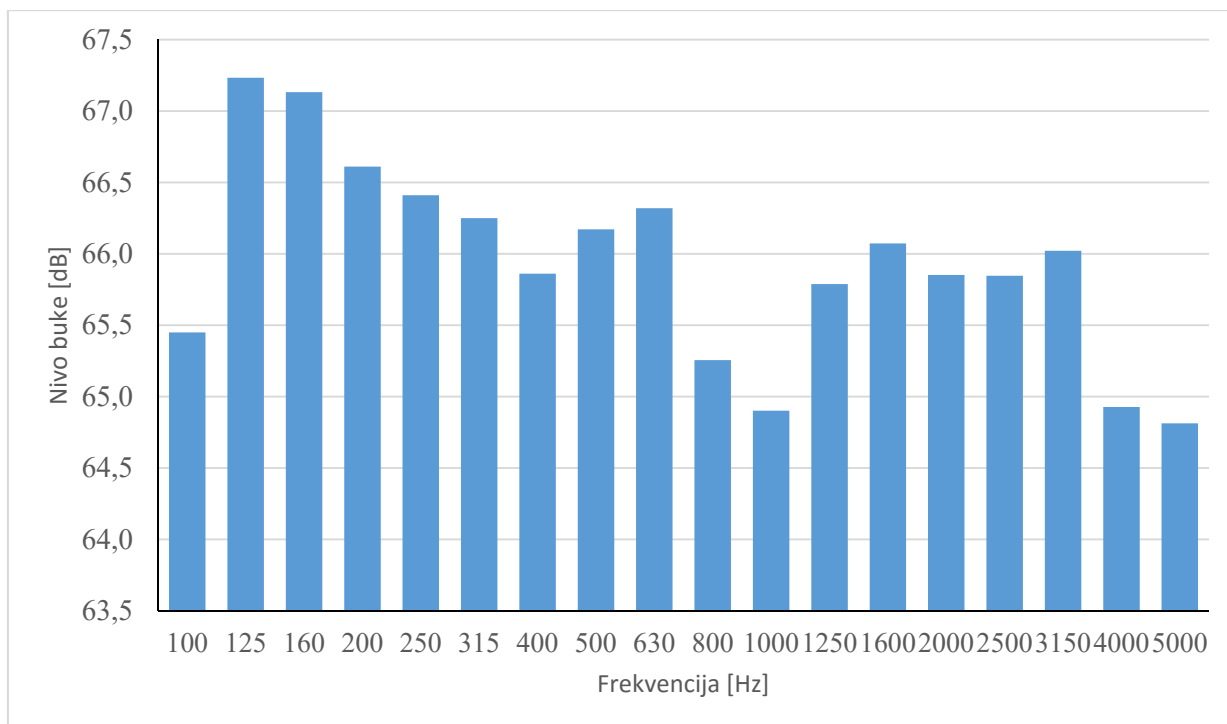
На мерном месту у нивоу фасаде школе, бука друмског саобраћаја је доминантни извор буке. Саобраћајна бука је временски променљива, посебно из разлога што се мерно место налази у зони где кретање саобраћаја укључује промене брзине возила и обртног момента мотора, због близине семафора и раскрснице.

Путничка и теретна возила се разликују по вредностима нивоа буке коју генеришу, али и по спектралним садржајима генерисане буке, док аутобуси и камиони имају сличне карактеристике буке [5]. Због тога је на мерном месту, поред мерења нивоа буке вршено и бројање саобраћаја разврстано у категорије лаких и тешких возила.



Слика 5.4. Фреквенцијска анализа буке на огради школе (3,4 m од ивице пута)

На основу 14 петнаестоминутних мерења (слика 5.4.) на огради школе (3,4 m од ивице пута) може се закључити да је бука саобраћаја на мерном месту широкопојасна.

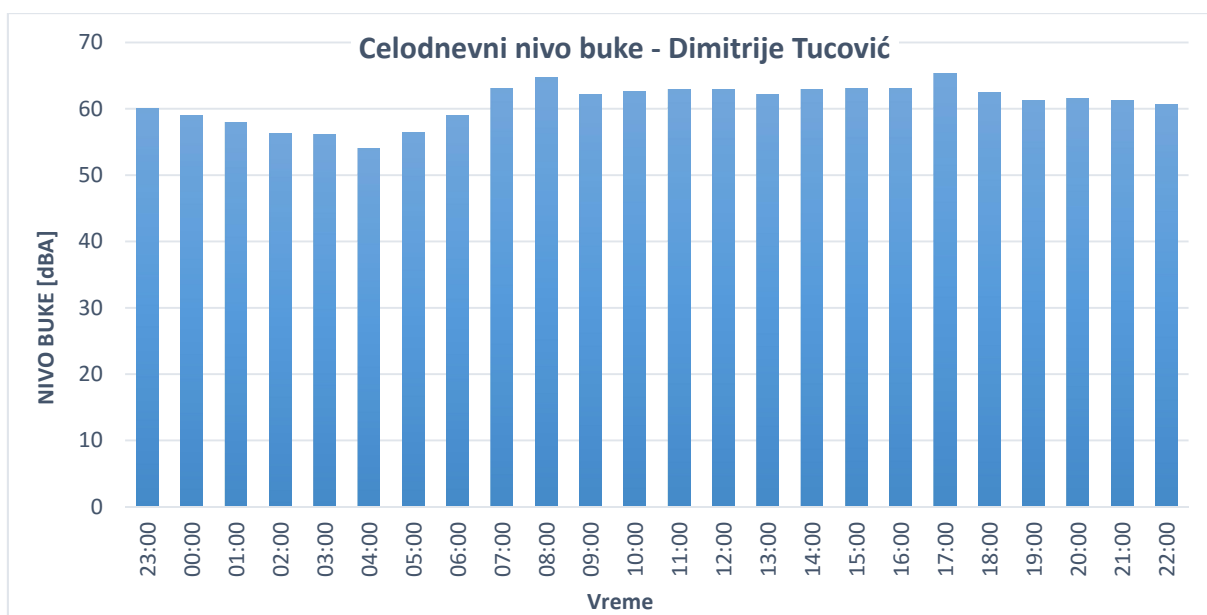


Слика 5.5. Просечни нивои буке у фреквенцијском опсегу саобраћајне буке

5.3. Мерење буке и и фреквенцијска анализа

5.3.1 Мерење нивоа буке

На мерном месту је извршено целодневно мерење нивоа буке и бројање саобраћаја а резултати су приказани на сликама 5.6. и 5.7.

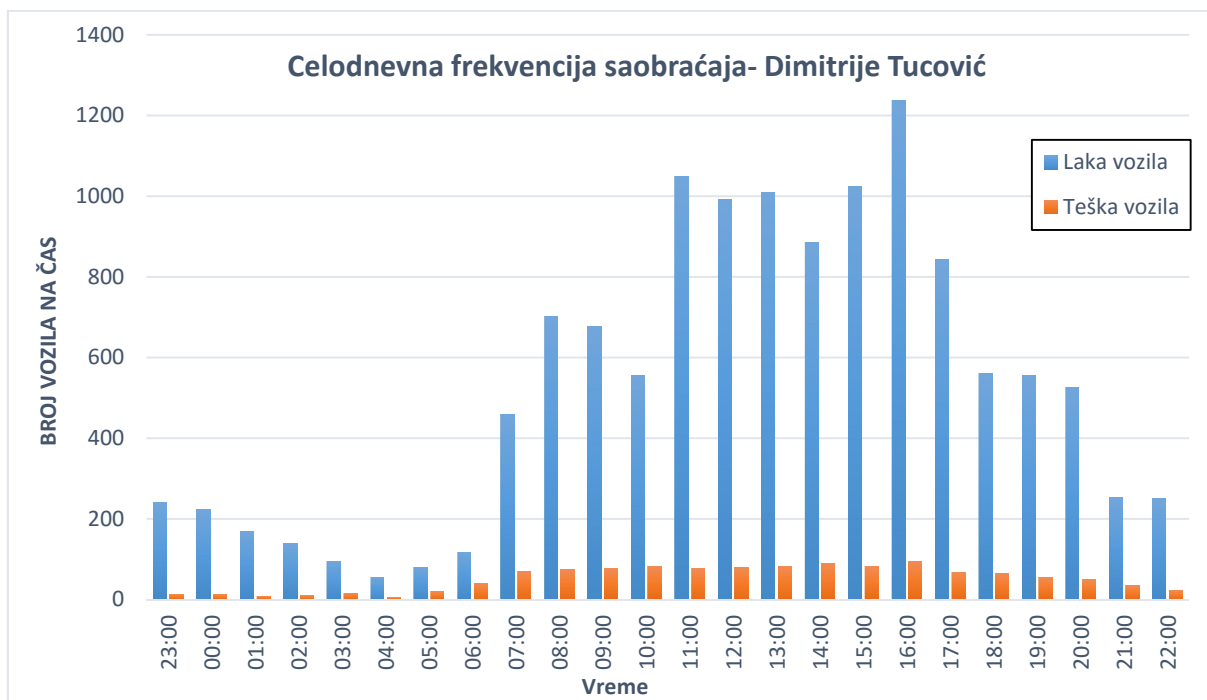


Слика 5.6. Целодневни еквивалентни ниво буке усредњен по часу (у нивоу фасаде школе)

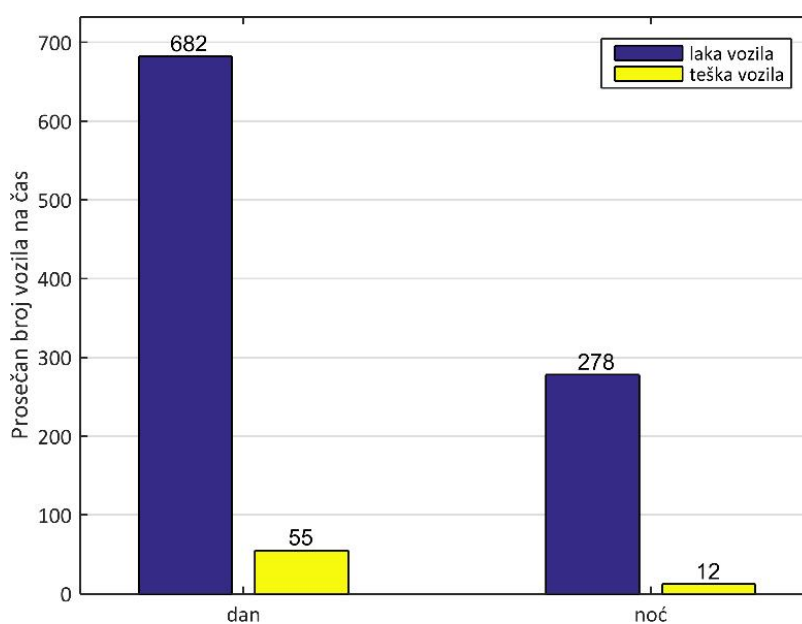
Табела 5.3. Просечан ниво буке по временским интервалима измерен на мерном месту

Референтни временски интервал	Просечне вредности нивоа буке	Стандардна девијација, σ
	[dB(A)]	[dB(A)]
дан	63,1	0,91
вече	61,2	0,34
ноћ	57,1	1,88

За измерену вредност нивоа буке у току дана може се очекивати да ће вредност L_{eq} за ниво поверења од 95% бити у интервалу од $L_{eq} \pm 1,82$ dB(A).



Слика 5.7. Фреквенција саобраћаја на мерном месту, усредњена по часу



Слика 5.8. Просечан број лаких и тешких возила у току дана и ноћи (извор: Извештај о систематском мерењу буке за град Краљево за 2015. годину, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљевоу)

Резултати мерења еквивалентног нивоа буке (слика 5.6.) измерени су у току петнаестоминутних интервала, усредњени и приказани у једночасовним интервалима. Граничне вредности нивоа буке у току референтних временских интервала и прекорачења дозвољеног нивоа буке на мерном месту у нивоу фасаде школе приказани су у табели 5.4.

Табела 5.4. Ниво буке и прекорачења дозвољеног нивоа буке на мерном месту

Референтни временски интервал	Граничне вредности нивоа буке	Прекорачење дозвољеног нивоа буке
	[dB(A)]	[dB(A)]
дан	62-65	12 - 15
вече	61-62	11 - 12
ноћ	54-60	9 - 15

У циљу решавања проблема буке, најзначајнији показатељи су прекорачења нивоа буке у току дневног референтног периода, јер је то време у коме школа ради.

5.3.2 Предвиђање нивоа буке према NAISS моделу

Модел NAISS за прогнозу саобраћајне буке је веома користан алат, који омогућава предвиђање индикатора буке у функцији од структуре и фреквенције саобраћаја и карактеристика саобраћајнице. Предвиђање нивоа буке према моделу NAISS је израчунато за сваки сат у току 24 часа. Предвиђање нивоа буке је на растојању од 7,5 m од ивице пута.

Табела 5.5. Просечан ниво буке по временским интервалима према предвиђању NAISS модела

Референтни временски интервал	Просечне вредности нивоа буке (7.5 m од ивице пута)	Стандардна девијација, σ
	[dB(A)]	[dB(A)]
дан	67,7	1,01
вече	65,2	1,59
ноћ	60,8	1,77

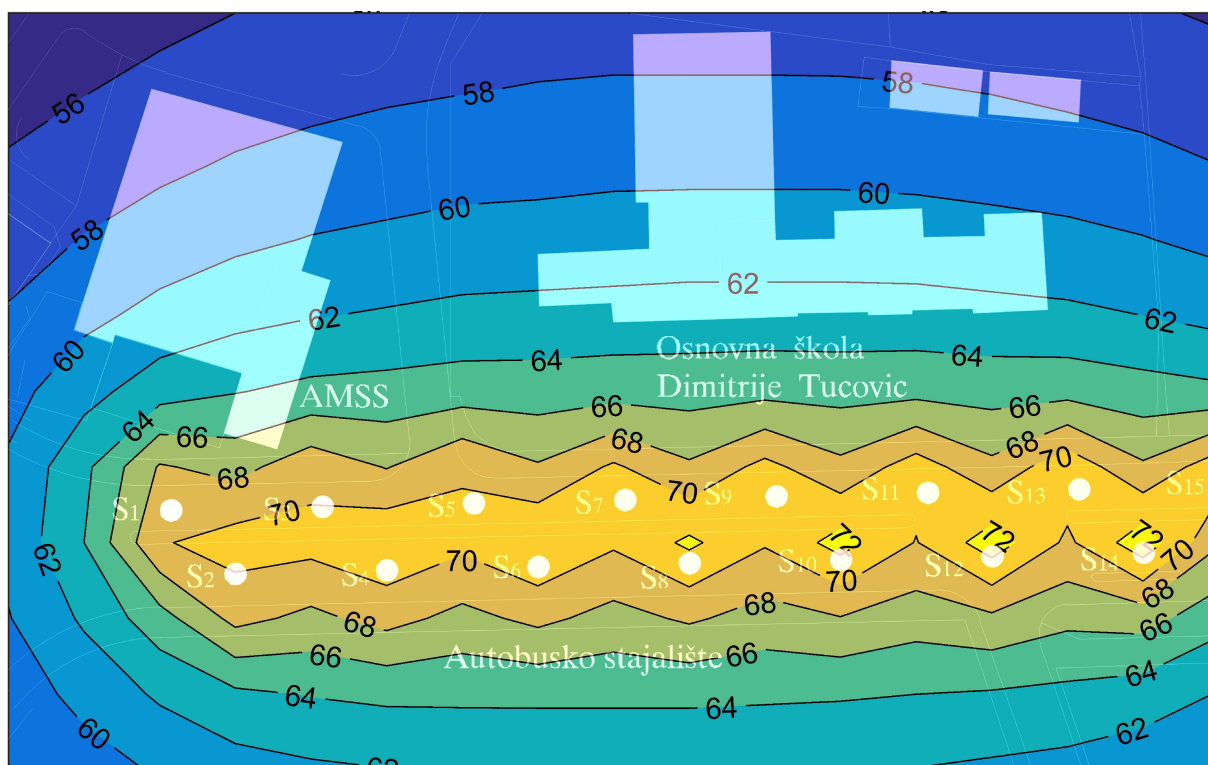
За предвиђену вредност нивоа буке према моделу NAISS у току дана може се очекивати да ће вредност L_{eq} за ниво поверења од 95% бити у интервалу од $L_{eq} \pm 1,82$ dB(A).

Табела 5.6. Предвиђање нивоа буке према моделу NAISS

Време од - до	Број возила			NAISS модел
	лака	тешка	аутобуси	
00 - 01	168	6	1	61.0
01 - 02	139	11	0	60.7
02 - 03	95	14	1	59.9
03 - 04	55	5	1	57.0
04 - 05	79	17	2	59.8
05 - 06	117	35	4	62.3
06 - 07	460	62	7	66.7
07 - 08	702	67	7	68.0
08 - 09	676	70	8	68.0
09 - 10	556	75	7	67.5
10 - 11	1048	71	6	69.4
11 - 12	992	72	8	69.3
12 - 13	1009	72	9	69.3
13 - 14	886	79	10	69.0
14 - 15	1023	69	13	69.3
15 - 16	1236	82	12	70.1
16 - 17	843	61	7	68.5
17 - 18	561	59	6	67.2
18 - 19	557	50	5	67.0
19 - 20	525	46	5	66.7
20 - 21	254	31	3	63.9
21 - 22	251	21	2	63.4
22 - 23	241	12	1	62.8
23 - 24	224	11	1	62.5
Укупно по категоријама	12697	1098	126	
Укупно	13921			

5.3.3 Предвиђање нивоа буке помоћу Модела за прорачун локалних мапа буке

На основу резултата мерења на разделном острву улице усвојен је просечан ниво буке извора од 72.6 dBA. Извршено је 10 мерења у току петнаестоминутних интервала, од којих је у по 5 мерења микрофон окренут ка долазећим и одлазећим возилима. Микрофон је постављен под 45° у односу на осу разделног острва саобраћајнице. Положај извора је одређен према [134]. У оквиру тачке 4.4.4 дефинисан је алгоритам прорачуна на основу кога је формиран софтвер за прорачун локалних мапа буке [131]. Резултати софтверског прорачуна нивоа буке који потиче од друмског саобраћаја у зони школе приказани су у виду мапе буке на слици 5.9. Мапа буке је нацртана у софтверском пакету MATLAB. Нивои буке су приказани у чворовима мреже са кораком 10 x 10 m.



Слика 5.9. Мапа буке постојећег стања

У циљу решавања проблема буке, најзначајнији индикатор буке је просечни еквивалентни ниво буке у току дана. Просечне вредности резултата мерења буке (табела 5.3.) се односе на мерно место које се налази у нивоу фасаде школе на растојању 3 m од школе (координате (140;60) m; према слици 5.9.). Мерење нивоа буке на разделном острву помоћу којих је дефинисан ниво буке извора у Моделу за прорачун локалних мапа буке обављено је у периоду од 10 до 13 часова, како би флукуација нивоа буке у зависности од фреквенције саобраћаја била што мања (табела 5.6.).

Табела 5.7. Приказ измерених вредности нивоа буке и предвиђања Модела за прорачун локалних мапа буке

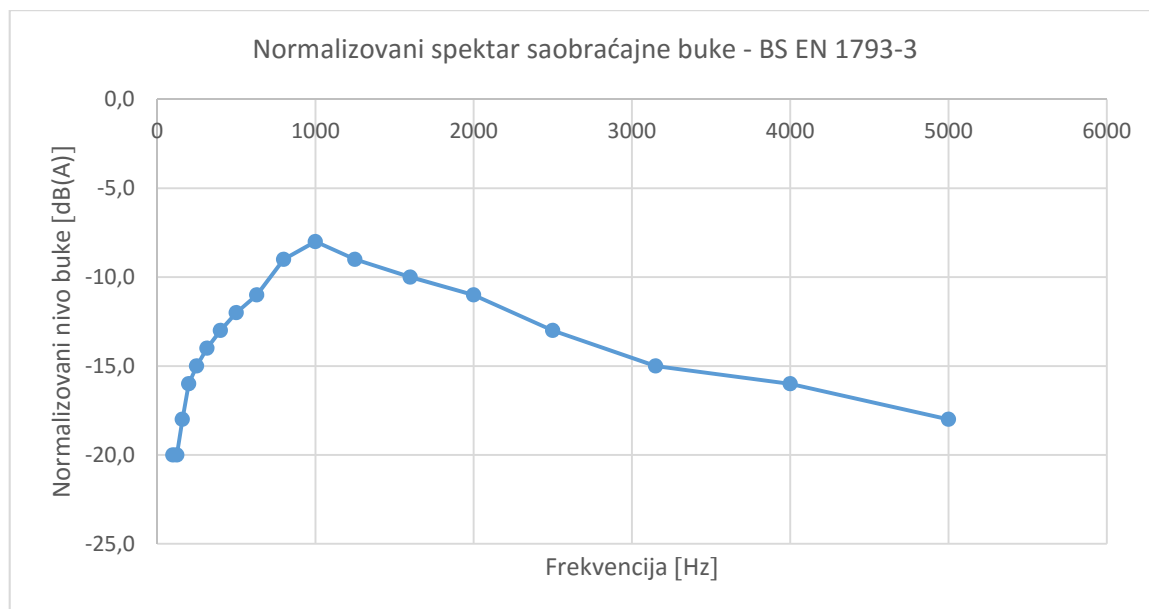
Референтни временски интервал	Просечна вредности нивоа буке (табела 5.3.)	Предвиђање Модела за прорачун локалних мапа буке	Одступање
	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
дан	63,1	62,5	0,6

Табела 5.8. Приказ предвиђених нивоа буке према NAISS моделу и Моделу за прорачун локалних мапа буке

Референтни временски интервал	Просечна вредности нивоа буке (табела 5.5.)	Предвиђање Модела за прорачун локалних мапа буке	Одступање
	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
дан	67,7	66,3	1,4

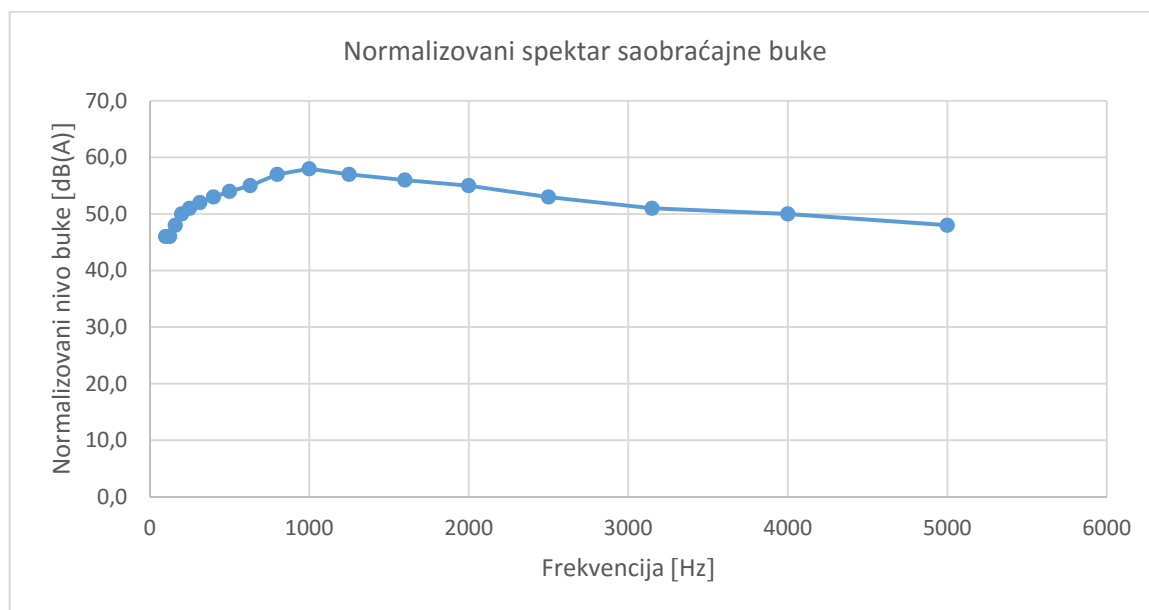
5.3.4 Нормализација спектра саобраћајне буке

За израчунавање једнобројне вредности оцене перформанси звучне апсорпције (DL_α) потребно је одредити нормализоване вредности спектра саобраћајне буке на свим терцним фреквенцијама у опсегу од 100 Hz до 5000 Hz. На слици 5.10. приказан је нормализовани спектар буке у складу са стандардом BS EN 1793-3.



Слика 5.10. Нормализовани спектар саобраћајне буке према стандарду BS EN 1793-3

Нормализовани спектар саобраћајне буке се може одредити и на основу резултата мерења еквивалентног нивоа буке. На слици 5.11. је приказан нормализовани спектар саобраћајне буке чији је просечни (слика 5.4.) еквивалентни ниво буке $L_{eq} = 66 \text{ dB(A)}$, измерен на огради школе на растојању од 3,4 m од ивице пута. Мерење је вршено на овом мерном месту јер је ту планирано постављање звучне баријере.



Слика 5.11. Нормализовани спектар саобраћајне буке ($L_{eq} = 66 \text{ dB(A)}$)

Нормализовани спектар саобраћајне буке се може одредити и на основу предвиђања нивоа буке по моделу NAISS, или на основу предвиђања према Моделу за прорачун локалних мапа буке.

5.4. Декомпозиција проблема

Решавање проблема вишекритеријумске анализе за избор материјала апсорпционих звучних баријера захтева у суштини формирање управљачког информационог система, који ће помоћи пројектантима заштите од буке при доношењу одлука и решавању разних задатака а нарочито у оним случајевима када се познају чињенице од којих одлука највише зависи и које директно утичу на то да ли ће се донети добра или лоша одлука. На овај начин се решавају проблеми за које се са одређеном вероватноћом може унапред утврдити коначно решење, који су подаци потребни да се оно добије, као и алгоритам његовог решавања. У конкретном случају избора материјала апсорпционих баријера, најважнија информација је који материјал има најбоља апсорпциона својства за конкретни проблем буке, узимајући пре свега у обзир карактеристике звучног извора.

Овакав управљачки информациони систем се састоји од:

- подсистема за утврђивање акустичких критеријума,
- подсистема за утврђивање безбедносних, техно-економских и других критеријума.

Пошто је подсистем за утврђивање акустичких критеријума веома сложен он је подељена више модула (детално описано у оквиру поглавља 4.):

- модул за одређивање индикатора буке,
- модул за одређивање апсорпционих својстава материјала,
- модул за одређивање збирних акустичких критеријума.

Декомпозиција је вршена све док нису добијене релативно просте функције које даље не треба разлагати, јер су у потпуности јасне и њихову логику је лако описати неким прикладним средствима или квантитативним показатељима.

На овај начин, сложени систем за вишекритеријумску анализу за избор материјала апсорпционих звучних баријера се описује помоћу више дијаграма тока података од којих је сваки довољно једноставан, прегледан и информативан.

5.5. Дефинисање „надлежности“

Дефинисање надлежности у решавању проблема заштите од буке се врши у складу са препорукама Directive 2002/49/EC и важеће националне законске регулативе (поглавље 5.1)

Мониторинг еколошког проблема разматра ресорно министарство које је у обавези да у сарадњи са надлежним органима обезбеди израду „стратешких карата буке“ за главне саобраћајнице, железничке пруге, аеродроме и густо насељене агломерације, коришћењем усаглашених индикатора буке L_{den} (еквивалентни ниво за период дан-вече-ноћ) и L_{night} (еквивалентни ниво за период ноћи). У недостатку стратешких карата буке, мониторинг

саобраћајне буке у циљу заштите школе од буке извршио је Факултет за машинство и грађевинарство из Краљева према процедури која је описана у оквиру поглавља 5.3.

Обавештавање јавности о изложености буци у граду Краљевоу обавља ЛЕАП Краљево (Локални еколошки акциони план) на основу годишњих извештаја о систематском мерењу буке Факултета за машинство и грађевинарство у Краљевоу.

Решавање локалних питања у вези са буком, где спада и проблем заштите од буке школе „Димитрије Туцовић“ у Краљевоу, реализован је у склопу сарадње са ЛЕАП Краљево. Користећи резултате систематског мерења буке у граду Краљевоу идентификован је проблем буке поменуте школе. Састављен је акциони план за израду звучне баријере. Факултет за машинство и грађевинарство у Краљевоу је урадио Пројекат звучне баријере, чију реализацију ће финансирати Град Краљево.

5.6. Дефинисање критеријума одлучивања

Како је за решење одабран метод пасивне заштите од буке помоћу звучне баријере размотрени су основни акустички и неакустички захтеви које треба да задовољи баријера. Усвојени критеријуми су груписани у 7 група (табела 5.9.):

- функционални захтеви,
- естетски захтеви,
- конструкциони захтеви,
- безбедност,
- еколошки фактори,
- одржавање,
- трошкови и технологичност.

Ради упоређења критеријума (атрибута) неопходно је претворити квалитативне атрибуте у квантитативне тј. у бројне вредности. Усвојене скале за квантификацију усвојених критеријума и процењене вредности релативних тежина критеријума су приказани у табели 5.10.

Табела 5.9. Критеријуми за избор апсорпционог материјала

Група	Ознака	Критеријум
Функционални захтеви	K1	Звучно апсорпциона својства материјала исказана преко једнобројне вредности оцене перформанси звучне апсорпције материјала - D_{α}
	K2	Могућност обликовања површине апсорпционог слоја (троугаони, трапезни, таласасте и сл) ради постизања ефекта звучне дифузије
	K3	Губитак функционалности услед наслага прашине
Естетски захтеви	K4	Могућност формирања различитих облика текстуре (промена гранулације зрнасте структуре ради остварења визуелног утиска)
	K5	Могућност обликовања изолационог слоја материјала ради прилагођења специфичним архитектонским захтевима
Конструкциони фактори	K6	Стандардизација димензија панела ради остварења могућности модуларне градње
	K7	Неопходност уградње спољашњих обложних перфорираних лимова
	K8	Својство апсорпционог слоја да преузме део оптерећења којима је изложена звучна преграда (тежина апсорпционог слоја, ваздушни удари услед кретања возила, оптерећење услед ветра, снега, леда, ударна оптерећења и др.)
	K9	Ширење и скупљање материјала услед промене температуре
	K10	Отпорност на влагу тј. порозност материјала ради дренаже воде услед атмосферских падавина
	K11	Отпорност на циклусе смрзавања и одмрзавања
	K12	Дебљина материјала (mm)
Безбедност	K13	Отпорност на удар -безбедности саобраћаја у случају судара возила са баријером (еластичност судара и опасност од падајућих крхотина)
	K14	Пожарна сигурност (отпорност на пожар)
Еколошки фактори	K15	Употреба рециклираних материјала за израду апсорпционог слоја
	K16	Могућност поновне рециклаже
	K17	Токсичност материјала
Одржавање	K18	Могућност поправке и замене оштећених делова на лицу места (могућност комбиновања од мањих плоча са фабрички уграђеним наставцима за спајање ради брзог и једноставног спајања и полагања у чврстим или зиданим оквирима-рамовима, без лепљења, без опасности од „искакања“ плоча из свог лежишта)
	K19	Животни век у условима изложености атмосферским утицајима (велика трајност-дуговечност уз минималне трошкове одржавања)
Трошкови и технологичност	K20	Трошкови материјала и израде
	K21	Трошкови монтаже (уградње)

Табела 5.10. Квантификација критеријума и процењене вредности релативних тежина

Критеријум	критеријум оптимизације min/max	квантификација критеријума	Релативне тежине W _j	Критеријум	критеријум оптимизације min/max	квантификација критеријума	Релативне тежине W _j
K1	max	Прорачуната вредност Dla	10.000	K12	min	прорачунска вредност y (cm)	10.000
K2	max	5- изузетна 4-одлична 3- вр. добра 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша	3.000	K13	max	прорачунска вредност на скали од 1 до 5	6.000
K3	min	5-изузетно висок 4-висок 3-задовољавајући 2-средњи 1-низак 0-изузетно низак	5.000	K14	max	5-изузетно висока 4-висока 3-задовољавајућа 2-средња 1-ниска 0-изузетно ниска	5.000
K4	max	5- изузетна 4-одлична 3- вр. добра 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша	3.000	K15	max	5-изузетно висока 4-висока 3-задовољавајућа 2-средња 1-ниска 0-изузетно ниска	6.000
K5	max	5- изузетна 4-одлична 3- вр. добра 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша	5.000	K16	max	5-изузетно висока 4-висока 3-задовољавајућа 2-средња 1-ниска 0-изузетно ниска	5.000
K6	max	5- висока 3- просечна 1-ниска	5.000	K17	min	прорачунска вредност на скали од 1 до 5	4.000
K7	min	5-неопходна 3-пожељна 1-делимично потребна 0-није потребна	3.000	K18	max	5-изузетно висока 4-висока 3-задовољавајућа 2-средња 1-ниска 0-изузетно ниска	5.000
K8	max	процењена вредност на скали од 1 до 10	5.000	K19	max	процењена вредност на скали од 1 до 5	7.000
K9	min	процењена вредност на скали од 1 до 10	3.000	K20	min	прорачуната вредност y (€/m ²)	10.000
K10	max	5-изузетно висока 4-висока 3-задовољавајућа 2-средња 1-ниска 0-изузетно ниска	5.000	K21	min	прорачуната вредност y (€/m ²)	9.000
K11	max	5- висока 3- просечна 1-ниска	8.000				

5.7. Генерисање алтернатива

Меродавна апсорпција баријере $DL\alpha$ представља једнобројну вредност коефицијента звучне апсорпције која је претходно нормализована спектром друмског саобраћаја. Коефицијент звучне апсорпције по терцама α_i одређује се по стандардној процедури према ISO 354 за терцне опсеге од 100 Hz до 5000 Hz. На основу овако измерених вредности α_{si} , а претходном пондеризацијом нормализованим спектром буке друмског саобраћаја израчунава се коефицијент апсорпције баријере као једнобројна вредност, као што је приказано у оквиру тачке 4.4.4.

Једнобројна вредност оцене перформанси звучне апсорпције баријере $DL\alpha$ се може одредити на основу нормализованог спектра буке друмског саобраћаја према стандарду BS EN 1793-3, или у односу на нормализовани еквивалентни ниво буке добијен мерењем или предвиђањима према NAISS моделу или Моделу за прорачун локалних мапа буке.

За потребе овог примера узете су вредности коефицијента апсорпције пенастих и зрнастих материјала које су одређене у импедансној цеви према методи SRPS EN ISO 10534-2. Мерење коефицијента апсорпције у реверберационој комори изискује велике трошкове и превазилази обим истраживања планиран овом дисертацијом. Треба напоменути и чињеницу да је вредност $DL\alpha$ израчуната за 12 терцних опсега, па је вредност меродавне апсорпције због тога мања.

Коефицијент апсорпције за влакнасте материјале је одређен према стандарду ISO 354, тако да вредности $DL\alpha$ одговарају стварним вредностима, онако како то предвиђа стандард BS EN 1793-1.

За све расположиве материјале је прорачуната вредност $DL\alpha$ према процедури описаној у поглављу 4.4. Вредности су приказане у табелама које следе.

Табела 5.11. Прорачунате вредности $DL\alpha$ за пене по дебљинама

Тип пене	Дебљина									
	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm	8 cm	9 cm	10 cm
S 2026	0.67955	1.18909	2.96057	3.82165	3.93408	5.24692	4.14327	4.64123	4.64471	5.04625
S 2536	0.48720	1.30552	2.29747	2.93426	3.10829	4.47366	5.61122	6.19066	6.76299	6.83908
S 3038	0.41228	0.81573	1.47170	2.44401	3.28989	4.14841	5.69236	5.30913	6.34144	6.62931
ES 3234	0.43812	0.89977	1.62734	2.88720	3.79165	4.39490	4.87175	5.47694	6.78512	6.93310
T 2036	0.45387	1.42484	2.90738	3.96021	4.66934	5.17591	5.58437	5.65380	6.14934	6.30956
T 3545	0.38082	0.86493	1.57066	2.60505	3.50182	4.26678	5.14218	5.63452	6.52386	6.80148
HR 2514	0.27322	0.52607	0.94098	1.58180	2.45930	2.75154	3.87893	4.40057	4.55219	4.87767
HR 3536	0.29063	0.62119	1.05398	1.88293	2.57555	3.33218	3.97884	4.23366	4.95917	5.24440
HR 3744	0.35218	0.70963	1.57855	2.91112	2.77108	3.23831	4.23143	4.73436	5.13222	5.96875
HR 4035	0.33155	0.66966	1.17838	1.98169	2.80377	3.57088	4.35856	4.83497	5.28378	5.41768
PVE 4016	1.97047	2.16292	2.19329	2.16506	2.21891	2.15711	2.23256	2.18107	2.23956	2.36778

Табела 5.12. Прорачунате вредности $DL\alpha$ за смеше зрнастих материјала

Смеша зрнастих материјала	Дебљина				
	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Пластика 100%	0.312446	1.027572	1.969644	2.170456	2.873867
Гума 100%	0.324445	0.641436	1.344971	2.634353	2.903139
Песак 100%	0.306994	0.835086	1.097599	1.116779	1.154167
Пластика 50%+Песак 50%	0.308979	0.980876	1.625685	1.959813	2.190850
Гума 50%+Пластика 50%	0.358285	0.773402	1.859464	2.634939	2.948732
Гума 50% + Песак 50%	0.286902	0.607992	1.584946	1.963187	1.802302
Гума+Песак+Пластика по 33%	0.278210	0.645416	1.578474	2.227280	2.311688

Табела 5.13. Прорачунате вредности $DL\alpha$ за вишеслојне комбинације зрнастих материјала

Комбинација			DL α - збирно	Комбинација			DL α - збирно	Комбинација			DL α - збирно
PRS	111		2.134701136	PSR	111		2.645349332	RPS	111		2.273600558
PRS	112		2.479891814	PSR	112		2.988077267	RPS	112		2.414913554
PRS	113		2.796604909	PSR	113		2.989460950	RPS	113		2.762517578
PRS	121		2.934973194	PSR	121		1.831538386	RPS	121		3.162370435
PRS	122		3.504517298	PSR	122		1.837055740	RPS	122		3.619978027
PRS	131		3.354670824	PSR	131		1.765345626	RPS	131		3.615871504
PRS	211		3.117820059	PSR	211		3.104655807	RPS	211		2.989255206
PRS	212		3.601711083	PSR	212		3.235818182	RPS	212		3.439243354
PRS	221		3.576782057	PSR	221		2.776036308	RPS	221		3.615776897
PRS	311		3.505711798	PSR	311		3.637279690	RPS	311		3.405597723
RSP	111		2.59280327	SPR	111		2.93916423	SRP	111		2.90335398
RSP	112		2.97833953	SPR	112		2.92121079	SRP	112		3.32312511
RSP	113		3.01373150	SPR	113		3.04323603	SRP	113		3.16301223
RSP	121		1.71935133	SPR	121		3.02859830	SRP	121		3.05635661
RSP	122		1.78570558	SPR	122		3.00742754	SRP	122		3.01509402
RSP	131		1.64532713	SPR	131		3.02197351	SRP	131		3.02892520
RSP	211		2.97480041	SPR	211		1.60387677	SRP	211		1.60999547
RSP	212		3.07700287	SPR	212		1.62562601	SRP	212		1.62710631
RSP	221		2.32372781	SPR	221		1.61082201	SRP	221		1.56153769
RSP	311		3.60272414	SPR	311		1.39365130	SRP	311		1.37723178

Табела 5.14. Прорачунате вредности $DL\alpha$ за влакнасте материјале

Тип В.М.	Дебљина	
	1 cm	2 cm
AZMAFON	1.539457	3.301085

Избор могућих алтернатива из скупа анализираних материјала је извршен на основу вредности $DL\alpha$. Одабрани су материјали чија је вредност $DL\alpha$ већа од 3.3. Одабрано је 5 комбинација вишеслојних зрнастих материјала, један тип влакнастог материјала и четири врсте пена (табела 5.15.).

Табела 5.15. Одабране алтернативе

Алтернатива	OZNAKA	d (mm)	DL α
A1	PRS 212	50	3.602
A2	PSR 311	50	3.637
A3	RPS 122	50	3.620
A4	RPS 131	50	3.616
A5	RPS 221	50	3.616
A6	AZMAFON	20	3.301
A7	S 2026	50	3.934
A8	ES 3234	50	3.792
A9	T 2036	50	4.669
A10	T 3545	50	3.502

5.8. Формирање модела одлучивања

Потребно је рангирати 10 алтернатива:

$$x \in A [A1, A2, \dots, A10]$$

при чему треба максимизирати или минимизирати 21 функцију критеријума:

$$\text{Max}(\text{Min})\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_{21}(x)\}$$

При том су познате вредности f_{ij} сваког разматраног критеријума **Kj** за сваку од могућих алтернатива **Ai**:


$$f_{ij} = f_j(A_i) \quad \forall (i, j); \quad i = 1, 2, \dots, 10; \quad j = 1, 2, \dots, 21$$

Модел вишекритеријумске анализе се може приказати одговарајућом *матрицом одлучивања* реда (21x10) у коју су уписане прорачунате или процењене вредности сваког разматраног критеријума за сваку од 10 алтернатива:

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	
K1	3.602	3.637	3.620	3.616	3.616	3.301	3.934	3.792	4.669	3.502	max
K2	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	max
K3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	min
K4	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	max
K5	3.5	3	3.5	3	5	5	5	5	5	5	max
K6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	max
K7	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	min
K8	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	max
K9	5	5	5	5	5	1	2	2	2	2	min
K10	5	5	5	5	5	0	2	2	2	2	max
K11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	max
K12	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	min
K13	2.44	2.58	2.44	2.58	2.8	0.4	0.3	0.5	0.35	0.5	max
K14	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	max
K15	5	5	5	5	5	4	0	0	0	0	max
K16	5	5	5	5	5	3	2	2	2	2	max
K17	1.6	2.2	1.6	2.2	2	1	0	0	0	0	min
K18	5	5	5	5	5	4	3	3	3	3	max
K19	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	max
K20	43	47	43	47	48	4	6	13	8.25	14.5	min
K21	5	5	5	5	5	4	3	3	3	3	min

5.9. Оцена и рангирање алтернатива

За решење проблема рангирања расположивих алтернатива је коришћен софтвер MODIPROM. На улазној масци програма (слика 5.12.) уносе се: подаци о вредности критеријумских функција за поједине алтернативе, вредности релативних тежина критеријумских функција, бира се врста оптимизације за сваку функцију (*min* или *max*) и уносе остали подаци.



**ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА
МЕТОД "МОДИПРОМ"**

**МАШИНСКИ
ФАКУЛТЕТ
КРАЉЕВО**

Назив пројекта: **ИЗБОР АПСОРПЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА**

Датум: **28.05.2016 год**

Урадио: **М. Коларевић**

Опис (Напомена):
Избор апсорпционог материјала за звучну баријеру
ОШ "Димитрије Туцовић" Краљево

Бр. Алтернатива: **10**

Бр. Критеријума: **21**

$\alpha =$ **0.15**

Подаци

	АЛТЕРНАТИВЕ										Рел.тежине:		
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	Wj	min/max	
КРИТЕРИЈУМИ	K1	3.602	3.637	3.620	3.616	3.616	3.301	3.934	3.792	4.669	3.502	10.000	max
	K2	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	3.000	max
	K3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	5.000	min
	K4	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	3.000	max
	K5	3.5	3	3.5	3	3	5	5	5	5	5	5.000	max
	K6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5.000	max
	K7	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	3.000	min
	K8	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	5.000	max
	K9	5	5	5	5	5	1	2	2	2	2	3.000	min
	K10	5	5	5	5	5	0	2	2	2	2	5.000	max
	K11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8.000	max
	K12	5	5	5	5	5	2	5	5	5	5	10.000	min
	K13	2.44	2.58	2.44	2.58	2.8	0.4	0.3	0.5	0.35	0.5	6.000	max
	K14	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	5.000	max
	K15	5	5	5	5	5	4	0	0	0	0	6.000	max
	K16	5	5	5	5	5	3	2	2	2	2	5.000	max
	K17	1.6	2.2	1.6	2.2	2	1	0	0	0	0	4.000	min
	K18	5	5	5	5	5	4	3	3	3	3	5.000	max
	K19	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	7.000	max
	K20	43	47	43	47	48	4	6	13	8.25	14.5	10.000	min
	K21	5	5	5	5	5	4	3	3	3	3	9.000	min
K22												min	
K23												min	
K24												min	
K25												max	

СТАРТ

Слика 5.12. Интерфејс програма MODIPROM


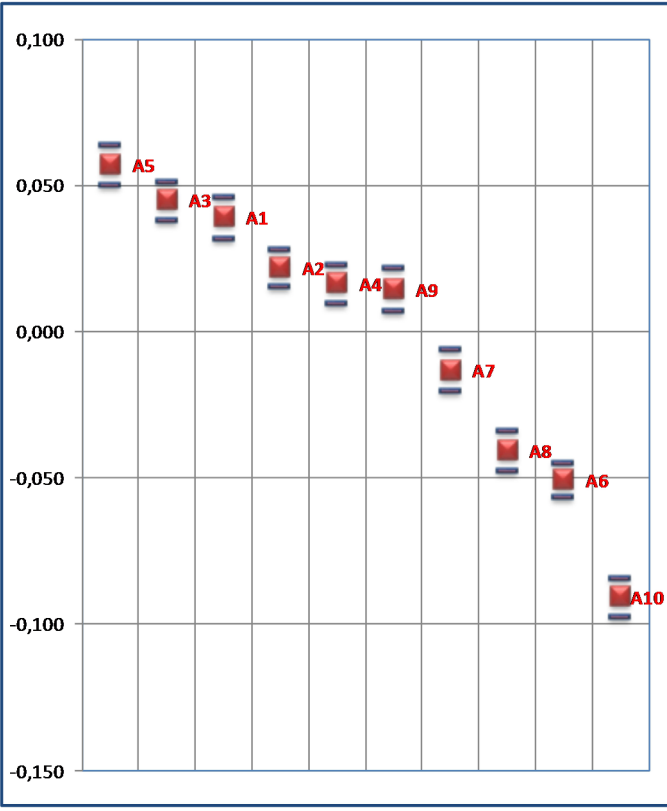
Резултати вишекритеријумске анализе се приказују у виду извештаја на коме се даје коначан редослед алтернатива по варијантама PROMETHEE I, PROMETHEE II и PROMETHEE III и графика интервалног поретка алтернатива (слика 5.13.). Као најбоља алтернатива по сва три критеријума је предложена алтернатива A5 тј. вишеслојна комбинација рециклиране гуме, рециклиране пластике и песка RPS 221 која се састоји од слоја рециклиране гуме дебљине 2 cm који се налази са стране звучног извора, слоја рециклиране пластике дебљине 2 cm у средини и слоја песка дебљине 1 cm на страни супротно од звучног извора.

5.10. Анализа осетљивости

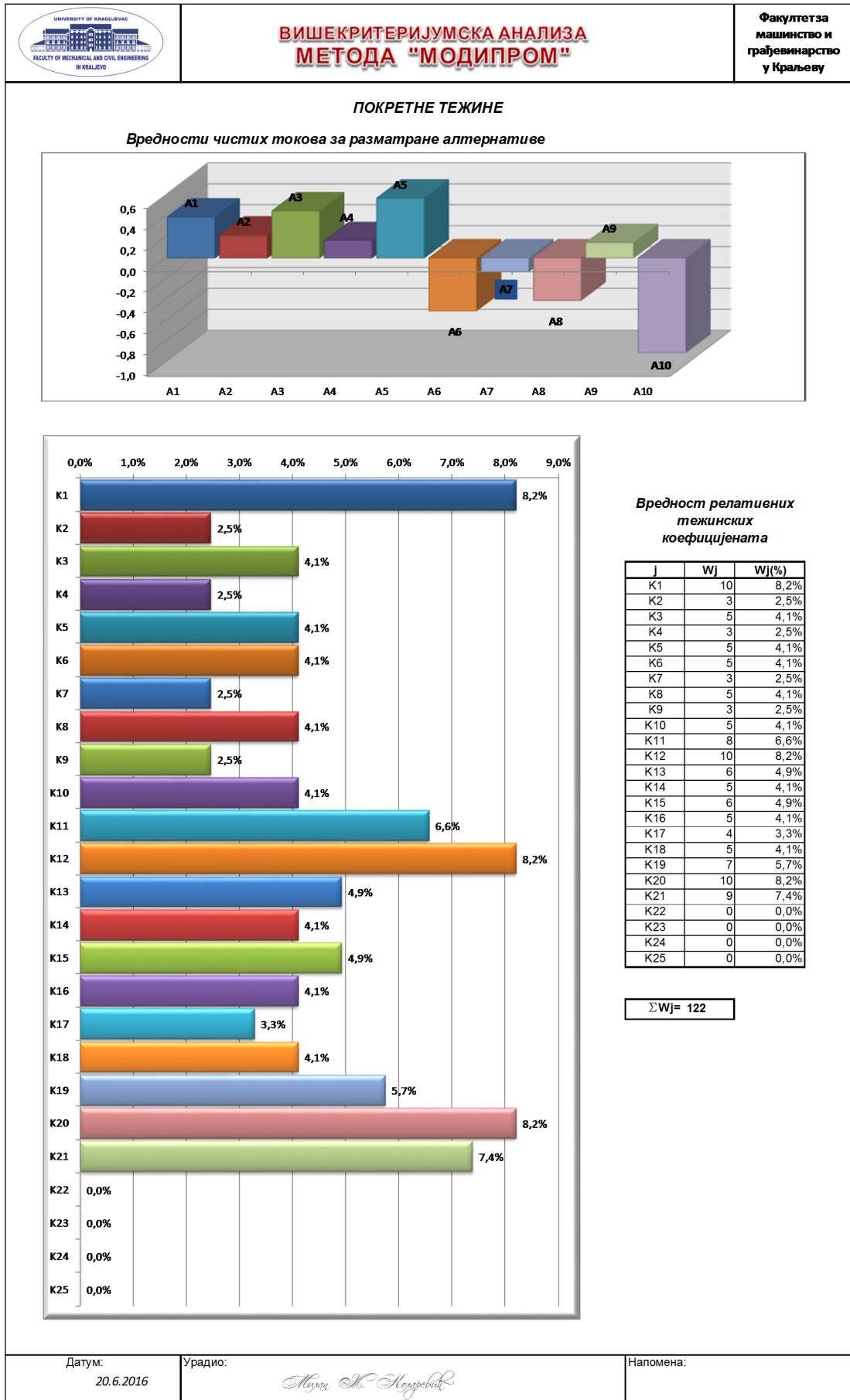
Програм MODIPROM има могућност графичког приказа анализе осетљивости. На дијаграму „Покретних тежина“ (слика 5.14.) се могу видети ефекти утицаја тежинских коефицијената на коначан редослед алтернатива чиме се знатно олакшава доношење коначне одлуке. Види се да алтернатива 5 доминира над осталим алтернативама, нарочито над алтернативама A6, A7, A8, A9 и A10. Како су алтернативе A1, A2, A3 и A4 из исте групе материјала (комбинације вишеслојних зрнастих материјала) то имају и исте вредности за

већину разматраних критеријума за сваку од 10 алтернатива, осим за критеријуме K1, K5, K13, K17 и K20.

За развијени модел су урађене три анализе осетљивости у којима су тестиране релативне тежине критеријума. Вредности усвојених релативних тежина по варијантама v.1, v.2 и v.3 су приказане у табели 5.16. Вредност релативних тежина за почетну варијанту је означена као варијанта v.0.

 <p>UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC FACULTY OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING IN KRAGUJEVO</p>	<h2 style="color: red; margin: 0;">ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА МЕТОДА "МОДИПРОМ"</h2>	<p style="text-align: center;">Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву</p>																																																																								
<p>Назив пројекта: ИЗБОР АПСОРПЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА</p> <p>Опис: <i>Избор апсорпционог материјала за звучну баријеру ОШ "Димитрије Туцовић" Краљево</i></p>																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">PROMETHEE I</th> <th colspan="2">PROMETHEE II</th> <th colspan="2">PROMETHEE III</th> </tr> <tr> <th>Ранг</th> <th></th> <th>Ранг</th> <th></th> <th>Ранг</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>A5</td><td>9</td><td>A5</td><td>8</td><td>A5</td></tr> <tr><td>5</td><td>A3</td><td>8</td><td>A3</td><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>4</td><td>A9</td><td>7</td><td>A1</td><td>7</td><td>A3</td></tr> <tr><td>3</td><td>A1</td><td>6</td><td>A2</td><td>4</td><td>A2</td></tr> <tr><td>3</td><td>A2</td><td>5</td><td>A4</td><td>4</td><td>A4</td></tr> <tr><td>2</td><td>A4</td><td>3</td><td>A7</td><td>4</td><td>A9</td></tr> <tr><td>2</td><td>A7</td><td>2</td><td>A8</td><td>3</td><td>A7</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td><td>2</td><td>A9</td><td>1</td><td>A6</td></tr> <tr><td>0</td><td>A6</td><td>2</td><td>A10</td><td>1</td><td>A8</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td><td>1</td><td>A6</td><td>0</td><td>A10</td></tr> </tbody> </table> <div style="margin-top: 20px;"> <p>Бр. Алтернатива: <input style="width: 50px;" type="text" value="10"/></p> <p>Бр. Критеријума: <input style="width: 50px;" type="text" value="21"/></p> <p>$\alpha =$ <input style="width: 50px;" type="text" value="0,15"/></p> </div>			PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III		Ранг		Ранг		Ранг		6	A5	9	A5	8	A5	5	A3	8	A3	7	A1	4	A9	7	A1	7	A3	3	A1	6	A2	4	A2	3	A2	5	A4	4	A4	2	A4	3	A7	4	A9	2	A7	2	A8	3	A7	1	A8	2	A9	1	A6	0	A6	2	A10	1	A8	0	A10	1	A6	0	A10
PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III																																																																						
Ранг		Ранг		Ранг																																																																						
6	A5	9	A5	8	A5																																																																					
5	A3	8	A3	7	A1																																																																					
4	A9	7	A1	7	A3																																																																					
3	A1	6	A2	4	A2																																																																					
3	A2	5	A4	4	A4																																																																					
2	A4	3	A7	4	A9																																																																					
2	A7	2	A8	3	A7																																																																					
1	A8	2	A9	1	A6																																																																					
0	A6	2	A10	1	A8																																																																					
0	A10	1	A6	0	A10																																																																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Подаци за даљу анализу</th> </tr> <tr> <th></th> <th>A_i</th> <th>C_{ij}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>A1</td><td>0,87860</td></tr> <tr><td>2</td><td>A2</td><td>0,76160</td></tr> <tr><td>3</td><td>A3</td><td>0,91844</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>0,72554</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td><td>1,00000</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td><td>0,27113</td></tr> <tr><td>7</td><td>A7</td><td>0,52505</td></tr> <tr><td>8</td><td>A8</td><td>0,33879</td></tr> <tr><td>9</td><td>A9</td><td>0,71254</td></tr> <tr><td>10</td><td>A10</td><td>0,00000</td></tr> </tbody> </table>	Подаци за даљу анализу				A _i	C _{ij}	1	A1	0,87860	2	A2	0,76160	3	A3	0,91844	4	A4	0,72554	5	A5	1,00000	6	A6	0,27113	7	A7	0,52505	8	A8	0,33879	9	A9	0,71254	10	A10	0,00000																																					
Подаци за даљу анализу																																																																										
	A _i	C _{ij}																																																																								
1	A1	0,87860																																																																								
2	A2	0,76160																																																																								
3	A3	0,91844																																																																								
4	A4	0,72554																																																																								
5	A5	1,00000																																																																								
6	A6	0,27113																																																																								
7	A7	0,52505																																																																								
8	A8	0,33879																																																																								
9	A9	0,71254																																																																								
10	A10	0,00000																																																																								
<p>Датум: 20.6.2016</p>	<p>Урадио: <i>Милица М. Стојановић</i></p>	<p>Напомена:</p>																																																																								

Слика 5.13. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – ВКА


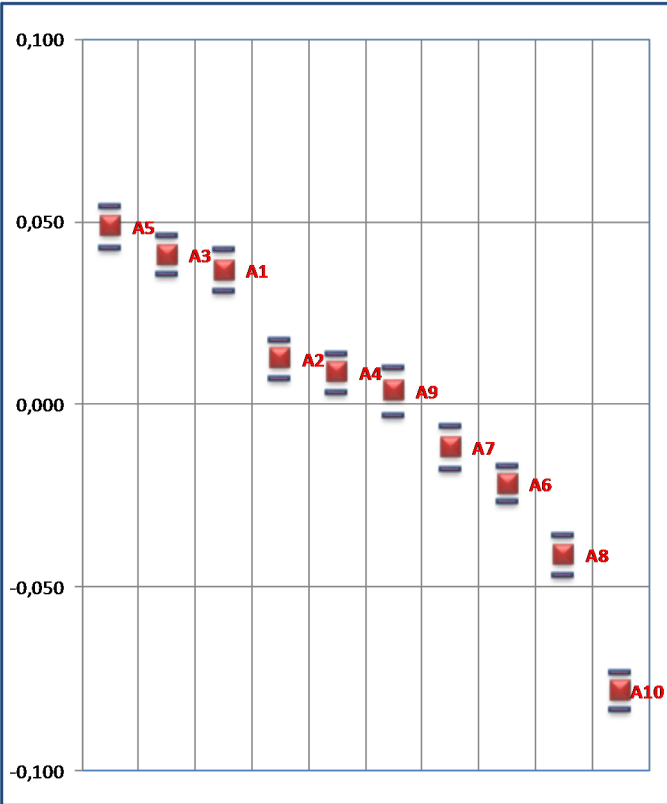


Слика 5.14. Анализа утицаја покретних тежина на резултате ВКА

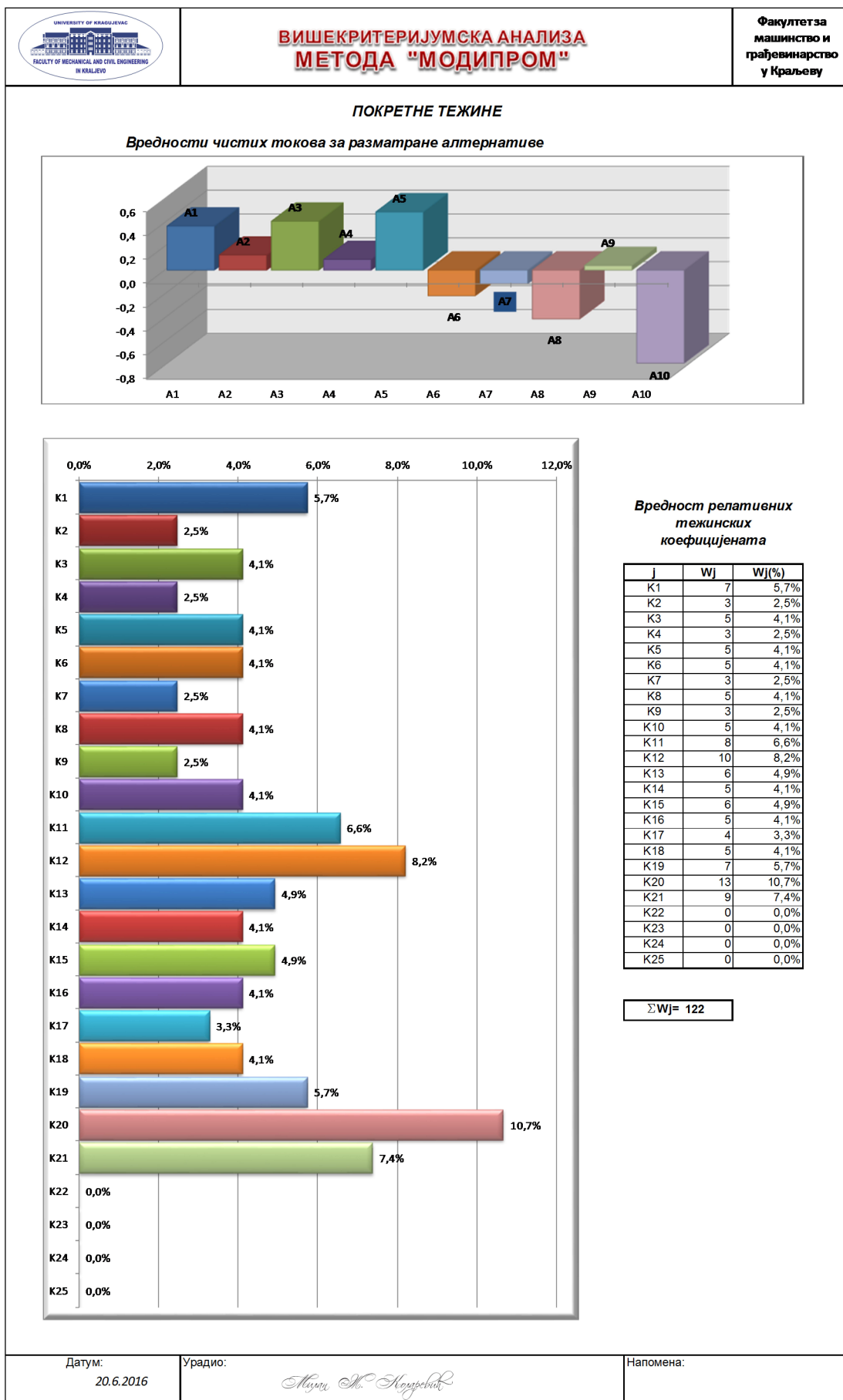
Табела 5.16. Релативне тежине за анализу осељивости

Критеријуми	Вредности релативне тежине			
	v.0	v.1	v.2	v.3
K1	10.000	7.000	10.000	10.000
K2	3.000	3.000	3.000	3.000
K3	5.000	5.000	5.000	5.000
K4	3.000	3.000	3.000	3.000
K5	5.000	5.000	5.000	5.000
K6	5.000	5.000	5.000	5.000
K7	3.000	3.000	3.000	3.000
K8	5.000	5.000	5.000	5.000
K9	3.000	3.000	3.000	3.000
K10	5.000	5.000	5.000	5.000
K11	8.000	8.000	8.000	7.000
K12	10.000	10.000	10.000	12.000
K13	6.000	6.000	6.000	6.000
K14	5.000	5.000	5.000	5.000
K15	6.000	6.000	6.000	6.000
K16	5.000	5.000	5.000	5.000
K17	4.000	4.000	4.000	4.000
K18	5.000	5.000	5.000	5.000
K19	7.000	7.000	7.000	13.000
K20	10.000	13.000	10.000	7.000
K21	9.000	9.000	9.000	10.000


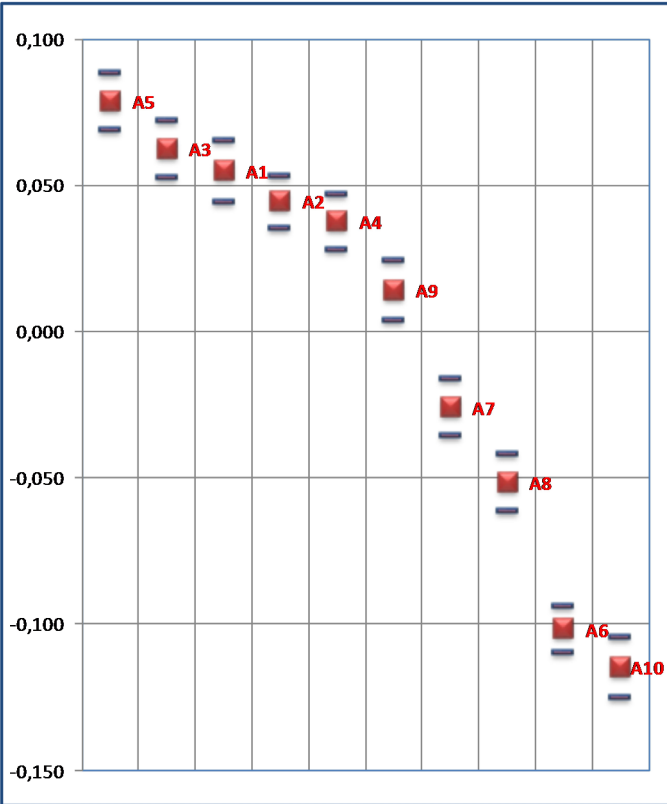
На основу добијених резултата (слике 5.15. до 5.20.) се може закључити да редослед алтернатива остаје исти те се може констатовати да је одабрано решење стабилно.

 <p>UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC FACULTY OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING IN KRAGUJEVO</p>	<h2 style="color: red; margin: 0;">ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА МЕТОДА "МОДИПРОМ"</h2>	<p style="text-align: center;">Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву</p>																																																																								
<p>Назив пројекта: ИЗБОР АПСОРПЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА</p> <p>Опис: <i>Избор апсорпционог материјала за звучну баријеру ОШ "Димитрије Туцовић" Краљево -АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ в. 1</i></p>																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">PROMETHEE I</th> <th colspan="2">PROMETHEE II</th> <th colspan="2">PROMETHEE III</th> </tr> <tr> <th>Ранг</th> <th></th> <th>Ранг</th> <th></th> <th>Ранг</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>A5</td><td>9</td><td>A5</td><td>8</td><td>A5</td></tr> <tr><td>5</td><td>A3</td><td>8</td><td>A3</td><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>4</td><td>A1</td><td>7</td><td>A1</td><td>7</td><td>A3</td></tr> <tr><td>3</td><td>A2</td><td>6</td><td>A2</td><td>4</td><td>A2</td></tr> <tr><td>3</td><td>A9</td><td>5</td><td>A4</td><td>4</td><td>A4</td></tr> <tr><td>2</td><td>A4</td><td>3</td><td>A7</td><td>4</td><td>A9</td></tr> <tr><td>2</td><td>A7</td><td>2</td><td>A6</td><td>2</td><td>A6</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td><td>1</td><td>A8</td><td>2</td><td>A7</td></tr> <tr><td>0</td><td>A6</td><td>1</td><td>A9</td><td>1</td><td>A8</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td><td>1</td><td>A10</td><td>0</td><td>A10</td></tr> </tbody> </table> <div style="margin-top: 10px;"> <p>Бр. Алтернатива: <input style="width: 50px;" type="text" value="10"/></p> <p>Бр. Критеријума: <input style="width: 50px;" type="text" value="21"/></p> <p>$\alpha =$ <input style="width: 50px;" type="text" value="0,15"/></p> </div>			PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III		Ранг		Ранг		Ранг		6	A5	9	A5	8	A5	5	A3	8	A3	7	A1	4	A1	7	A1	7	A3	3	A2	6	A2	4	A2	3	A9	5	A4	4	A4	2	A4	3	A7	4	A9	2	A7	2	A6	2	A6	1	A8	1	A8	2	A7	0	A6	1	A9	1	A8	0	A10	1	A10	0	A10
PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III																																																																						
Ранг		Ранг		Ранг																																																																						
6	A5	9	A5	8	A5																																																																					
5	A3	8	A3	7	A1																																																																					
4	A1	7	A1	7	A3																																																																					
3	A2	6	A2	4	A2																																																																					
3	A9	5	A4	4	A4																																																																					
2	A4	3	A7	4	A9																																																																					
2	A7	2	A6	2	A6																																																																					
1	A8	1	A8	2	A7																																																																					
0	A6	1	A9	1	A8																																																																					
0	A10	1	A10	0	A10																																																																					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;">  </div> <div style="width: 35%; border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Подаци за даљу анализу</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>A_i</th> <th>C_{ij}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>A1</td><td>0,90624</td></tr> <tr><td>2</td><td>A2</td><td>0,71464</td></tr> <tr><td>3</td><td>A3</td><td>0,93871</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>0,68524</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td><td>1,00000</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td><td>0,44597</td></tr> <tr><td>7</td><td>A7</td><td>0,52475</td></tr> <tr><td>8</td><td>A8</td><td>0,29243</td></tr> <tr><td>9</td><td>A9</td><td>0,64536</td></tr> <tr><td>10</td><td>A10</td><td>0,00000</td></tr> </tbody> </table> </div> </div>				A _i	C _{ij}	1	A1	0,90624	2	A2	0,71464	3	A3	0,93871	4	A4	0,68524	5	A5	1,00000	6	A6	0,44597	7	A7	0,52475	8	A8	0,29243	9	A9	0,64536	10	A10	0,00000																																							
	A _i	C _{ij}																																																																								
1	A1	0,90624																																																																								
2	A2	0,71464																																																																								
3	A3	0,93871																																																																								
4	A4	0,68524																																																																								
5	A5	1,00000																																																																								
6	A6	0,44597																																																																								
7	A7	0,52475																																																																								
8	A8	0,29243																																																																								
9	A9	0,64536																																																																								
10	A10	0,00000																																																																								
<p>Датум: 20.6.2016</p>	<p>Урадио: <i>Милица М. Стојановић</i></p>	<p>Напомена:</p>																																																																								

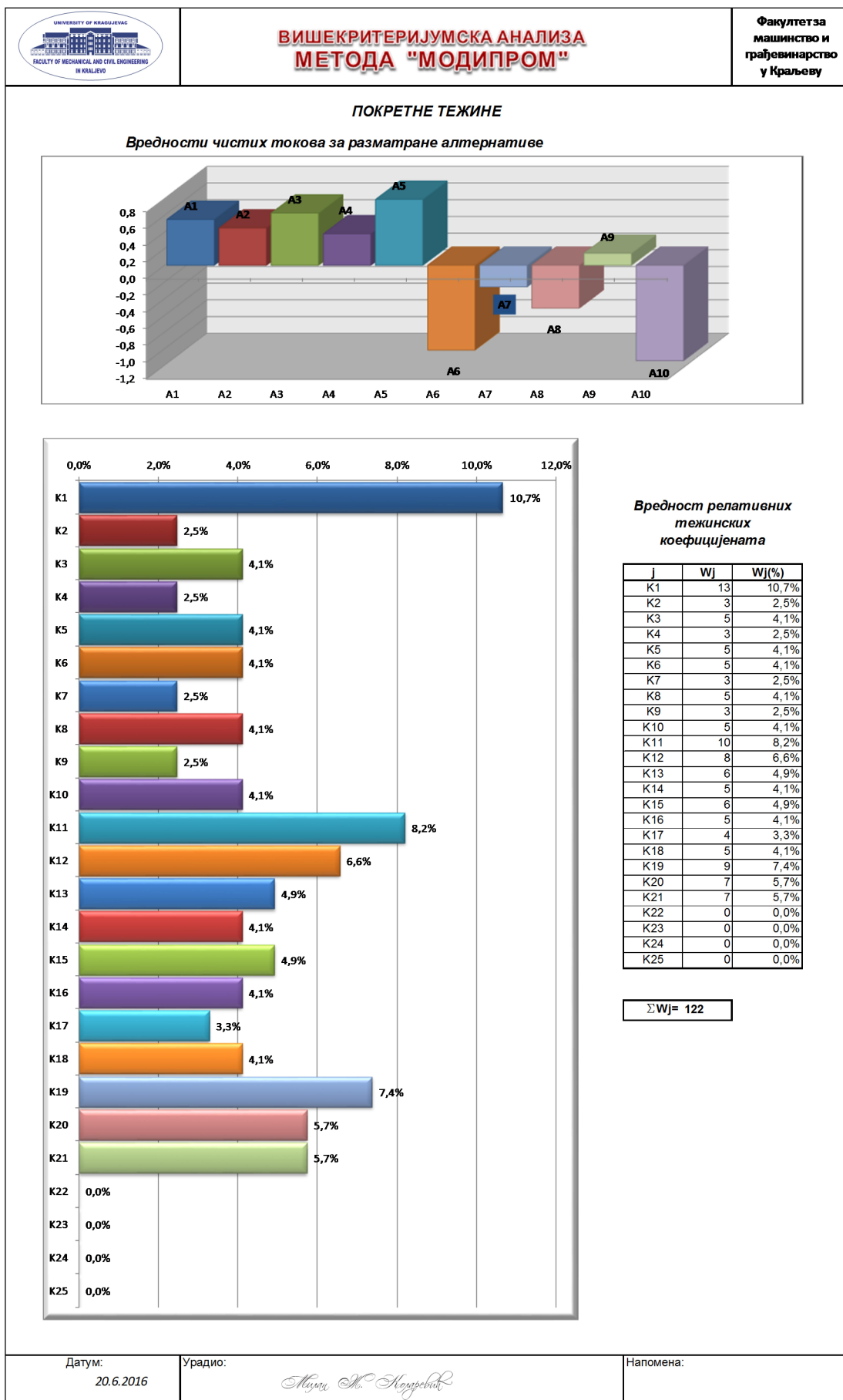
Слика 5.15. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 1




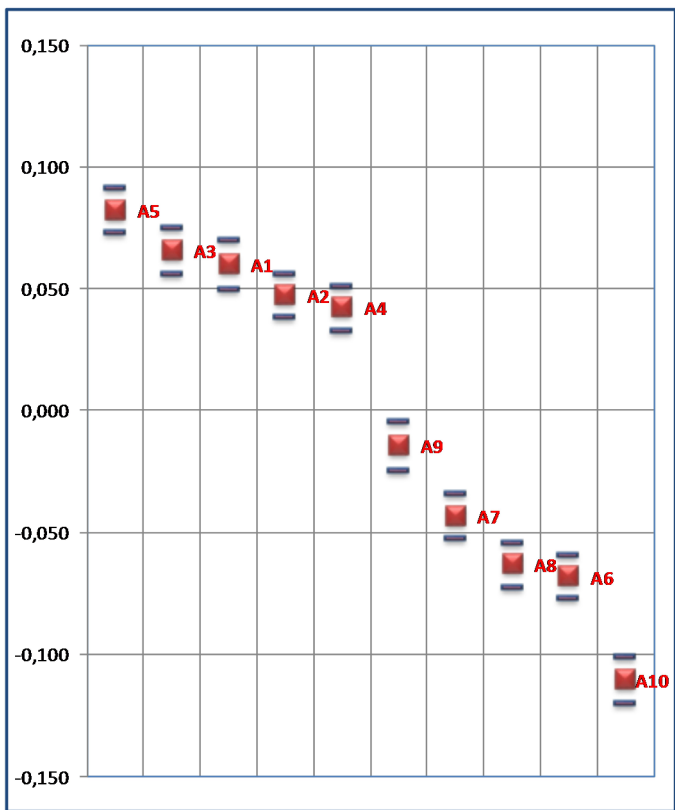
Слика 5.16. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 1

 <p>UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC FACULTY OF MECHANICAL AND CIVIL ENGINEERING IN KRAGUJEVO</p>	<h2 style="color: red; margin: 0;">ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА МЕТОДА "МОДИПРОМ"</h2>	<p style="text-align: center;">Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву</p>																																																																								
<p>Назив пројекта: ИЗБОР АПСОРПЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА</p> <p>Опис: <i>Избор апсорпционог материјала за звучну баријеру ОШ "Димитрије Туцовић" Краљево -АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ в. 2</i></p>																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">PROMETHEE I</th> <th colspan="2">PROMETHEE II</th> <th colspan="2">PROMETHEE III</th> </tr> <tr> <th>Ранг</th> <th>Аi</th> <th>Ранг</th> <th>Аi</th> <th>Ранг</th> <th>Аi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7</td><td>A5</td><td>9</td><td>A5</td><td>8</td><td>A5</td></tr> <tr><td>6</td><td>A3</td><td>8</td><td>A3</td><td>6</td><td>A3</td></tr> <tr><td>5</td><td>A2</td><td>7</td><td>A1</td><td>5</td><td>A1</td></tr> <tr><td>4</td><td>A1</td><td>6</td><td>A2</td><td>5</td><td>A2</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>5</td><td>A4</td><td>5</td><td>A4</td></tr> <tr><td>4</td><td>A9</td><td>3</td><td>A7</td><td>4</td><td>A9</td></tr> <tr><td>3</td><td>A7</td><td>2</td><td>A8</td><td>3</td><td>A7</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td><td>2</td><td>A9</td><td>2</td><td>A8</td></tr> <tr><td>0</td><td>A6</td><td>2</td><td>A10</td><td>0</td><td>A6</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td><td>1</td><td>A6</td><td>0</td><td>A10</td></tr> </tbody> </table> <div style="margin-top: 20px;"> <p>Бр. Алтернатива: <input style="width: 50px;" type="text" value="10"/></p> <p>Бр. Критеријума: <input style="width: 50px;" type="text" value="21"/></p> <p>$\alpha =$ <input style="width: 50px;" type="text" value="0,15"/></p> </div>			PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III		Ранг	Аi	Ранг	Аi	Ранг	Аi	7	A5	9	A5	8	A5	6	A3	8	A3	6	A3	5	A2	7	A1	5	A1	4	A1	6	A2	5	A2	4	A4	5	A4	5	A4	4	A9	3	A7	4	A9	3	A7	2	A8	3	A7	1	A8	2	A9	2	A8	0	A6	2	A10	0	A6	0	A10	1	A6	0	A10
PROMETHEE I		PROMETHEE II		PROMETHEE III																																																																						
Ранг	Аi	Ранг	Аi	Ранг	Аi																																																																					
7	A5	9	A5	8	A5																																																																					
6	A3	8	A3	6	A3																																																																					
5	A2	7	A1	5	A1																																																																					
4	A1	6	A2	5	A2																																																																					
4	A4	5	A4	5	A4																																																																					
4	A9	3	A7	4	A9																																																																					
3	A7	2	A8	3	A7																																																																					
1	A8	2	A9	2	A8																																																																					
0	A6	2	A10	0	A6																																																																					
0	A10	1	A6	0	A10																																																																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">Подаци за даљу анализу</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Ai</th> <th>Cij</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>A1</td><td>0,87595</td></tr> <tr><td>2</td><td>A2</td><td>0,82284</td></tr> <tr><td>3</td><td>A3</td><td>0,91554</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>0,78700</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td><td>1,00000</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td><td>0,06580</td></tr> <tr><td>7</td><td>A7</td><td>0,45825</td></tr> <tr><td>8</td><td>A8</td><td>0,32599</td></tr> <tr><td>9</td><td>A9</td><td>0,66573</td></tr> <tr><td>10</td><td>A10</td><td>0,00000</td></tr> </tbody> </table>	Подаци за даљу анализу				Ai	Cij	1	A1	0,87595	2	A2	0,82284	3	A3	0,91554	4	A4	0,78700	5	A5	1,00000	6	A6	0,06580	7	A7	0,45825	8	A8	0,32599	9	A9	0,66573	10	A10	0,00000																																					
Подаци за даљу анализу																																																																										
	Ai	Cij																																																																								
1	A1	0,87595																																																																								
2	A2	0,82284																																																																								
3	A3	0,91554																																																																								
4	A4	0,78700																																																																								
5	A5	1,00000																																																																								
6	A6	0,06580																																																																								
7	A7	0,45825																																																																								
8	A8	0,32599																																																																								
9	A9	0,66573																																																																								
10	A10	0,00000																																																																								
<p>Датум: 20.6.2016</p>	<p>Урадио: <i>Милица М. Стојановић</i></p>	<p>Напомена:</p>																																																																								

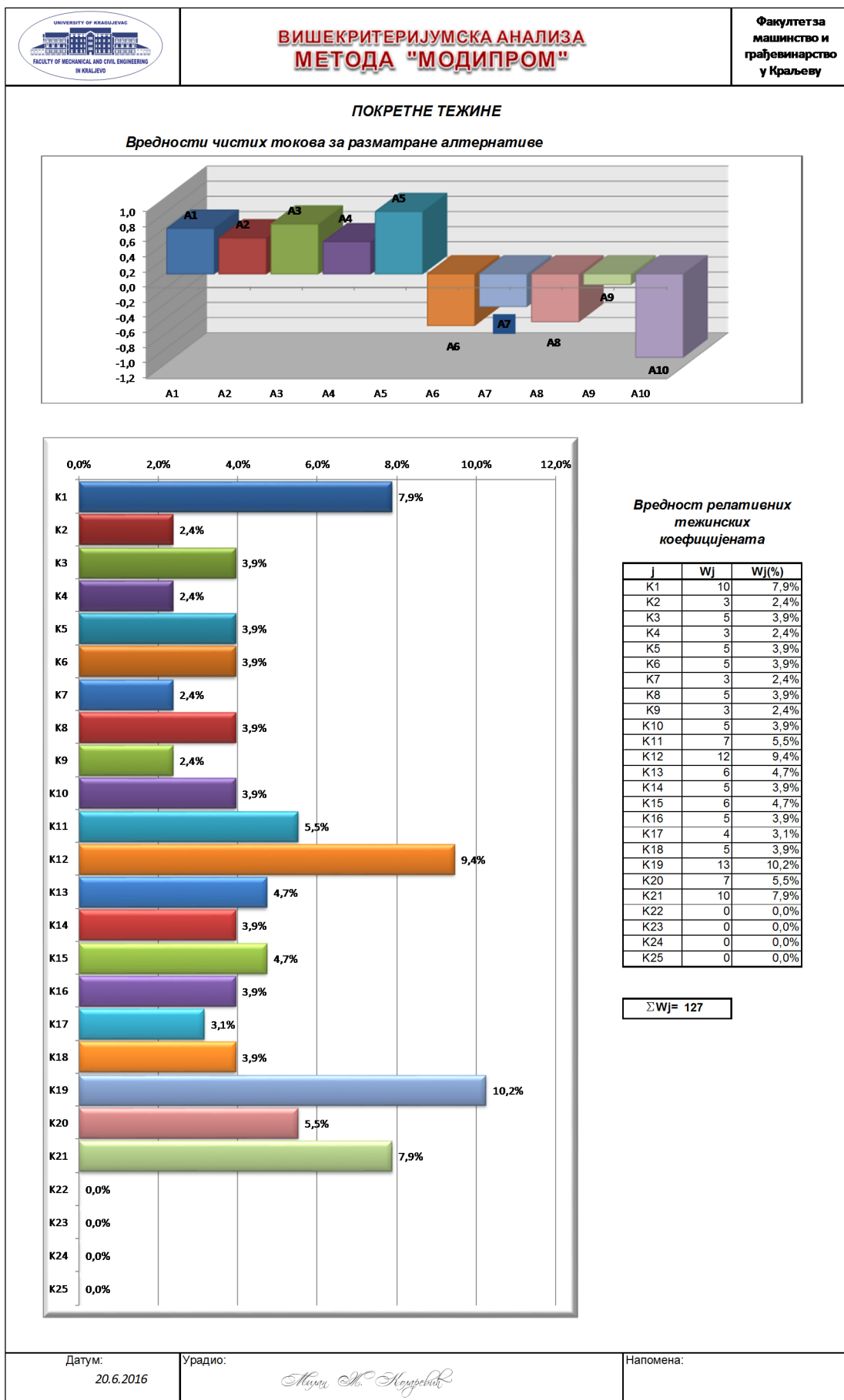
Слика 5.17. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 2



Слика 5.18. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 2

	<h2 style="color: red; margin: 0;">ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКА АНАЛИЗА МЕТОДА "МОДИПРОМ"</h2>	Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву																																																																		
<p>Назив пројекта: ИЗБОР АПСОРПЦИОНОГ МАТЕРИЈАЛА</p> <p>Опис: <i>Избор апсорпционог материјала за звучну баријеру ОШ "Димитрије Туцовић" Краљево -АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ в. 3</i></p>																																																																				
PROMETHEE I	PROMETHEE II	PROMETHEE III																																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr><th>Ранг</th><th>Аi</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>8</td><td>A5</td></tr> <tr><td>7</td><td>A3</td></tr> <tr><td>6</td><td>A2</td></tr> <tr><td>5</td><td>A1</td></tr> <tr><td>5</td><td>A4</td></tr> <tr><td>4</td><td>A9</td></tr> <tr><td>2</td><td>A7</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td></tr> <tr><td>0</td><td>A6</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td></tr> </tbody> </table>	Ранг	Аi	8	A5	7	A3	6	A2	5	A1	5	A4	4	A9	2	A7	1	A8	0	A6	0	A10	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr><th>Ранг</th><th>Аi</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>9</td><td>A5</td></tr> <tr><td>8</td><td>A3</td></tr> <tr><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>6</td><td>A2</td></tr> <tr><td>5</td><td>A4</td></tr> <tr><td>3</td><td>A7</td></tr> <tr><td>2</td><td>A8</td></tr> <tr><td>2</td><td>A9</td></tr> <tr><td>2</td><td>A10</td></tr> <tr><td>1</td><td>A6</td></tr> </tbody> </table>	Ранг	Аi	9	A5	8	A3	7	A1	6	A2	5	A4	3	A7	2	A8	2	A9	2	A10	1	A6	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr><th>Ранг</th><th>Аi</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>8</td><td>A5</td></tr> <tr><td>7</td><td>A3</td></tr> <tr><td>5</td><td>A1</td></tr> <tr><td>5</td><td>A2</td></tr> <tr><td>5</td><td>A4</td></tr> <tr><td>4</td><td>A9</td></tr> <tr><td>3</td><td>A7</td></tr> <tr><td>1</td><td>A6</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td></tr> </tbody> </table>	Ранг	Аi	8	A5	7	A3	5	A1	5	A2	5	A4	4	A9	3	A7	1	A6	1	A8	0	A10
Ранг	Аi																																																																			
8	A5																																																																			
7	A3																																																																			
6	A2																																																																			
5	A1																																																																			
5	A4																																																																			
4	A9																																																																			
2	A7																																																																			
1	A8																																																																			
0	A6																																																																			
0	A10																																																																			
Ранг	Аi																																																																			
9	A5																																																																			
8	A3																																																																			
7	A1																																																																			
6	A2																																																																			
5	A4																																																																			
3	A7																																																																			
2	A8																																																																			
2	A9																																																																			
2	A10																																																																			
1	A6																																																																			
Ранг	Аi																																																																			
8	A5																																																																			
7	A3																																																																			
5	A1																																																																			
5	A2																																																																			
5	A4																																																																			
4	A9																																																																			
3	A7																																																																			
1	A6																																																																			
1	A8																																																																			
0	A10																																																																			
<p>Бр. Алтернатива: <input style="width: 50px;" type="text" value="10"/></p> <p>Бр. Критеријума: <input style="width: 50px;" type="text" value="21"/></p> <p>$\alpha =$ <input style="width: 50px;" type="text" value="0,15"/></p>																																																																				
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr><th colspan="2">Подаци за даљу анализу</th></tr> <tr><th>Ai</th><th>Cij</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>A1</td><td>0,88510</td></tr> <tr><td>2</td><td>A2</td><td>0,81956</td></tr> <tr><td>3</td><td>A3</td><td>0,91448</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>0,79296</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td><td>1,00000</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td><td>0,21852</td></tr> <tr><td>7</td><td>A7</td><td>0,34869</td></tr> <tr><td>8</td><td>A8</td><td>0,24468</td></tr> <tr><td>9</td><td>A9</td><td>0,49905</td></tr> <tr><td>10</td><td>A10</td><td>0,00000</td></tr> </tbody> </table>	Подаци за даљу анализу		Ai	Cij	1	A1	0,88510	2	A2	0,81956	3	A3	0,91448	4	A4	0,79296	5	A5	1,00000	6	A6	0,21852	7	A7	0,34869	8	A8	0,24468	9	A9	0,49905	10	A10	0,00000																																
Подаци за даљу анализу																																																																				
Ai	Cij																																																																			
1	A1	0,88510																																																																		
2	A2	0,81956																																																																		
3	A3	0,91448																																																																		
4	A4	0,79296																																																																		
5	A5	1,00000																																																																		
6	A6	0,21852																																																																		
7	A7	0,34869																																																																		
8	A8	0,24468																																																																		
9	A9	0,49905																																																																		
10	A10	0,00000																																																																		
Датум: 20.6.2016	Урадио: <i>Милица М. Стојановић</i>	Напомена:																																																																		

Слика 5.19. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе – анализа осетљивости 3



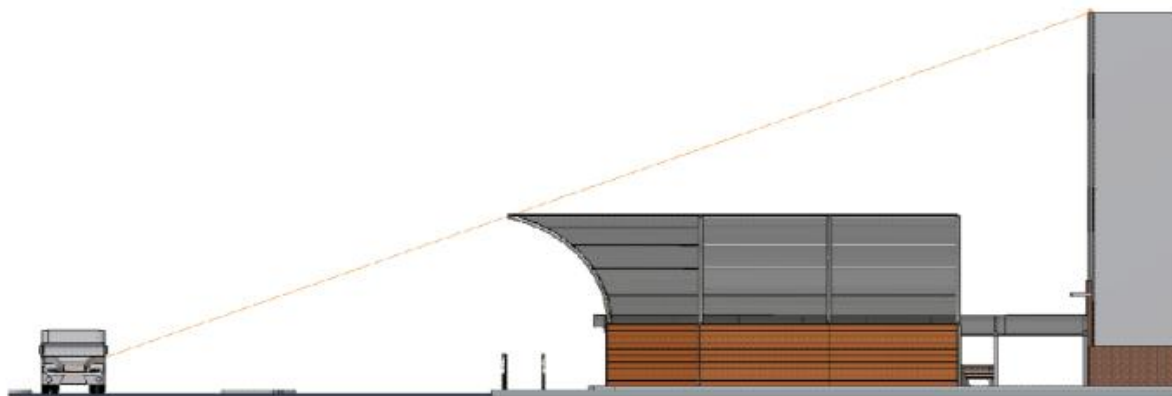
Слика 5.20. Анализа утицаја покретних тежина – анализа осетљивости 3

5.11. Избор оптималне алтернативе и предлог реализације пројекта

На основу спроведене свеобухватне вишекритеријумске анализе и анализе осетљивости одабран је материјал за звучну баријеру RPS 221 тј. комбинација вишеслојног зрнастог материјала дебљине 50 mm која се састоји од рециклиране гуме, рециклиране пластике и песка.

5.11.1 Технички опис пројектоване баријере

Акустички захтеви као што су: ефикасност, утицај атмосферских ефеката, апсорпција и габарит баријере, првенствено су анализирани при пројектовању. Дужина и висина баријере су прорачунати тако да обезбеђују довољну, односно, потребну заштитну ефикасност. На слици 5.21. се види да возила из најудаљеније траке немају директно простирање звука према школи. Наравно, ближи извори звука имају и већу заклоњеност а тиме и мањи утицај. Детаљан утицај буке са улице на зграду школе дат је у варијантама са и без баријере у претходним поглављима.



Слика 5.21. Профил баријере

Како баријера у облику кружног лука наткрива тротоар испред школе узимајући у обзир правац ветра у кишним периодима тај део тротоара ће бити заклоњен од кише. У зимском периоду приликом снежних падавина снег ће се веома мало задржавати на баријери с обзиром на нагиб површина баријере.

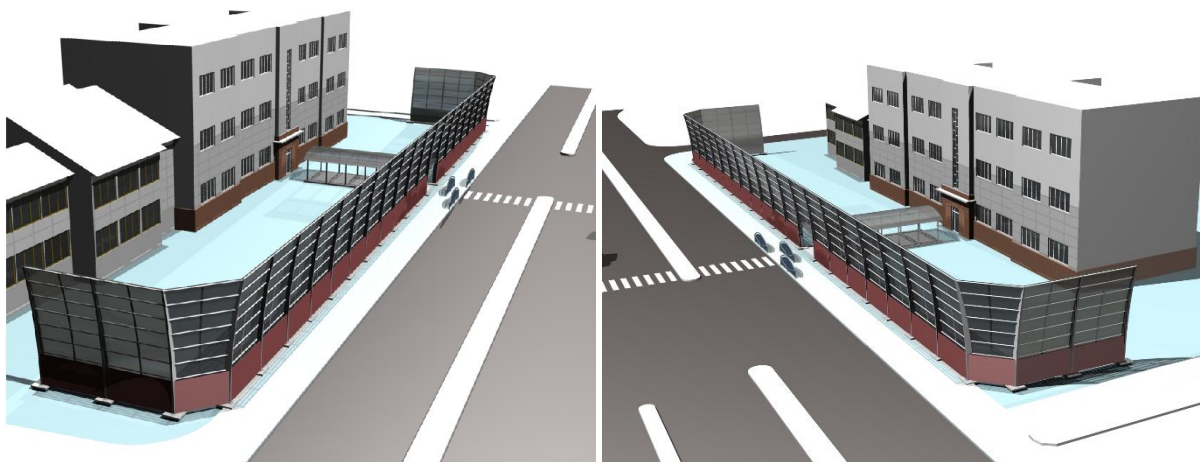
Звучна баријера је пројектована као комбинација звучно апсорпционих и рефлексионих површина. Доњи део баријере висине 2 m формиран је од усвојене комбинације вишеслојних рециклираних материјала дебљине 50 mm у виду стандардних панела који се постављају на носећу потконструкцију. Горњи вертикални и лучни део ради се од лексана дебљине 28 mm, тако да се рефлексија звука усмерава према саобраћајници а не према стамбеним зградама преко пута.

Звучна баријера је у целокупној дужини од 100 m пројектована са висином од 7 m и благим радијусом на крајевима који треба да елиминишу утицај дифракције звука од удаљених звучних извора. Угао удаљених звучних извора према фасади школе је мањи од 10° .

Естетски захтеви пројектоване баријере су задовољени обликом баријере који омогућава решавање техничких проблема а коришћењем савремених материјала и комбинацијом боја треба остварити посебан визуелни доживљај. Доњи део баријере направљен од изолационих панела дозвољава бојење различитим бојама као и евентуално сликање мурала или графита који би одговарали школском објекту. Носећа конструкција је пројектована од нерђајућег челика или материјала на којима би се извршила метализација што би дало леп изглед. На основу конструкцију каче се у горњем делу баријере елементи од прозирног или благо тонираног лексана. На овај начин остварује се у школском дворишту нека врста интимности рада. При изради баријере неће се оштетити дрвеће у парку испред школе.

Окружење школе изузев магистралног пута са четири траке који је главни узрочник буке је стамбено насеље и новоизграђена црква са владичанским домом. Конфигурација терена је равничарска. Правна регулатива би се морала истражити у смислу покривања тротоара на улици као дела јавне површине. Остали делови баријере налазе се у школском дворишту. Компатабилност са локалним изгледом је постигнута применом металне конструкције баријере као што је и новосаграђена метална ограда око цркве. Усклађеност баријере са трасом пута је потпуна јер су и баријера и зграда школе паралелне са осом пута.

Осим заштите од буке конструкција баријере има и друге садржаје. Део између улаза у школу и улаза у школско двориште са улице кроз баријеру је наткривен и опремљен клупама. Намена је да се ученици млађих разреда ту окупљају и са учитељима или родитељима групно прелазе улицу (слика 5.22.).

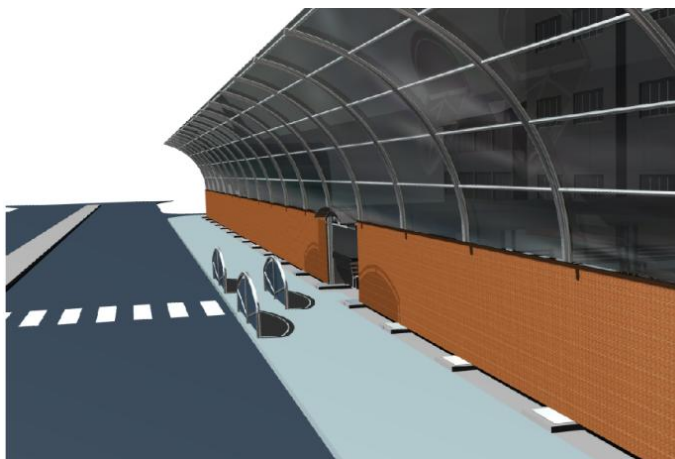


Слика 5.22. Изглед заштитне баријере код школе Димитрије Туцовић

Такође, на тротоару испред излаза из школског дворишта је постављена заштитна конструкција лавиринтског типа. Она усмерава прелазак улице преко пешачког прелаза и онемогућава неопрезан излазак на улицу (слика 5.23.).

Конструкција се ослања на темеље самце испод стубова тако да је погодним решењем вешања омогућено неометано ширење и скупљање материјала при промени температуре. Оптерећење и носивост баријере су прорачунати са аспекта самоносивости и утицаја ветра поштујући прописе из тих области. Одвођење воде од атмосферских падавина која се слије са баријере врши се преко бетонског канала који је испод конструкције у дворишту школе.

Слични примери заштите од буке наведени су у следећим референцама [134,140–150].



Слика 5.23. Поглед на баријеру са магистралног пута

Безбедност ученика овим решењем баријере је повишена како у смислу саобраћаја тако и од могућих контаката са људима на тротоару. Прегледност пута за возаче и ученике није умањена. Ефекти светлости, светлостне рефлексије и сенки нису запажени. Видљивост за животиње односно птице је обезбеђена благо тонираним лексаном. Материјали од којих је конструисана баријера су веома отпорни на пожар.

Еколошки фактори баријере се могу анализирати кроз смањење утицаја буке на ученике и особље школе, односно, смањење преноса издувних гасова из моторних возила у двориште школе односно у учионице. Материјали од којих је баријера направљена нису еколошки штетни по здравље људи.

Одржавање баријере је што се тиче атмосферског утицаја за дуги период коришћења непотребно јер се користе материјали отпорни на утицај кише, снега и ветра.

Трошкови транспорта материјала, опреме и људи су минимални. Сви радови се могу извести током школског распуста тако да настава као ни ученици не би били уопште ометани.

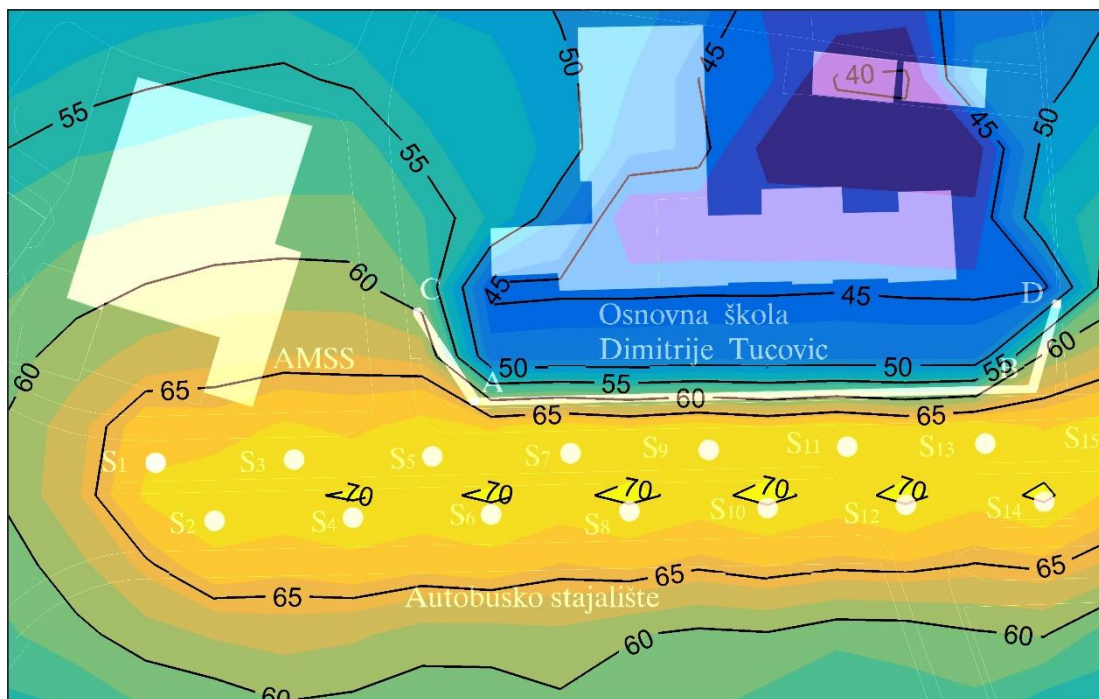
Технологичност израде и монтажа су дефинисани тако да се сви радови на изради баријере могу извести од локалних извођача не захтевајући посебне технологије.

5.11.2 Ефекти заштите од буке остварени постављањем баријере

Предложено решење заштите од буке је базирано на изради баријере између школе и саобраћајнице. Ефекти овог решења су довођење нивоа буке у дозвољену границу и заштита од емисије издувних гасова.

Користећи описани модел за локалне мапе буке и софтверско решење развијено на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву, извршена је рачунарска симулација слабљења нивоа буке друмског саобраћаја након постављања акустичке баријере. Вредности поља буке су обрађене у софтверском пакету MATLAB, и уз коришћењем подлога терена нацртаних у ACAD-у добијена је мапа буке. За различите висине баријере процењен је ниво буке на фасади школе која се простире паралелно са осом саобраћајнице.

На слици 5.24. је приказана мапа буке у хоризонталној равни висине 6 m са чворовима мреже 10x10 m за баријеру висине 6 m. Просечни ниво буке на фасади школе је 52 dB(A), израчунат за контролне тачке на сваких 10 m растојања дуж фасаде. Повећањем висине баријере на 7 m, ниво буке на фасади школе ће се смањити на потребних 50 dB(A), што представља дозвољену границу за другу акустичку зону. Због софтверске несавршености у сегменту цртања мапа буке на блиском растојању иза баријере, долази до непоклапања прорачунских вредности на контролним тачкама и вредности нивоа буке датих контурним дијаграмом. Ово је још један пример, где се потврђује да сва софтверска решења морају бити критички сагледана од стране експерата за поједине проблеме.



Слика 5.24. Мапа буке након постављања звучне баријере

У поређењу са средњом целодневном измереном вредношћу нивоа буке од 63 dB(A) у нивоу фасаде школе, на истом мерном месту према предвиђању софтвера за прорачун локалних мапа буке, након израде звучне баријере висине 7 m ниво буке ће износити 50 dB(A).

Процењено слабљење баријере износи 12 dB(A). При томе морају бити испуњени следећи услови:

- баријера се налази у непосредној близини пута,
- ширина баријере је довољно велика да се може занемарити утицај звука који заобилази баријеру са стране,
- баријера је направљена од материјала довољно велике изолационе моћи (изнад 20-25 dB) [151].

Апсорпционе звучне баријере су ефикасно средство за смањење нивоа буке у урбаним срединама а посебно треба истаћи чињеницу да применом оваквог типа баријера не долази до повишења нивоа буке са друге стране саобраћајнице.

ПОГЛАВЉЕ

6

ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

6.1. Дискусија остварених резултата

Вишекритеријумска оптимизација је ретко заступљена у научној литератури као метода за избор оптималног решења апсорпционих материјала и њихових смеша. Основни проблем је немогућност генерисања великог броја поузданих алтернатива на основу акустичких захтева. У циљу решавања наведеног проблема, у докторској дисертацији су развијени алгоритми за формирање стохастичких математичких модела и макроскопских емпиријских модела за одређивање коефицијента апсорпције порозних материјала. Предложена је и нова метода за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха, која даје знатно боље резултате од до сада познатих метода.

Користећи методу најмањих квадрата предложен је нов емпиријски модел за одређивање акустичких особина полиуретанских пена мале густине. У односу на најтачнији познати емпиријски модел Dunn & Davern за полиуретанске пене, применом новог модела остварено је смањење средње апсолутне и средње релативне грешке коефицијента звучне апсорпције за 48,3% и 35,4% респективно.

Применом методологије која је оформљена на примеру полиуретанских пена мале густине, формиран су модели за зрнасте материјале. Истраживани су узорци рециклиране гуме, рециклиране пластике и песка и све смеше њихових међусобних комбинација. Одступања коефицијента апсорпције добијена применом ново предложених модела у односу на мерења у импедансној цеви се крећу у границама од 2,13% до 3,84%, што је веома добро у поређењу са најчешће коришћеном граничном вредношћу од 10% из доступне научне литературе.

За исте апсорпционе материјале формиран су и стохастички модели. Израда ових модела је заснована на регресионој анализи. Стохастички модели су добијени као полиномске функције вишег степена и због тога су сложенији у односу на емпиријске моделе. Међутим, поузданост предвиђања ових модела је јако висока и износи око 99%.

Овако формиран емпиријски и стохастички модели омогућили су израду базе података и базе знања о апсорпционим својствима материјала. База је отворена и увек се може проширити са новим моделима и материјалима. Ново формиран математички модели представљају поуздану основу за генерисање алтернатива за избор звучно апсорпционих материјала и њихових смеша и као такви се могу користити у моделу одлучивања за решавање конкретних проблема заштите од буке, уместо скупих експерименталних испитивања.

За решење проблема избора материјала за заштиту од буке развијен је Модел одлучивања за избор материјала или смеше материјала за пасивну заштиту од буке који је у себи интегрисао: базе експерименталних знања о апсорпционим својствима материјала, систем емпиријских макроскопских модела, систем стохастичких модела, систем за одређивање неакустичких параметара материјала, систем за карактеризацију буке, интегрални систем за одређивање звучне апсорпције материјала и фамилије метода за вишекритеријумску анализу.

Верификација модела урађена је за студију случаја избора апсорпционог материјала за израду баријере за заштиту од саобраћајне буке ОШ „Димитрије Туцовић“ у Краљевоу.

Предложени модел је искоришћен за избор најповољнијег материјала ради заштите ученика и наставника и довођења нивоа буке у дозвољене границе. Разматран је скуп од 80 потенцијалних материјала који је у првој итерацији сведен на избор десет алтернатива, из скупа пенастих, влакнастих, зрнастих и вишеслојних комбинација зрнастих материјала, са највећим вредностима коефицијента апсорпције. Усвојен је скуп од 21-ог критеријума одлучивања са аспекта захтева које треба да задовољи звучна баријера чиме је добијена *матрица одлучивања* реда (21x10) у коју су уписане прорачунате или процењене вредности сваког разматраног критеријума за сваку од 10 алтернатива. За решење проблема рангирања расположивих алтернатива је коришћен софтвер MODIPROM који се заснива на модификацији фамилије метода PROMETHEE.

На основу спроведене свеобухватне вишекритеријумске анализе и анализе осетљивости одабран је материјал који обезбеђује смањење нивоа буке на фасади школе за 12 dB. На крају поглавља је дат и технички опис пројектоване баријере и дискусија резултата.

На основу добијених резултата може се закључити да добијени модел представља ефикасан алат за избор апсорпционих материјала за различите конкретне примере заштите од буке. Употребом развијеног модела за избор звучно апсорпционих материјала и њихових смеша омогућено је решавање сложених проблема заштите од буке, јер су у оквиру критеријума узете у обзир и карактеристике звучних извора, било да се ради о буци у животној или радној средини.

6.2. Закључак

Докторска дисертација је резултат вишегодишњег научно – истраживачког рада у актуелној области која се односи на испитивање акустичких својстава материјала и развоја модела одлучивања заснованог на вишекритеријумској оптимизацији у циљу избора звучно апсорпционих материјала и њихових смеша.

У оквиру дисертације анализирана су и систематизована научна и стручна достигнућа, публикована у релевантној литератури везаној за проблематику која је разматрана у дисертацији. Развијени су емпиријски макроскопски модели и стохастички математички модели за предикцију акустичких својстава звучно апсорпционих материјала и њихових смеша, што омогућава адекватно дефинисање акустичких критеријума у моделу одлучивања. Поред теоријских истраживања, реализована су веома обимна експериментална истраживања у циљу добијања података потребних за валидацију развијених акустичких модела.

На практичном примеру избора апсорпционог материјала за израду апсорпционе звучне баријера за заштиту од саобраћајне буке, може се закључити да развијени модел даје тачне резултате и представља ефикасан алат за избор најпогоднијег материјала за конкретне случајеве заштите од буке. Верификацијом развијеног модела основна хипотеза докторске дисертације:

„Могуће је развити Модел одлучивања, заснован на примени вишекритеријумске анализе за избор оптималне смеше звучно-апсорпционих материјала и њихових конструктивних параметара, у циљу заштите од буке, уз задовољење критеријума (функција циља) и

узимања у обзир карактера буке звучног извора израженог преко фреквенцијског спектра буке“, је потврђена.

Утицајни фактори на апсорпциона својства материјала идентификовани су на основу детаљног прегледа научне и стручне литературе. Формирани су емпиријски макроскопски модели и стохастички модели за предвиђање акустичких својстава порозних материјала. Тачност ових модела је проверена помоћу експерименталних резултата мерења. Основна предност коришћења модела у односу на експерименталне резултате мерења, поред ниже цене је могућност варијације параметара модела у циљу добијања жељених апсорпционих карактеристика. За одређивање коефицијента апсорпције порозних материјала који су приказани у студији случаја коришћене су вредности коефицијента звучне апсорпције које су добијене помоћу развијених модела и мерења применом стандардизованих метода. На овај начин **допунска хипотеза 1:**

„За различите врсте порозних апсорпционих материјала могуће је дефинисати функционалне зависности његових апсорпционих својстава од конструкционих параметара као што су: дебљина, редослед слојева код вишеслојних материјала, одстојање од подлоге и сл.“, је потврђена.

За зрнасте композитне материјале развијени су стохастички модели који омогућавају предвиђање коефицијента апсорпције смеше у зависности од процентуалног удела појединачних компонената. У студији случаја за избор алтернатива звучно апсорпционих материјала за израду баријера су коришћени материјали чији је коефицијент апсорпције одређен применом наведених модела чиме је **допунска хипотеза 2:**

„За вишекомпонентне зрнасте материјале као што су композитни материјали, могуће је дефинисати функционалну зависност апсорпционих својстава смеше од процентуалног удела појединачних компоненти“, потврђена.

6.3. Теоријске импликације

У оквиру ове дисертације је извршена систематизација постојећих знања и изведена критичка анализа релевантних научних резултата који се односе на област докторске дисертације. Током истраживања, дошло се до резултата који имају значај и у научном и у практичном смислу.

У научно-теоријском смислу остварен је низ значајних резултата који представљају нова знања у области акустичких карактеристика порозних материјала:

- истражена су акустичка својства различитих врста материјала као што су: полиуретанске пене мале густине, зрнасти и влакнасти материјали, као и смеше и вишеслојне комбинације зрнастих материјала са посебним акцентом на рециклиране отпадне материјале (рециклирана гума и рециклирана пластика),
- развијени су нови емпиријски модели за одређивање подужне отпорности струјању ваздуха, акустичке импедансе и коефицијента апсорпције за полиуретанске пене мале густине,

- испитана су апсорпциона својстава смеше више разнородних зрнастих материјала и добијене њихове функционалне зависности од процентуалног удела појединачних компоненти смеше,
- истражени су и систематизовани параметари који утичу на апсорпциона својства материјала и формирану стохастички и емпиријски аналитички модели зависности акустичких својстава испитиваних материјала од неакустичких параметара као што су: густина, дебљина материјала, параметара уградње и сл.,
- развијен је Модел одлучивања, заснован на примени вишекритеријумске анализе, помоћу којег је могуће, за сваки специфичан случај, на основу расположиве базе знања о појединачним материјалима, смешама материјала и вишеслојних комбинација материјала, одабрати алтернативу која ће најбоље задовољити критеријумске функције узимајући у обзир карактер буке звучног извора изражен преко фреквенцијског спектра,
- предложени модел одлучивања представља оригинални научни допринос који је по први пут реализован у овој области и представља ефикасан алат који доносиоцу одлуке омогућује оптималан избор из фонда расположивих акустичких материјала. Осим тога, модел је флексибилан и применљив за решење проблема заштите од различитих типова и карактера буке,
- извршена је верификација модела кроз студију случаја избора материјала за израду звучне баријере за заштиту од саобраћајне буке ОШ „Димитрије Туцовић“ у Краљевоу.

6.4. Практичне импликације

Практичне импликације истраживања су:

- остварен је једноставан и разумљив модел за избор оптималне комбинације параметара и звучно апсорпционих материјала за сваки конкретан случај у пракси,
- утврђена је могућност примене рециклираних материјала (гума, пластика и др.) за заштиту од буке, чиме се истовремено решавају проблеми отпада, уштеде енергије и заштите животне средине,
- с обзиром на јавну доступност дисертације и планирану дисеминацију резултата, окружење ће бити упознато са досадашњим резултатима истраживања и могућим варијантама за решење конкретних проблема заштите од буке урбаних средина,
- резултате истраживања је могуће применити у предузећима која се баве производњом и уградњом звучно-апсорпционих материјала што треба да доведе до повећања њихове конкурентности на тржишту.

6.5. Ограничења

Ограничења и недостаци истраживања који су резултат објективних околности се укратко могу сажети у следећем:

- немогућност испитивања акустичких особина материјала, у импедансној цеви у условима нормалне инциденције, у целом чујном фреквенцијском опсегу са расположивом опремом,
- немогућност валидације добијених резултата у дифузног звучном пољу у реверберационој комори,
- недостатак финансијских средстава за обезбеђење додатне опреме, и завршетак реверберационе коморе на Факултету за машинство и грађевинарство у Краљеву,
- ограничено време трајања истраживања,
- ограничен обим истраживања због скувих и дуготрајних експеримената који захтевају ангажовање великих материјалних и финансијских ресурса.

6.6. Будућа истраживања

Правци даљег истраживања у овој области ће бити усмерени на:

- испитивање нових врста материјала са акцентом на примену рециклираних материјала и проширење базе података о материјалима и базе знања о акустичким и другим својствима материјала,
- истраживање могућности за добијање вештачких материјала са различитим моделима микроструктуре формиране адитивним технологијама израде на 3D принтерима,
- испитивање механичких и других карактеристика материјала које су битне за процес одлучивања при избору материјала,
- испитивање утицаја конструкционих параметара и параметара уградње на акустичка својства материјала ради обезбеђења предуслова за пројектовање апсорбера буке,
- проширити испитивање коефицијента апсорпције материјала на цео динамички опсег чујности,
- проверити ефикасност уграђених апсорпционих материјала на већ изведеним решењима пасивне заштите од буке,
- развити методе за испитивање и квантификацију атрибутивних критеријума као што су: отпорност на удар, отпорност на пожар, токсичност материјала, оцена еколошких фактора, оцена технологичности производње, методологија прорачуна трошкова, и сл.,
- развити експертни систем за подршку одлучивању при избору апсорпционих материјала заснован на предложеном моделу,

- наставити са експерименталним и теоријским истраживањима и развити математичке моделе који описују акустичке особине материјала на основу микроструктурних параметара материјала.

Литература

- [1] **Praščević M., Cvetković D., Mihailov D.**, *NAISS model za proračun nivoa emisije buke drumskog saobraćaja u urbanim sredinama*, Odluka br.03-60/4 od 18.01.2013. NNV Fakulteta zaštite na radu u Nišu, Univerzitet Niš, Niš, 2013, 23 p.
- [2] **Sagartzazu X., Hervella-Nieto L., Pagalday J.M.**, *Review in Sound Absorbing Materials*, Arch. Comput. Methods Eng., 2008, Vol. 15, № 3, p. 311–342, DOI:10.1007/s11831-008-9022-1
- [3] **Paje S.E., Bueno M., Terán F., Miró R., Pérez-Jiménez F., Martínez A.H.**, *Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2010, Vol. 71, № 6, p. 578–582, DOI:10.1016/j.apacoust.2009.12.003
- [4] **Younesian D., Hamzavi S., Rostam M.R.**, *Active Noise Control in Pardis Coach using Different Fuzzy Controllers*, Int. J. Automot. Eng., 2014, Vol. 4, № 4, p. 834–845
- [5] **Praščević M., Cvetković D.**, *Buka u životnoj sredini*, Fakultet zaštite na radu u Nišu, Niš, 2005
- [6] **Kurtović H.**, *Proračunavanje koeficijenta apsorpcije zvuka poroznog materijala*, 15. Telekomun. forum TELFOR, 2007, p. 761–770
- [7] **Kurtović H.**, *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd, 1990
- [8] **Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S.**, *Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs*, J. Acoust. Soc. Am., 2008, Vol. 123, p. 3037, DOI:10.1121/1.2932706
- [9] **Ayub M., Nor M.J.M., Amin N., Zulkifli R., Fouladi M.H., Ismail A.R.**, *ANALYSIS ON SOUND ABSORPTION OF NATURAL COIR FIBER USING DELANY-BAZLEY MODEL*, Int. Conf. Mech. Eng., Dhaka, 2009, p. AM – 02
- [10] **Navacerrada M.A., Díaz C., Fernández P.**, *Characterization of a Material Based on Short Natural Fique Fibers*, BioResources, 2014, Vol. 9, № 2, p. 3480–3496
- [11] **AL-Rahman A.L., Raja R.I., Rahman R.A.**, *Experimental Study on Natural Fibres for Green Acoustic Absorption Materials*, Am. J. Appl. Sci., 2013, Vol. 10, № 10, p. 1307–1314, DOI:10.3844/ajassp.2013.1307.1314
- [12] **Wang C.-N., Torng J.-H.**, *Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials*, Appl. Acoust., 2001, Vol. 62, № 4, p. 447–459, DOI:10.1016/S0003-682X(00)00043-8
- [13] **Eaves D.**, *Handbook of Polymer Foams*, Rapra Technology Limited, Shawbury, 2004, 289 p.
- [14] **Yamashita T., Suzuki K., Adachi H., Nishino S., Tomota Y.**, *Effect of Microscopic Internal Structure on Sound Absorption Properties of Polyurethane Foam by X-ray Computed Tomography Observations*, Mater. Trans., 2009, Vol. 50, № 2, p. 373–380, DOI:10.2320/matertrans.MRA2008207
- [15] **Joshi M.P., Shravage P., Jain S.K., Karanth N. V.**, *A Comparative Study on Flow Resistivity for Different Polyurethane Foam Samples*, J. Acoust. Soc. India, 2011, Vol. 38, № 4, p. 153–157

- [16] **Jin W., Liu J., Wang Z., Wang Y., Cao Z., Liu Y., Zhu X.**, *Sound Absorption Characteristics of Aluminum Foams Treated by Plasma Electrolytic Oxidation*, Materials (Basel)., 2015, Vol. 8, № 11, p. 7511–7518, DOI:10.3390/ma8115395
- [17] **Kino N., Nakano G., Suzuki Y.**, *Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2012, Vol. 73, № 2, p. 95–108, DOI:10.1016/j.apacoust.2011.06.009
- [18] **Pompoli F., Bonfiglio P.**, *Acoustical properties of polyurethane open cells materials: Experimental investigation and theoretical models*, 14th Int. Congr. Sound Vib. - ICSV14, Cairns, 2007
- [19] **Vuković J., Pergal M., Jovanović S., Vodnik V.**, *Umreženi poliuretani na bazi hiperrazgranatih polimera*, Hem. Ind., 2008, Vol. 62, № 6, p. 353–359, DOI:10.2298/HEMIND0806353V
- [20] **Lauriks W., Cops A., Verhaegen C.**, *Acoustical properties of elastic porous materials*, J. Sound Vib., 1989, Vol. 131, № 1, p. 143–156, DOI:10.1016/0022-460X(89)90829-8
- [21] **Ghaffari Mosanenzadeh S., Doutres O., Naguib H.E., Park C.B., Atalla N.**, *A numerical scheme for investigating the effect of bimodal structure on acoustic behavior of polylactide foams*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2015, Vol. 88, p. 75–83, DOI:10.1016/j.apacoust.2014.08.011
- [22] **Pfretzschner J.**, *Rubber crumb as granular absorptive acoustic material*, Forum Acusticum Sevilla 2002, 2002, p. 1–6
- [23] **Swift M.J., Bris P., Horoshenkov K. V.**, *Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate*, Appl. Acoust., 1999, Vol. 57, № 3, p. 203–212, DOI:10.1016/S0003-682X(98)00061-9
- [24] **Hong Z., Bo L., Guangsu H., Jia H.**, *A novel composite sound absorber with recycled rubber particles*, J. Sound Vib., 2007, Vol. 304, № 1-2, p. 400–406, DOI:10.1016/j.jsv.2007.02.024
- [25] **Horoshenkov K. V., Swift M.J.**, *The effect of consolidation on the acoustic properties of loose rubber granulates*, Appl. Acoust., 2001, Vol. 62, № 6, p. 665–690, DOI:10.1016/S0003-682X(00)00069-4
- [26] **Han Z., Chunsheng L., Kombe T., Thong-On N.**, *Crumb rubber blends in noise absorption study*, Mater. Struct., 2008, Vol. 41, № 2, p. 383–390, DOI:10.1617/s11527-007-9252-y
- [27] **Radičević B., Ristanović I.**, *Koeficijent apsorpcije materijala od recikliranog gumenog otpada*, 58. ETRAN, Vrnjačka Banja, 2014, p. AK3.6.1–6
- [28] **Stanojević D., Rajković M., Tošković D.**, *Management of used tires, accomplishments in the world, and situation in Serbia*, Hem. Ind., 2011, Vol. 65, № 6, p. 727–738, DOI:10.2298/HEMIND110729061S
- [29] **Chettah A., Chedly S., Ichchou M.**, *Acoustic absorption of granular multilayers made from tire rubber*, Int. Congr. Sound Vib., Krakow, Poland, 2009, p. 1527–1535
- [30] **Arenas J.P., Crocker M.J.**, *Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials*, Sound Vib., 2010, Vol. 44, № 7, p. 12–17
- [31] **Carlson D.D., Zhu H.**, *A SPRAY BASED CRUMB RUBBER TECHNOLOGY IN HIGHWAY NOISE REDUCTION APPLICATION*, 1999, p. 1–12

- [32] **Mijić M., Bojović P.**, *Akustička svojstva apsorbera od mekih poliuretanskih pena*, Sedmo Jugosl. Savetov. " Zaštita od buke i Vib. u životnoj i Radn. Sred., Beograd, 1985, p. 49–53
- [33] **Ristanović I., Mijić M.**, *Jedna realizacija sistema za merenje koeficijenta apsorpcije sa impedansnom cevi*, 58. ETRAN, Vrnjačka Banja, 2014, p. AK3.5.1–6
- [34] **Garai M., Pompoli F.**, *A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications*, Appl. Acoust., 2005, Vol. 66, № 12, p. 1383–1398, DOI:10.1016/j.apacoust.2005.04.008
- [35] **Maderuelo-Sanz R., Martín-Castizo M., Vilchez-Gómez R.**, *The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction*, Appl. Acoust., 2011, Vol. 72, № 11, p. 823–828, DOI:10.1016/j.apacoust.2011.05.004
- [36] **Sobral M., Samagaio A.J.B., Ferreira J.M.F., Labrincha J.A.**, *Mechanical and acoustical characteristics of bound rubber granulate*, J. Mater. Process. Technol., 2003, Vol. 142, № 2, p. 427–433, DOI:10.1016/S0924-0136(03)00623-X
- [37] **Pispola G., Horoshenkov K. V.**, *Consolidated Granular Media for Sound Insulation: Performance Evaluation Through Different Methods*, Design, p. 1–8
- [38] **Gheorghe A., Borlea (Tiuc) A.**, *EVALUATION OF ABSORBING PERFORMANCE FOR COMPOSITE PLATES MADE FROM RECYCLED WASTE*, SISOM 2012, Bucharest, 2012, p. 307–313
- [39] **Zainulabidin M.H., Abdul Rani M.H., Nezere N., Mohd Tobi A.L.**, *Optimum Sound Absorption by Materials Fraction Combination*, Int. J. Mech. Mechatronics Eng., 2014, Vol. 14, № 02, p. 118–121
- [40] **Hasan N., Hashim S.F.S., Ariff Z.M.**, *Low-Frequency Sound Proof Cement-Based Syntactic Foam*, Int. J. Mater. Mech. Manuf., 2013, Vol. 1, № 4, p. 384–387, DOI:10.7763/IJMMM.2013.V1.83
- [41] **Theophilus E.O., Febresima R.C., Mbaka K.V.**, *Analysis of sound absorbing properties of different density local acoustic materials*, Int. J. Educ. Res. Rev., 2015, Vol. 3, № 4, p. 180–182
- [42] **Mahzan S., Ahmad Zaidi A.M., Ghazali M.I., Yahya M.N., Ismail M.**, *Investigation on Sound Absorption of Rice-Husk Reinforced Composite*, Proc. MUCEET2009, 2009, p. 19–22
- [43] **Soleimani H., Kord B., Pourpasha M.M., Pourabbasi S.**, *The Relationship Between Plastic Virginity and Engineering Properties of Wood Plastic Composites*, World Appl. Sci. J., 2012, Vol. 19, № 3, p. 395–398, DOI:10.5829/idosi.wasj.2012.19.03.1973
- [44] **Perná I., Hanzlíček T., Straka P., Steinerová M.**, *Acoustic absorption of geopolymer/sand mixture*, Ceram. - Silikáty, 2009, Vol. 53, № 1, p. 48–51
- [45] **Mahzan S., Ahmad Zaidi A.M., Arsat N., Hatta M.N.M., Ghazali M.I., Rasool Mohideen S.**, *Study on Sound Absorption Properties of Coconut Coir Fibre Reinforced Composite with Added Recycled Rubber*, Int. J. Integr. Eng., 2009, № Mechanical, Materials and Manufacturing, p. 1–6
- [46] **Gayathri R., Vasanthakumari R., Padmanabhan C.**, *Sound absorption, thermal and mechanical behavior of polyurethane foam modified with nano silica, nano clay and crumb rubber fillers*, Int. J. Sci. Eng. Res., 2013, Vol. 4, № 5, p. 301–308

- [47] **Ramesh Kumar M., Alagisamy P.S., Sakthivel M., Mahalingam A., Rao B.V.A.**, *A Review of Building Acoustic Materials*, Acoust. 2013 New Delhi, 2013, p. 107–112
- [48] **Yilmazer S., Ozdeniz M.B.**, *The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates*, Build. Environ., 2005, Vol. 40, № 3, p. 311–318, DOI:10.1016/j.buildenv.2004.07.004
- [49] **Seybert A.F., Ross D.F.**, *Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique*, J. Acoust. Soc. Am., 1977, Vol. 61, № 5, p. 1362, DOI:10.1121/1.381403
- [50] **Chung J.Y., Blaser D.A.**, *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory*, J. Acoust. Soc. Am., 1980, Vol. 68, № 3
- [51] **Kolarević M., Radičević B., Grković V., Petrović Z.**, *A Realization of the System for Measuring Airflow Resistance*, FACTA Univ. Work. Living Environ. Prot., 2015, Vol. 12, № 1, p. 83–94
- [52] *No Title*; [Electronic resource], URL: <http://www.satiamericas.com> (accessed: 20.04.2008)
- [53] **Jones P.W.**, *Prediction of the acoustic performance of small poroelastic foam filled mufflers: A case study*, Acoust. Aust., 2010, Vol. 38, № 2, p. 69–75
- [54] **Tomczyk P., Niemas M.**, *Repeatability and Reproduceability Tests of Airflow Resistance Results Obtained on ITB Measurement Stand*, Forum Acusticum Sevilla 2002, 2002
- [55] **Zuckerwar A.J.**, *Airflow resistivity instrument for in situ measurement on the earth's ground surface*, Rev. Sci. Instrum., 1983, Vol. 54, № 5, p. 597, DOI:10.1063/1.1137419
- [56] **Schiavi A., Guglielmo C., Miglietta P.**, *Effect and importance of static-load on airflow resistivity determination and its consequences on dynamic stiffness*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2011, Vol. 72, № 9, p. 705–710, DOI:10.1016/j.apacoust.2011.03.009
- [57] **10534-1:2001 E.I.**, *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio*
- [58] **Petrović Z., Vukićević M., Radičević B., Bjelić M., Petrović A., Todosijević S.**, *Reverberaciona komora*, Odluka br.108/1 od 30.01.2013. NNV Fakulteta za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2013, 17 p.
- [59] **BS EN ISO 266:1997**, *Acoustics - Preferred frequencies*
- [60] **BS EN ISO 354:2003**, *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*
- [61] **BS EN ISO 3382-1:2009**, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces*
- [62] **EN ISO 3382-2:2008**, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*
- [63] **Randall K.E., Smith M.K.E.**, *Acoustic Scaling: A One-eighth Scale Model Reverberation Room*, Research Department, Engineering Division, BBC, 1971, 7 p.
- [64] **Adnađević M.**, *Merenje koeficijenta apsorpcije materijala u fizičkom modelu reverberacione komore*, 17. Telekomun. forum TELFOR, Beograd, 2009, p. 1411–1414

- [65] **Dragonetti R., Ianniello C., Romano R.A.**, *Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method*, J. Acoust. Soc. Am., Acoustical Society of America, 2011, Vol. 129, № 2, p. 753–764, DOI:10.1121/1.3523433
- [66] **Garai M., Pompoli F.**, *An Intercomparison of Laboratory Measurements of Flow Resistance*, Int. Congr. Acoust., Rome, 2001, p. 4_05
- [67] **Ingard K.U., Dear T.A.**, *Measurement of acoustic flow resistance*, J. Sound Vib., 1985, Vol. 103, № 4, p. 567–572, DOI:10.1016/S0022-460X(85)80024-9
- [68] **Bies D.A., Hansen C.H.**, *Flow Resistance Information for Acoustical Design*, Appl. Acoust., 1980, Vol. 13, № 5, p. 357–391, DOI:10.1016/0003-682X(80)90002-X
- [69] **Kino N., Ueno T.**, *Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity*, Appl. Acoust., 2008, Vol. 69, № 4, p. 325–331, DOI:10.1016/j.apacoust.2006.11.008
- [70] **Tarnow V.**, *Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials*, J. Acoust. Soc. Am., Acoustical Society of America, 1996, Vol. 100, № 6, p. 3706–3713, DOI:10.1121/1.417233
- [71] **Narang P.P.**, *Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption*, Appl. Acoust., 1995, Vol. 45, № 4, p. 335–358, DOI:10.1016/0003-682X(95)00007-V
- [72] **Ballagh K.O.**, *Acoustical properties of wool*, Appl. Acoust., 1996, Vol. 48, № 2, p. 101–120, DOI:10.1016/0003-682X(95)00042-8
- [73] **Yang Y., Chen Z.**, *A model for calculating the air flow resistivity of glass fiber felt*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2015, Vol. 91, p. 6–11, DOI:10.1016/j.apacoust.2014.11.006
- [74] **Alba J. et al.**, *An Inverse Method to Obtain Porosity, Fibre Diameter and Density of Fibrous Sound Absorbing Materials*, Arch. Acoust., 2011, Vol. 36, № 3, p. 561–574, DOI:10.2478/v10168-011-0040-x
- [75] **Mills N.J.**, *The wet Kelvin model for air flow through open-cell polyurethane foams*, J. Mater. Sci., 2005, Vol. 40, № 22, p. 5845–5851, DOI:10.1007/s10853-005-5018-5
- [76] **Mirowska M., Czyżewski K.**, *Estimation of Sound Absorption Coefficients of Porous Materials*, Int. Congr. Sound Vib., Cairns, 2007, p. 1–7
- [77] **Morse P.M., Ingard K.U.**, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, Inc., McGraw-Hill, Inc., 1968, 950 p., DOI:10.1119/1.1976432
- [78] **Hamet J.F.**, *MODELISATION ACOUSTIQUE D'UN ENROBE DRAINANT : PRISE EN COMPTE DES PHENOMENES DE THERMOCONDUCTIVITE DANS UNE NOUVELLE FORMULATION PHENOMENOLOGIQUE*, Rapp. INRETS, 1992, № 159, 66 p.
- [79] **Biot M.A.**, *Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range*, J. Acoust. Soc. Am., 1956, Vol. 28, № 2, p. 168–178
- [80] **Lambert R.F.**, *The acoustical structure of highly porous open-cell foams*, J. Acoust. Soc. Am., 1982, Vol. 72, № 3, p. 879, DOI:10.1121/1.388167
- [81] **Zwikker C., Kosten C.W.**, *Sound Absorbing Materials*, Elsevier Publishing Company, 1949, 174 p.

- [82] **Attenborough K.**, *Acoustical Characteristics of Porous Materials*, Phys. Rep., 1982, Vol. 82, № 3, p. 179–227, DOI:10.1016/0370-1573(82)90131-4
- [83] **Attenborough K.**, *Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials*, J. Acoust. Soc. Am., 1983, Vol. 73, № 3, DOI:10.1121/1.389045
- [84] **Allard J.F., Depollier C., Nicolas J., Lauriks W., Cops A.**, *Acoustical properties of air-saturated porous materials and the theory of Biot*, J. Acoust. Soc. Am., 1990, Vol. 3, p. 2938
- [85] **Allard J.F., Atalla N.**, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*, A John Wiley Sons, Ltd, Second edi, A John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2009, 372 p., DOI:10.1017/CBO9781107415324.004
- [86] **Champoux Y., Stinson M.R.**, *On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors*, J. Acoust. Soc. Am., 1992, Vol. 92, № 2, p. 1120, DOI:10.1121/1.405281
- [87] **Wilson D.K.**, *Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure*, J. Acoust. Soc. Am., 1993, Vol. 94, № 2, p. 1136
- [88] **Delany M.E., Bazley E.N.**, *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*, Appl. Acoust., 1970, Vol. 3, № 2, p. 105–116, DOI:10.1016/0003-682X(70)90031-9
- [89] **Dunn I.P., Davern W.A.**, *Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers*, Appl. Acoust., 1986, Vol. 19, № 5, p. 321–334, DOI:10.1016/0003-682X(86)90044-7
- [90] **Qunli W.**, *Empirical Relations Between Acoustical Properties and Flow Resistivity of Porous Plastic Open-cell Foam*, Appl. Acoust., 1988, Vol. 25, № 3, p. 141–148, DOI:10.1016/0003-682X(88)90090-4
- [91] **Voronina N.**, *Acoustic properties of fibrous materials*, Appl. Acoust., 1994, Vol. 42, № 2, p. 165–174, DOI:10.1016/0003-682X(94)90005-1
- [92] **Voronina N.**, *Improved Empirical Model of Sound Propagation Through a Fibrous Material*, Appl. Acoust., 1996, Vol. 48, № 2, p. 121–132
- [93] **Gardner G.C., O’Leary M.E., Hansen S., Sun J.Q.**, *Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams*, Appl. Acoust., 2003, Vol. 64, № 2, p. 229–242, DOI:10.1016/S0003-682X(02)00089-0
- [94] **Miki Y.**, *Acoustical properties of porous materials: Modifications of Delany-Bazley models*, J. Acoust. Soc. Japan, 1990, Vol. 11, № 1, p. 19–24, DOI:10.1250/ast.11.19
- [95] **Mechel F.P.**, *Design charts for sound absorber layers*, J. Acoust. Soc. Am., Acoustical Society of America, 1988, Vol. 83, № 3, p. 1002, DOI:10.1121/1.396045
- [96] **Oliva D., Hongisto V.**, *Sound absorption of porous materials - Accuracy of prediction methods*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2013, Vol. 74, № 12, p. 1473–1479, DOI:10.1016/j.apacoust.2013.06.004
- [97] **Doutres O., Atalla N., Dong K.**, *Effect of the microstructure closed pore content on the acoustic behavior of polyurethane foams*, J. Appl. Phys., AIP Publishing, 2011, Vol. 110, № 6, p. 064901, DOI:10.1063/1.3631021

- [98] **Doutres O., Atalla N., Dong K.**, *A semi-phenomenological model to predict the acoustic behavior of fully and partially reticulated polyurethane foams*, J. Appl. Phys., AIP Publishing, 2013, Vol. 113, № 5, p. 054901, DOI:10.1063/1.4789595
- [99] **Komatsu T.**, *Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials*, Acoust. Sci. Technol., 2008, Vol. 29, № 2, p. 121–129, DOI:10.1250/ast.29.121
- [100] **Fernández J.A., Soriano J.R., Silla E.E., Sanchis E.J.**, *EMPIRICAL EQUATIONS FOR SOUND PROPAGATION FOR DIFFERENT ABSORBENTS*, Thirteen. Int. Congr. sound Vib., Vienna, Austria, 2006, p. 1–8
- [101] **Jones P.W., Kessissoglou N.J.**, *Simplification of the Delany-Bazley approach for modelling the acoustic properties of a poroelastic foam*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2015, Vol. 88, p. 146–152, DOI:10.1016/j.apacoust.2014.08.013
- [102] **Maderuelo-Sanz R., Morillas J.M.B., Martín-Castizo M., Escobar V.G., Gozalo G.R.**, *Acoustical performance of porous absorber made from recycled rubber and polyurethane resin*, Lat. Am. J. Solids Struct., 2013, Vol. 10, № 3, p. 585–600
- [103] **Radičević B., Ristanović I., Kolarević M.**, *Predviđanje akustičkih osobina materijala od reciklirane gume*, 59. ETRAN, Srebrno jezero, 2015, p. AK2_7
- [104] **Biot M.A.**, *Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media*, J. Appl. Phys., 1962, Vol. 33, № 4, p. 1482–1498, DOI:10.1063/1.1728759
- [105] **Allard J.F., Champoux Y.**, *New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials*, J. Acoust. Soc. Am., 1992, Vol. 91, № 6, p. 3346–3353, DOI:10.1121/1.402824
- [106] **Garg N., Kumar A., Maji S.**, *Parametric Sensitivity Analysis of Factors Affecting Sound Transmission Loss of Multi-Layered Building Elements Using Taguchi Method*, Arch. Acoust., 2014, Vol. 39, № 2, p. 165–176, DOI:10.2478/aoa-2014-0020
- [107] **Liu J., Bao W., Shi L., Zuo B., Gao W.**, *General regression neural network for prediction of sound absorption coefficients of sandwich structure nonwoven absorbers*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2014, Vol. 76, p. 128–137, DOI:10.1016/j.apacoust.2013.07.026
- [108] **Guan D., Wu J.H., Wu J., Li J., Zhao W.**, *Acoustic performance of aluminum foams with semiopen cells*, Appl. Acoust., Elsevier Ltd, 2015, Vol. 87, p. 103–108, DOI:10.1016/j.apacoust.2014.06.016
- [109] **Wang X., Eisenbrey J., Zeitz M., Sun J.Q.**, *Multi-stage regression analysis of acoustical properties of polyurethane foams*, J. Sound Vib., 2004, Vol. 273, № 4-5, p. 1109–1117, DOI:10.1016/j.jsv.2003.09.039
- [110] **EN ISO 10534-2:2001**, *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer - function method*
- [111] **Stat-Ease**, *Getting Started with Version 9 of Design-Expert® Software: Software, Training & Consulting: Statistics Made Easy*, Stat-Ease, Inc., 2014, p. 12
- [112] **Stat-Ease**, *Handbook for Experimenters: A concise collection of handy tips to help you set up and analyze your designed experiments*, Version 10, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, 2016, 73 p.
- [113] **Šošić I.**, *Primijenjena statistika*, Školska knjiga, Zagreb, 2004, 781 p.

- [114] **Kolarević M., Vukićević M., Radičević B., Bjelić M., Grković V.**, *A methodology for forming the regression model of ternary system*, 7th Int. Conf. Heavy Mach., Vrnjačka Banja, 2011, p. E.1 – E.6
- [115] *Vapeks d.o.o.*; [Electronic resource], 2015, URL: <http://www.vapeks.rs/en> (accessed: 04.02.2016)
- [116] **ISO 9053:1991**, *Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance*
- [117] **ASTM C522-03(2009)e1**, *Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [118] **Yan X., Su X.G.**, *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 2009
- [119] **EN 12354-6:2003**, *Bilding Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 6: Sound absorption in enclosed spaces*
- [120] **Kolarević M., Radičević B., Grković V.**, *Akustička svojstva višeslojnih zrnastih recikliranih materijala. Elaborat 3 - Projekat TR 37020 UrbaNoise*, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Serbia, 2016, p. 119
- [121] **Kolarević M., Radičević B., Grković V.**, *Akustička svojstva vlaknastih materijala. Elaborat 4 - Projekat TR 37020 UrbaNoise*, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Serbia, 2016, p. 144
- [122] **Milanović D., Misita M.**, *Informacioni sistemi podrške upravljanju i odlučivanju*, Mašinski fakultet, Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2008, 205 p.
- [123] **Kotzen B., English C.**, *Environmental Noise Barriers: A guide to their acoustic and visual design*, Taylor Fr., 2nd editio, Taylor & Francis, 2009, DOI:10.1017/CBO9781107415324.004
- [124] **Fleming G.G., Knauer H.S., Lee C.S.Y., Pedersen S.**, *Noise Barrier Design handbook*, US Department of Transportation- Federal Highway Administration,
- [125] **Nikolić I., Borović S.**, *Višekriterijumska optimizacija: metode, primena u logistici, softver*, Centar vojnih škola Vojske Jugoslavije, Beograd, 1996
- [126] **Kolarević M., Vukićević M., Nešović J.**, *Izbor optimalnog oblika nosećeg stuba regalskog skladišta primenom višekriterijumske analize*, IMK-14 - Res. Dev. Heavy Mach., 2005, Vol. 20-21, № 1-2, p. 7–20
- [127] **Kolarević M.**, *Brzi razvoj proizvoda*, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2004
- [128] **Marković G., Gašić M., Kolarević M., Savković M., Marinković Z.**, *Application of the MODIPROM method to the final solution of logistics centre location*, Transport, 2013, Vol. 28, № 4, p. 341–351, DOI:10.3846/16484142.2013.864328
- [129] **Lakušić S., Dragčević V., Rukavina T.**, *Pregled evropske regulative o buci od cestovnog prometa*, Gradjevinar, 2003, Vol. 55, № 6, p. 349–356

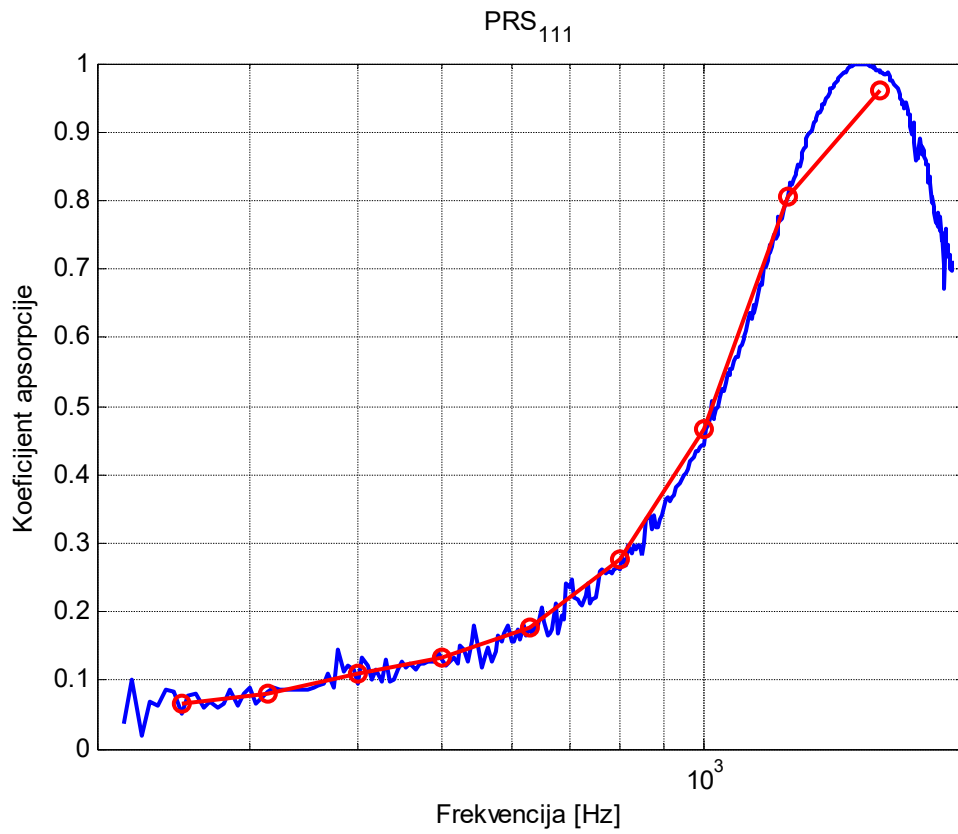
- [130] **European Parliament and Council of the European Union**, *DIRECTIVE 2002/49/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise*, Off. J. Eur. Communities, 2002, № L189, p. 12–25
- [131] **Šoškić Z., Petrović Z., Radičević B., Bogojević N.**, *Softver za proračun lokalnih mapa buke*, Odluka br.108/4 od 30.01.2013. NNV Fakulteta za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2013
- [132] **Dragčević V., Ahac S.**, *Prilog optimizaciji projektiranja zaštite od buke cestovnog prometa*, Promet. Nove Tehnol. i Mater., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010, p. 177–215
- [133] **Praščević M., Cvetković D., Mihajlov D., Petrović Z., Radičević B.**, *Verification of NAISS model for road traffic noise prediction in urban areas*, Elektron. ir Elektrotehnika, 2013, Vol. 19, № 6, p. 91–94, DOI:10.5755/j01.eee.19.6.1294
- [134] **Petrović Z., Radičević B., Petrović Z., Zdravković N.**, *Design of Noise Protection in Urban Areas-Case Study of an Elementary School*, 23rd Natl. Conf. 4th Int. Conf. Noise Vib., 2012, p. 77–81
- [135] **Momir P., Dragan C., Darko M.**, *Industrial noise modeling and mapping: The case of a cement factory*, Facta Univ. - Ser. Work. Living Enviromental Prot., Vol. 5, № 1, p. 11–23
- [136] **Todorović D.**, *Iskustvo u primeni softvera za modelovanje buke*, 17. Telekomun. forum TELFOR, Beograd, 2009, p. 1061–1064
- [137] **BS EN 1793-3:1998**, *Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum*
- [138] **BS EN 1793-1:2012**, *Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance. Part 1: Intrinsic characteristics of sound absorption*
- [139] **Mašović D.B.**, *Unapređenje metoda za proračun zvučne izolacije u zgradama*, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2015, 182 p.
- [140] **Petrović Z., Radičević B., Šoškić Z., Praščević M.**, *Noise Protected Buildings*, 7th Int. Conf. Heavy Mach., 2011, p. F.81 – F.86
- [141] **Kolarević M., Šoškić Z., Petrović Z., Radičević B.**, *Noise Protection In Urban Environment – Description of A Project*, Mech. Transp. Commun., 2011, № 3, p. IV – 69–78
- [142] **Pljakić M., Radičević B., Tomić J., Petrović Z.**, *Analysis of Systematic Measurements of Noise in Cities*, 23rd Natl. Conf. 4th Int. Conf. Noise Vib., 2012, p. 59–62
- [143] **Radičević B., Petrović Z., Todosijević S., Petrović Z.**, *Design of Noise Protection of Industrial Plants-Case Study of a Plywood Factory*, 23rd Natl. Conf. 4th Int. Conf. Noise Vib., 2012, p. 71–75
- [144] **Herisanu N., Radičević B., Petrović Z., Grković V.**, *Sound insulation of plywood transporter*, 35th Int. Conf. Prod. Eng., Kraljevo, Serbia, 2013, № September, p. 175–178
- [145] **Topalov I., Radičević B., Tatić B., Šoškić Z.**, *NOISE MAPPING IN AREA OF AN URBAN OVERPASS*, 35th Int. Conf. Prod. Eng., Kraljevo, Serbia, 2013, № September, p. 183–188

- [146] **Radičević B., Kolarević M., Bjelić M., Grković V., Šoškić Z.**, *Noise Protection of an Automobile Scrapyard with Car Crushers – A Case Study*, Appl. Mech. Mater., 2015, Vol. 801, p. 71–76, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.801.71
- [147] **Tomić J., Todosijević S., Radičević B., Šoškić Z.**, *Calculation of Noise Field in an Urban Area close to a Traffic Overpass-Case Study*, Appl. Mech. Mater., Trans Tech Publications, 2015, Vol. 801, p. 60–65, DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.801.60
- [148] **Petrović Z., Radičević B., Bjelić M.**, *Designing Main Fan Noise Protection System in Mine "Jarando*, Podzemn. Rad., 2006, Vol. 15, p. 133–138
- [149] **Petrović Z., Pljakić M., Radičević B., Bjelić M.**, *Design of Noise Protection of Industrial Plants*, IMK-14 - Res. Dev. Heavy Mach., 2013, Vol. 19, № 4, p. EN121–EN126
- [150] **Petrović Z., Radičević B., Kolarević M., Grković V.**, *SOUND INSULATION OF A MECHANICAL WORKSHOP*, Saf. Eng., 2014, Vol. 4, № 2, p. 95–101, DOI:10.7562/SE2014.4.02.07
- [151] **Mašović D. B., Adnađević M.**, *ANALIZA MOGUĆNOSTI SMANJENJA BUKE SA SPLAVOVA NA SAVI POSTAVLJANJEM AKUSTIČKE BARIJERE*, Međunarodni naučno-stručni Simp. INFOTEH, Jahorina, 2011, Vol. 10, № March, p. 1011–1015

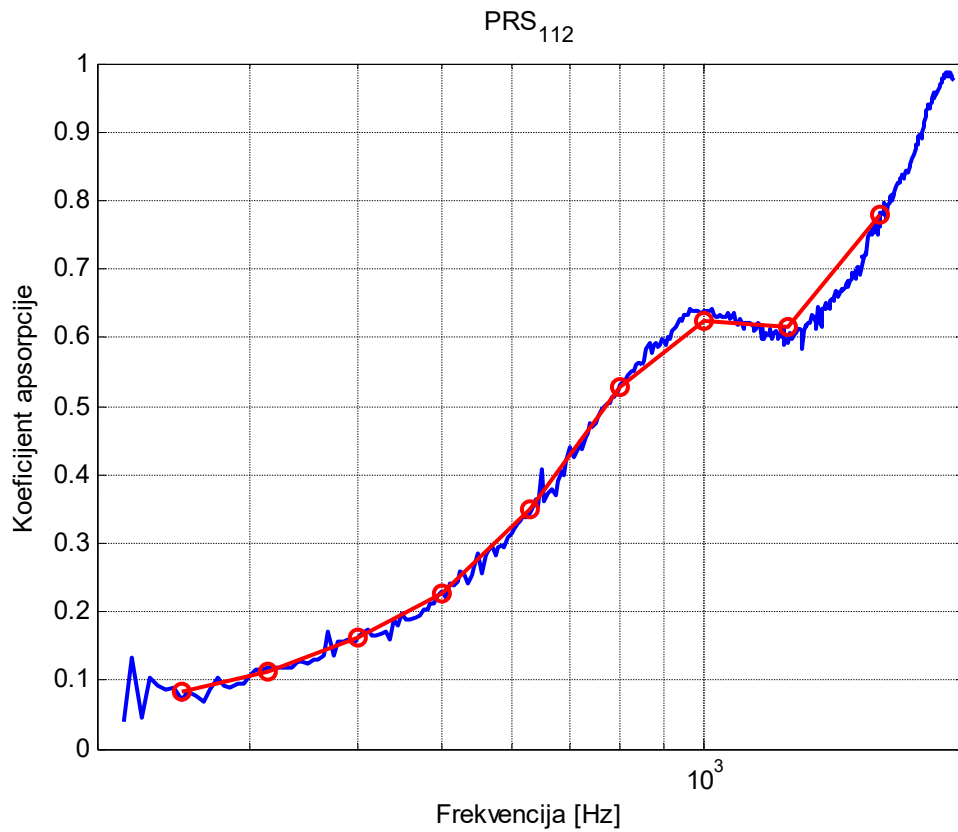
ПРИЛОГ 1

РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА АПСОРПЦИОНИХ СВОЈСТАВА КОМБИНАЦИЈЕ ВИШЕСЛОЈНИХ МАТЕРИЈАЛА

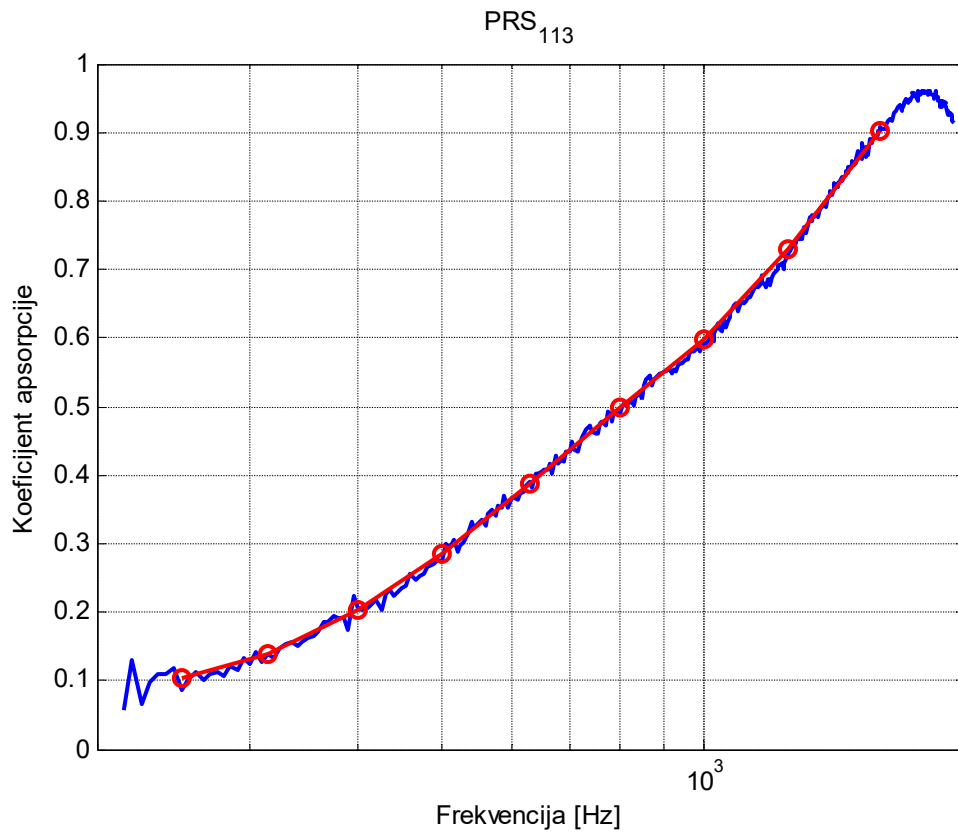
КОМБИНАЦИЈА PRS



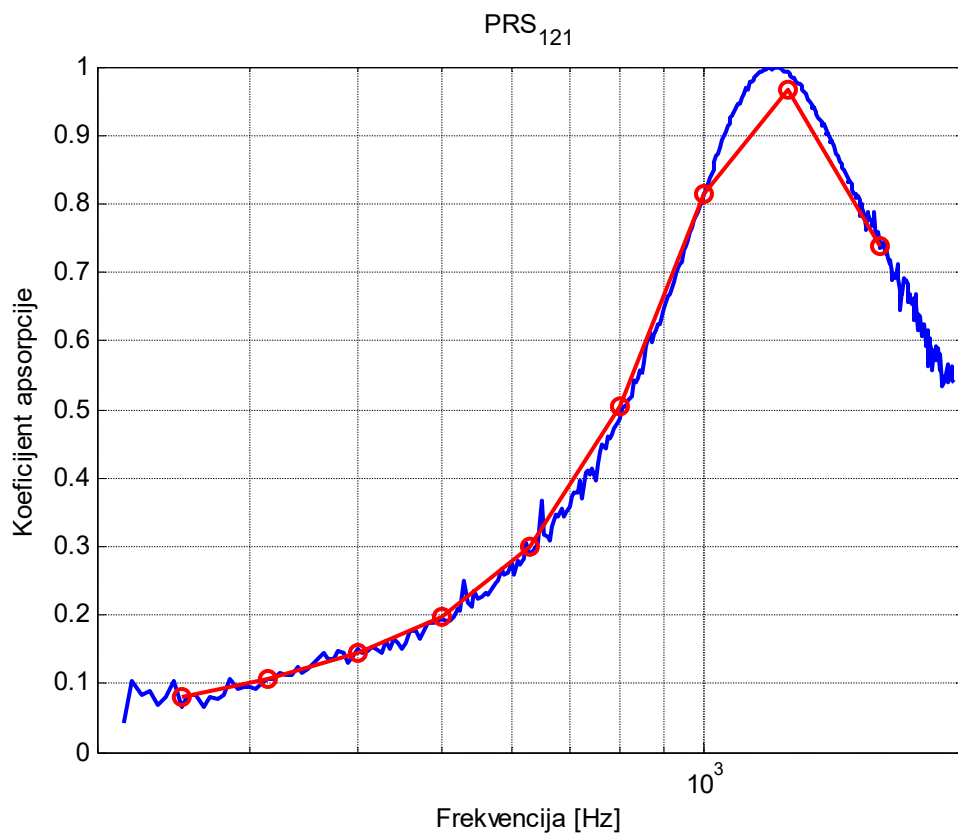
Слика П.1-1.



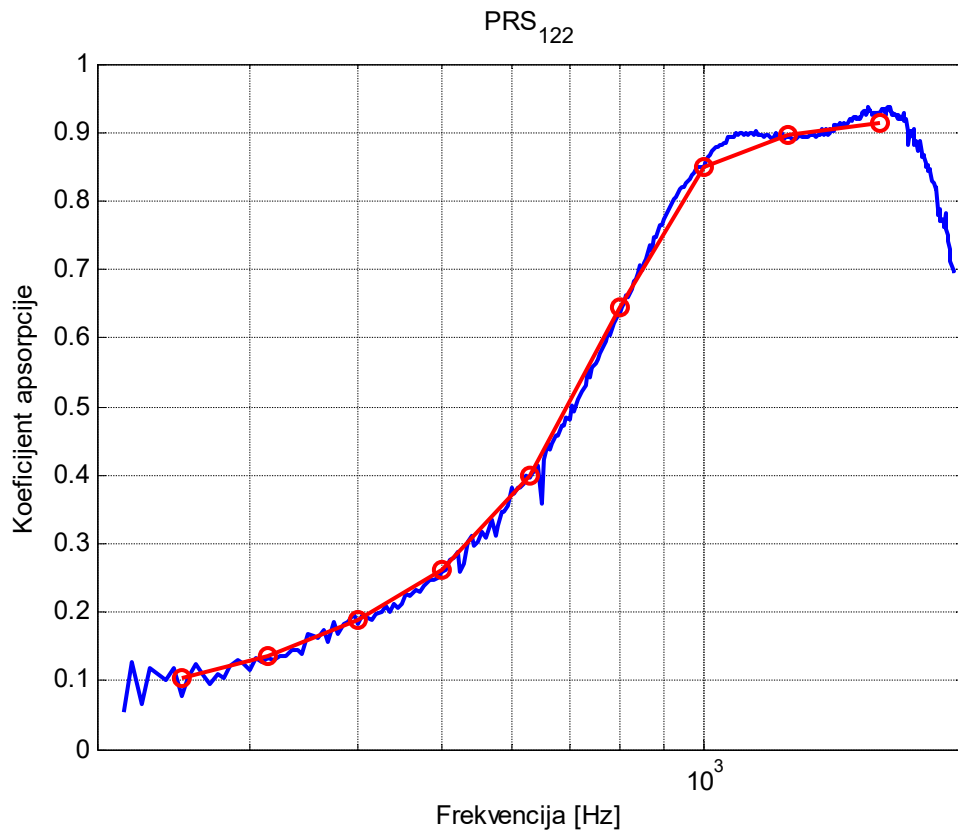
Слика П.1-2.



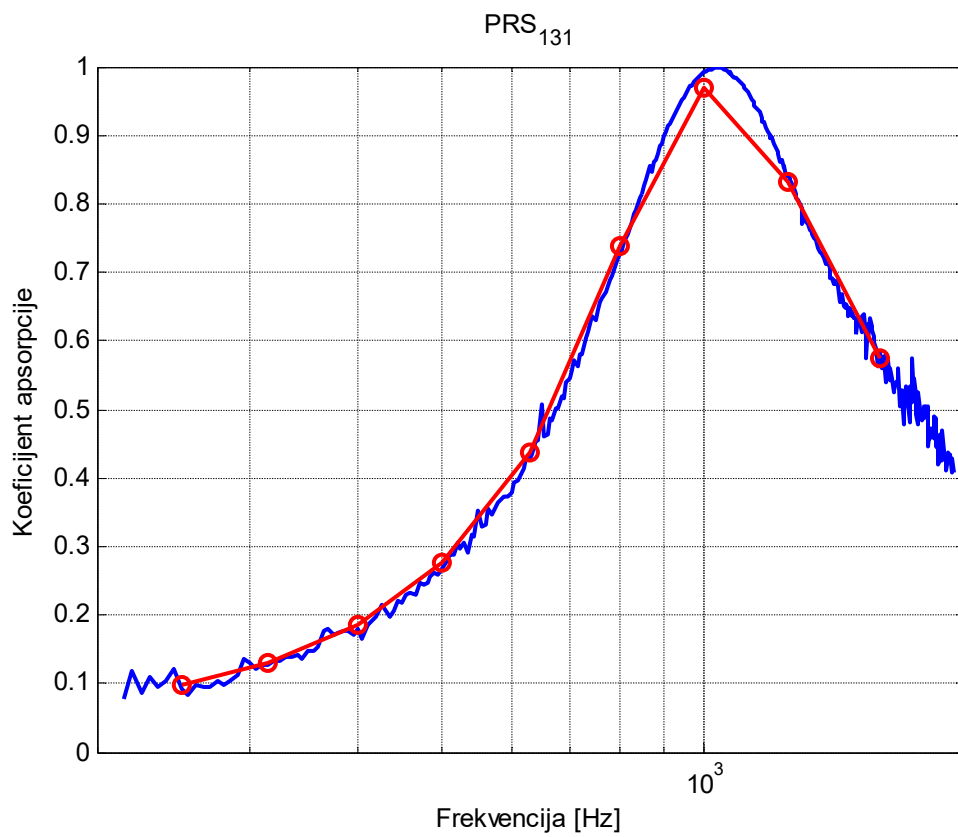
Слика П.1-3.



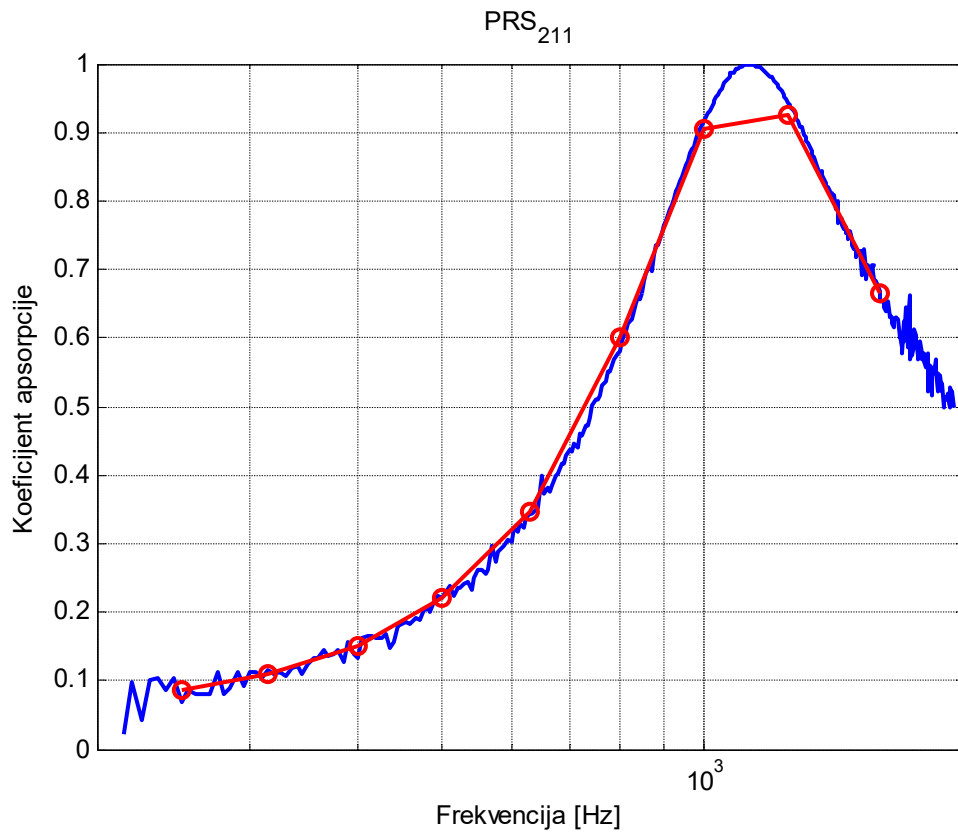
Слика П.1-4.



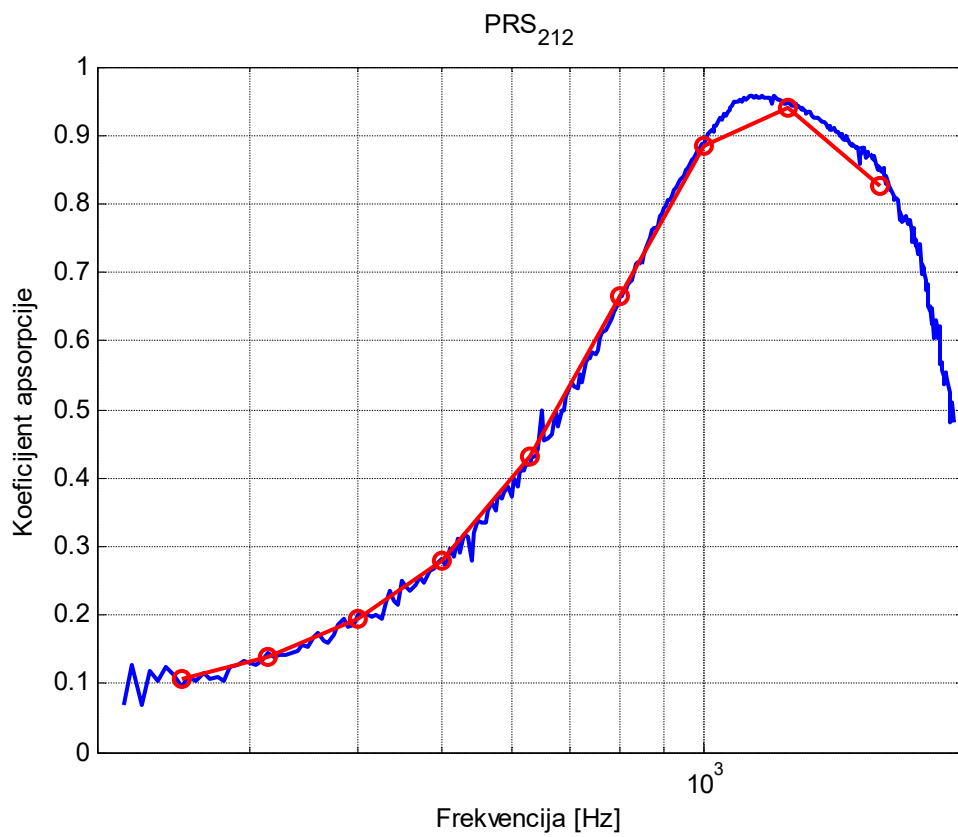
Слика П.1-5.



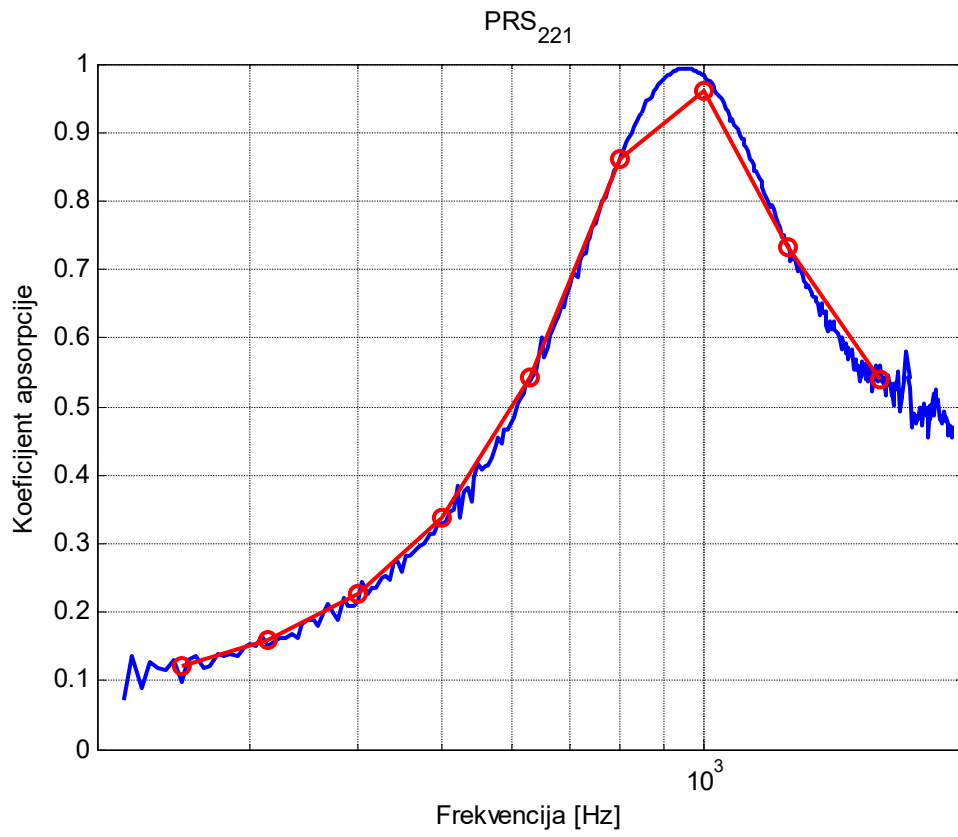
Слика П.1-6.



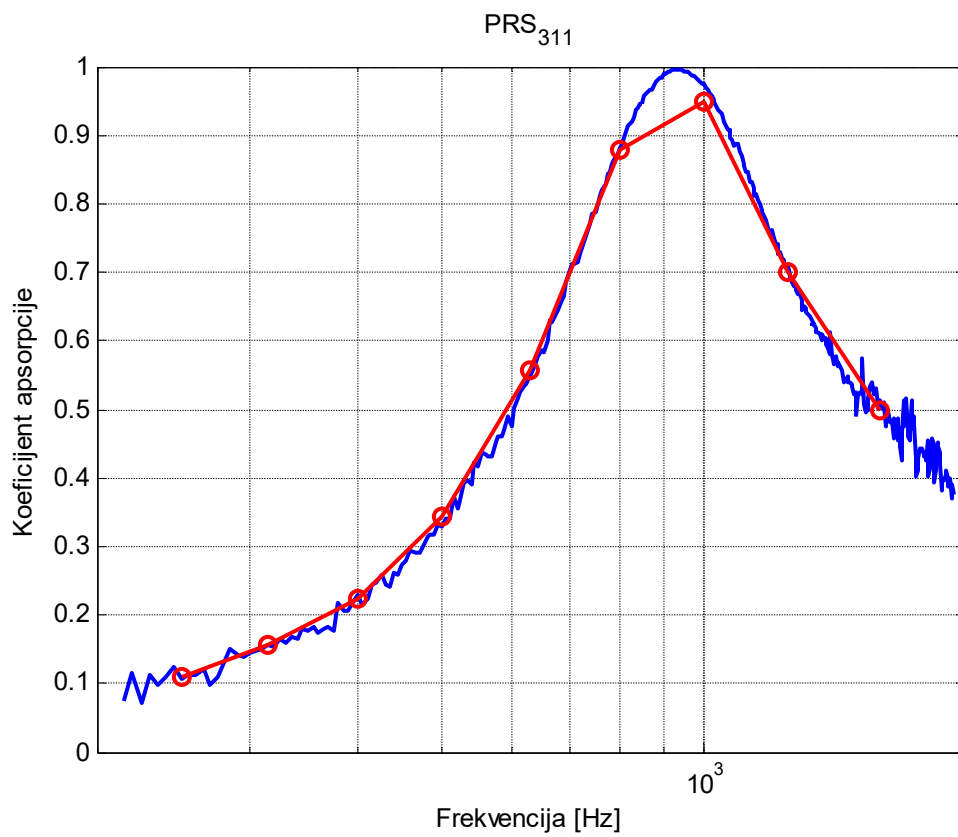
Слика П.1-7.



Слика П.1-8.

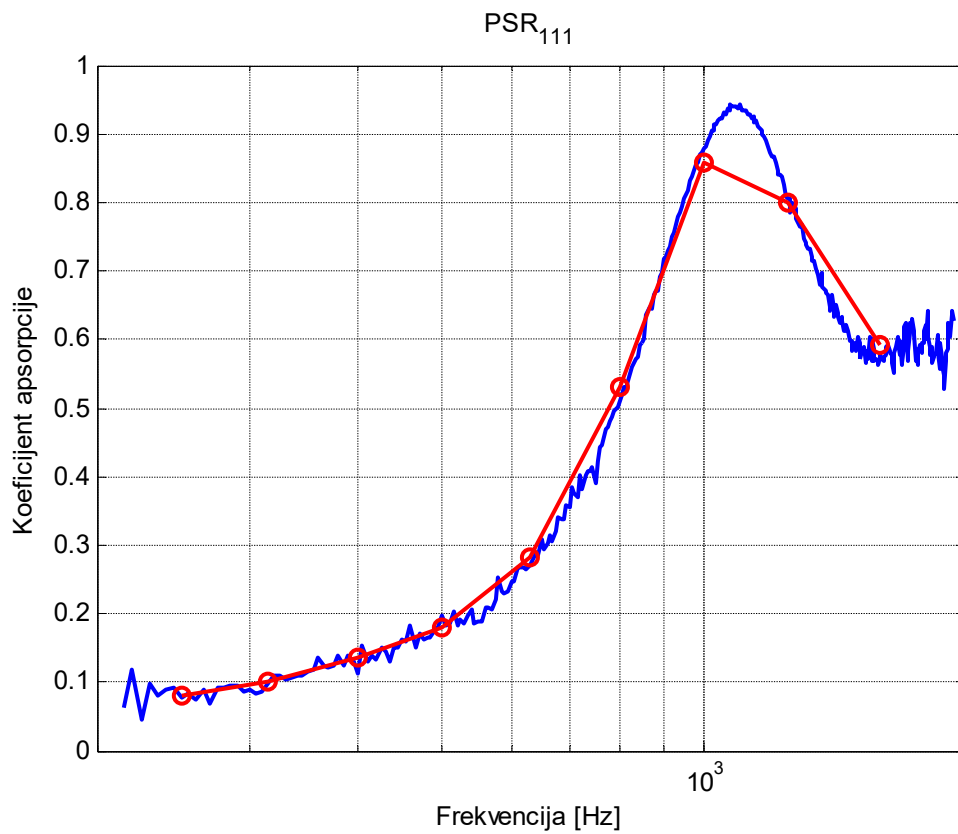


Слика П.1-9.

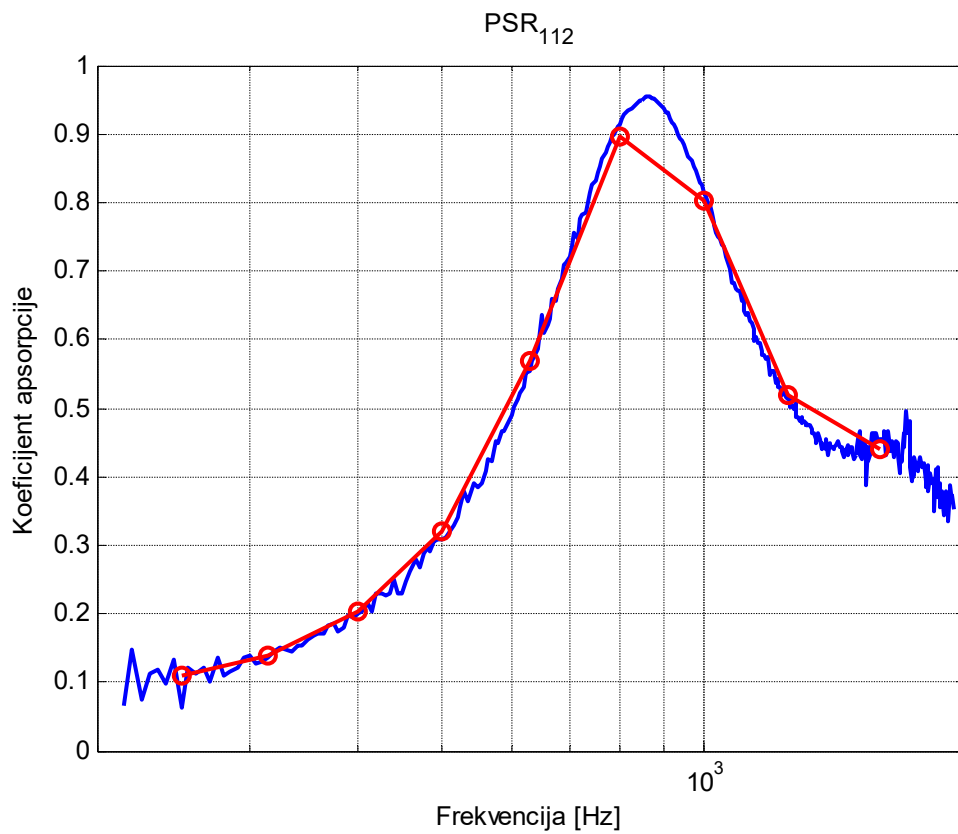


Слика П.1-10.

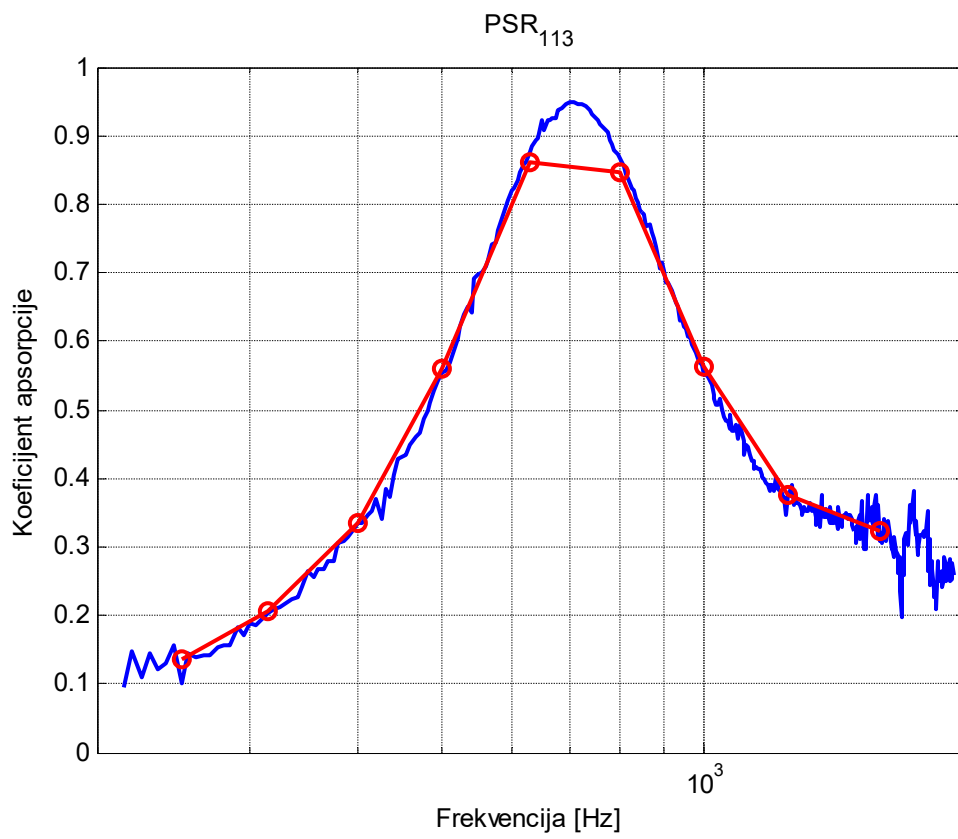
КОМБИНАЦИЈА PSR



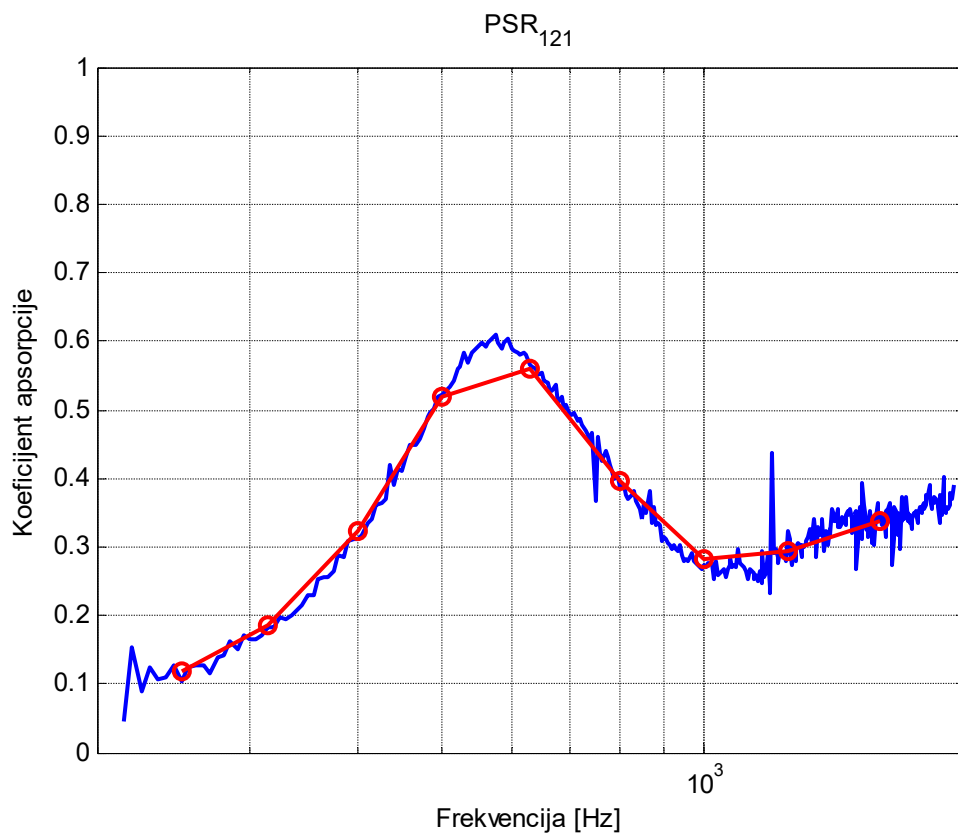
Слика П.1-11.



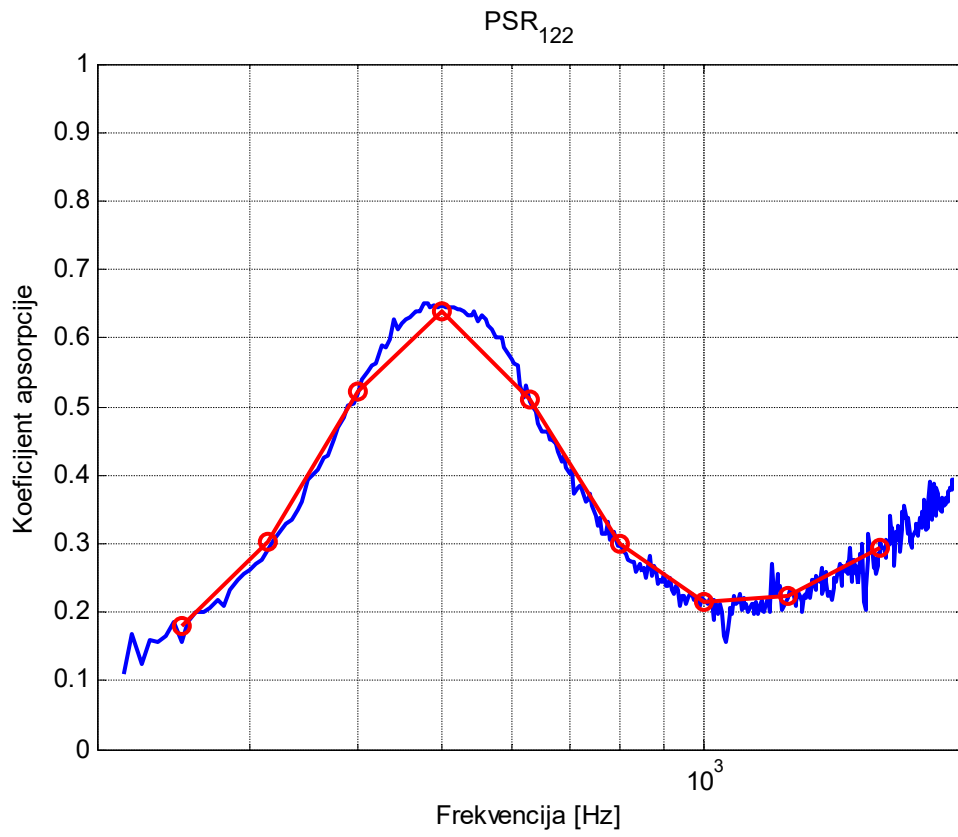
Слика П.1-12.



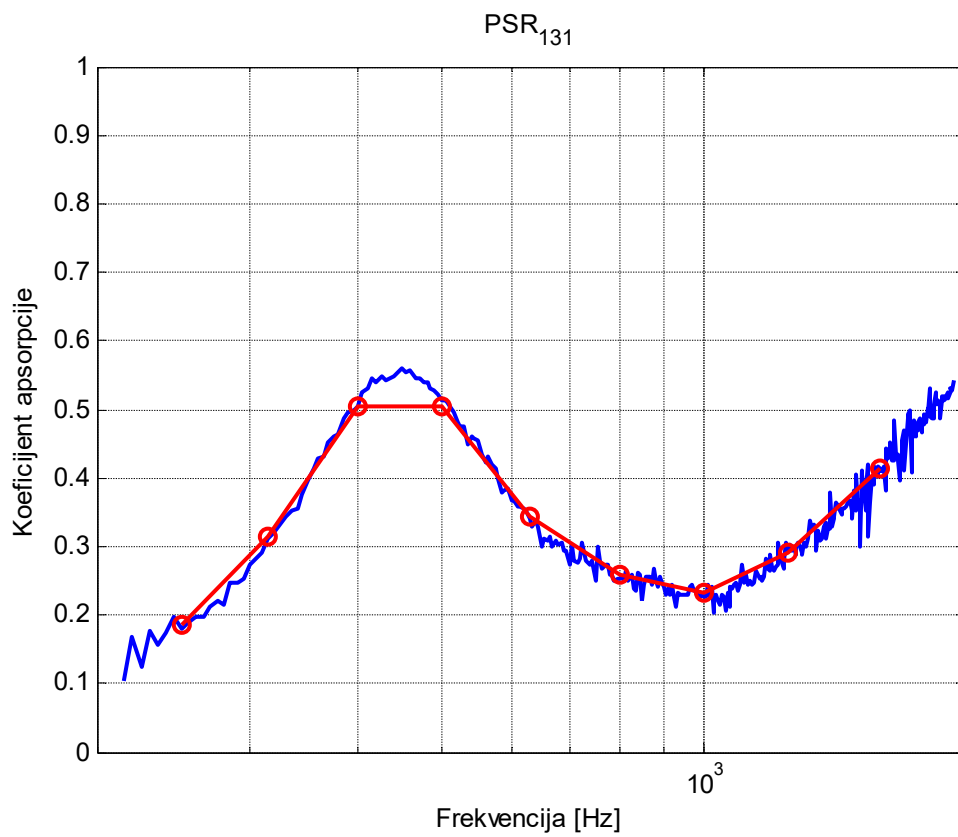
Слика П.1-13.



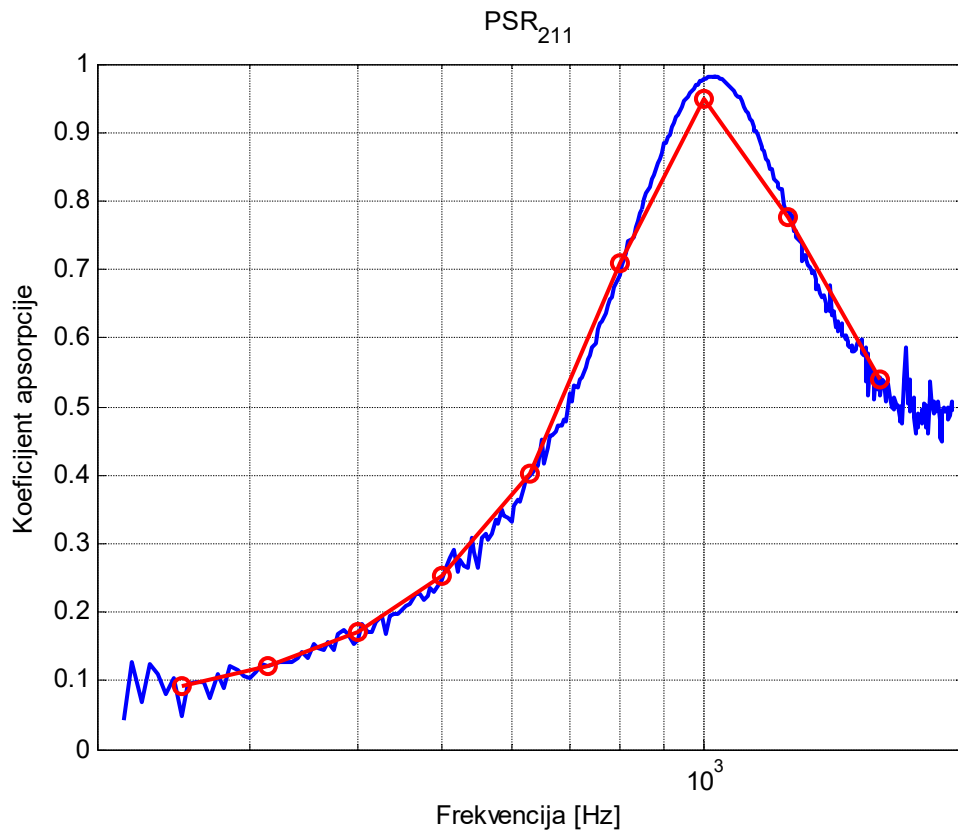
Слика П.1-14.



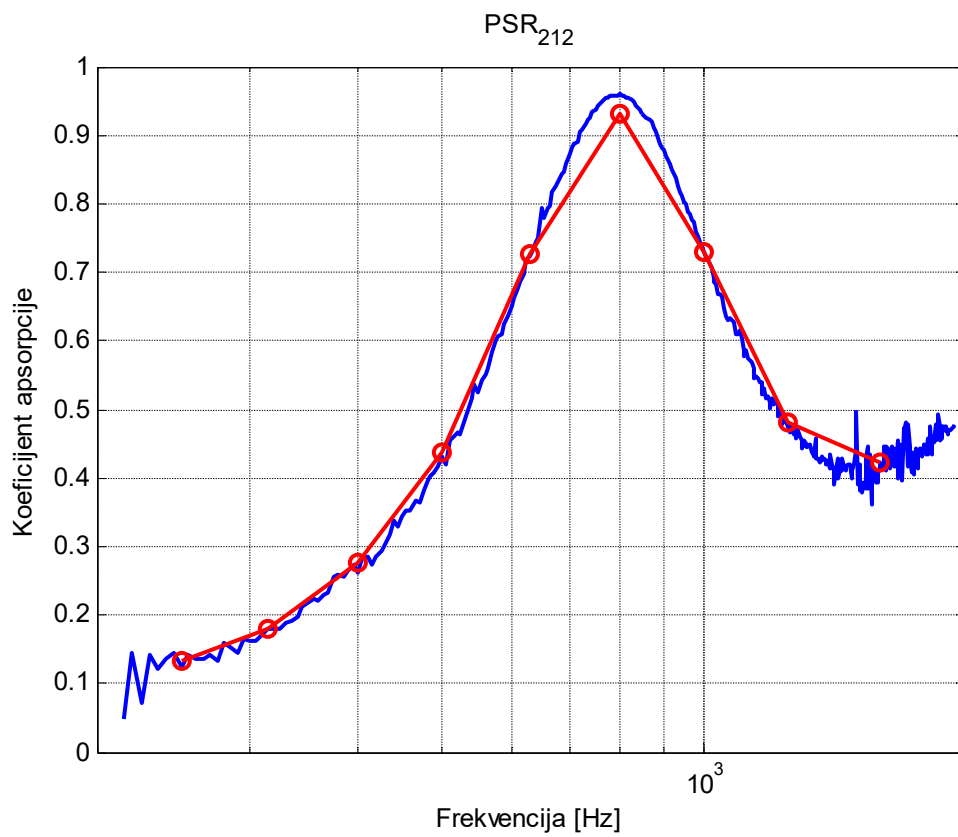
Слика П.1-15.



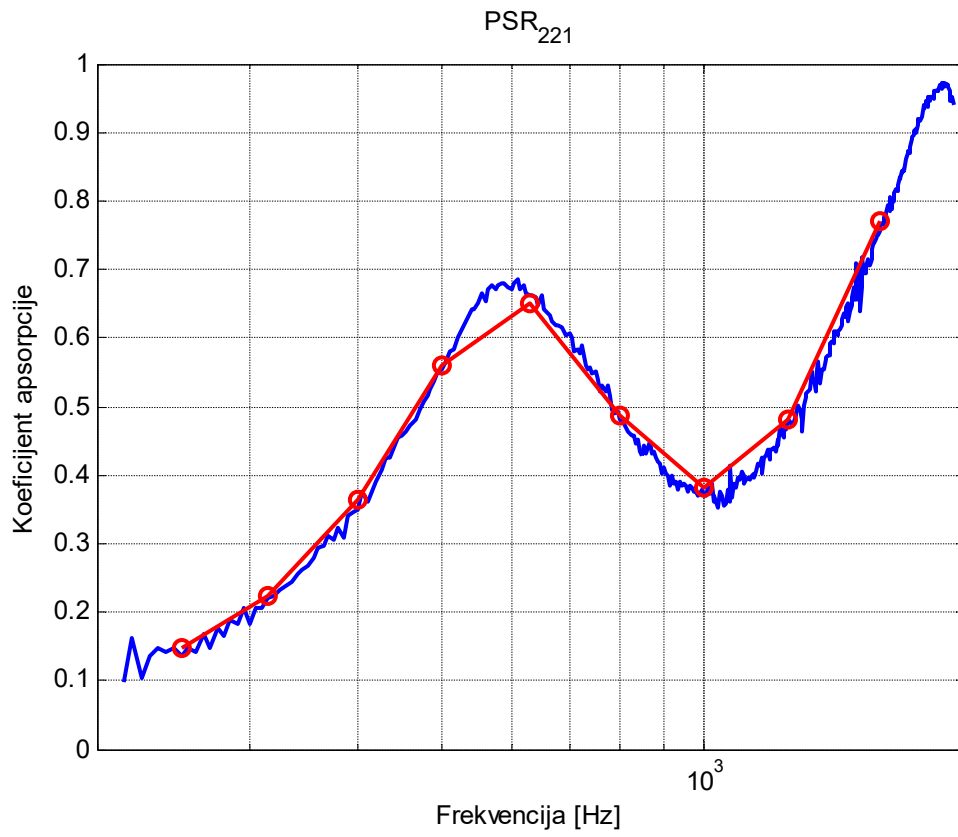
Слика П.1-16.



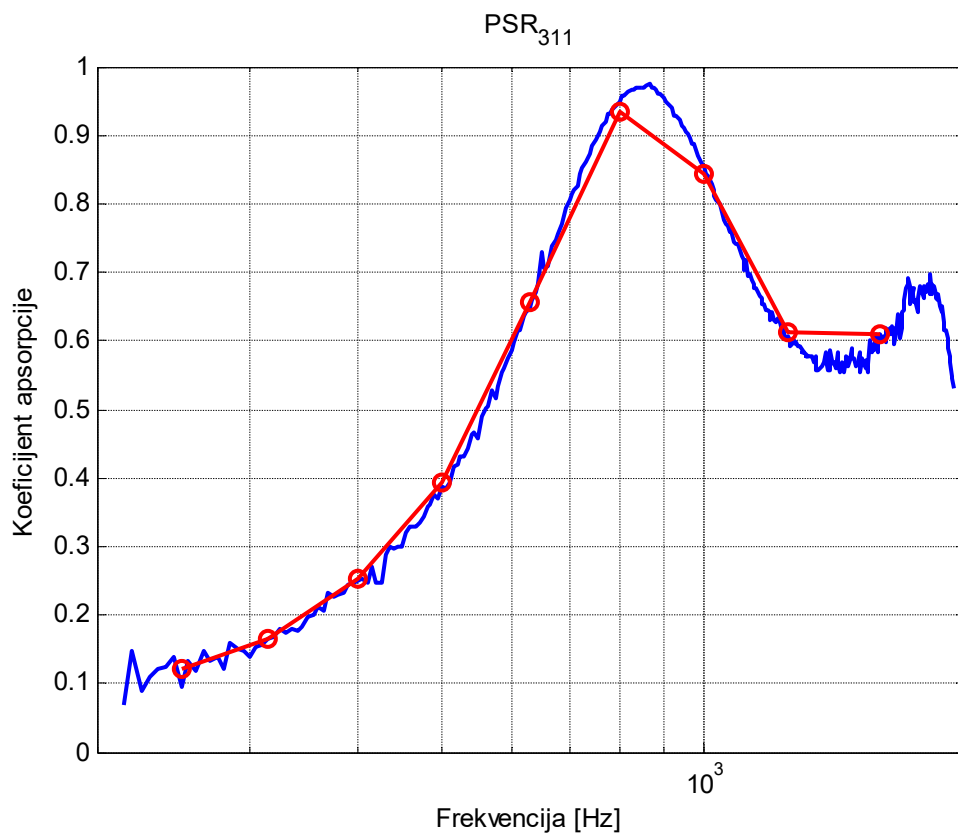
Слика П.1-17.



Слика П.1-18.

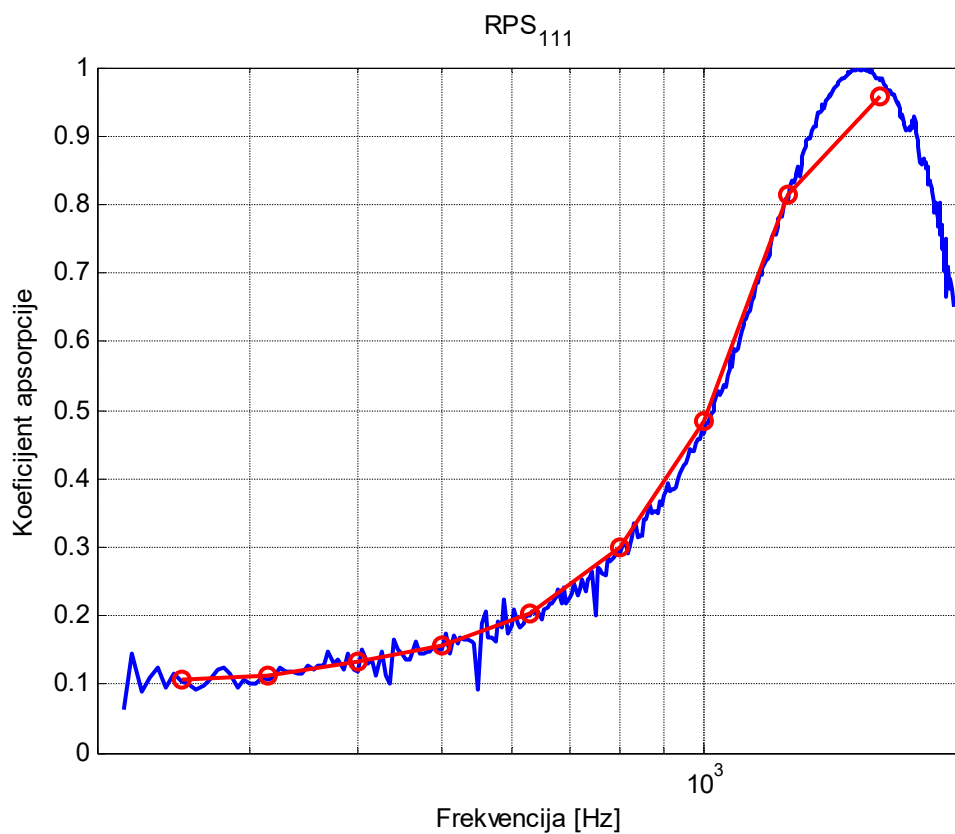


Слика П.1-19.

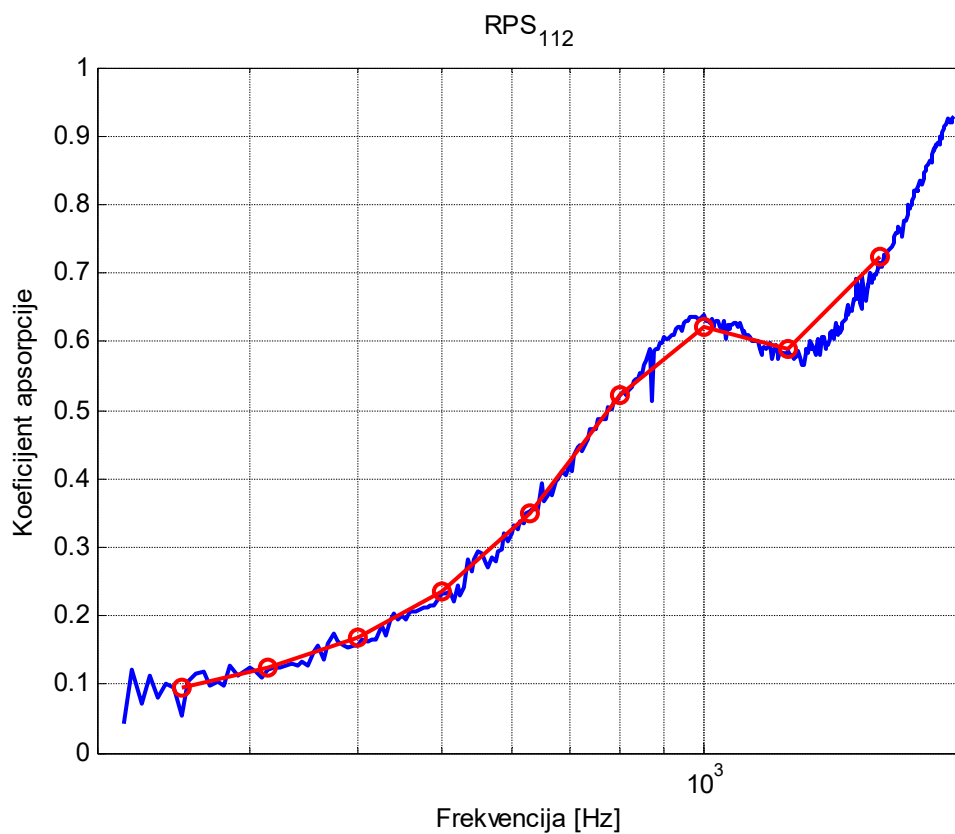


Слика П.1-20.

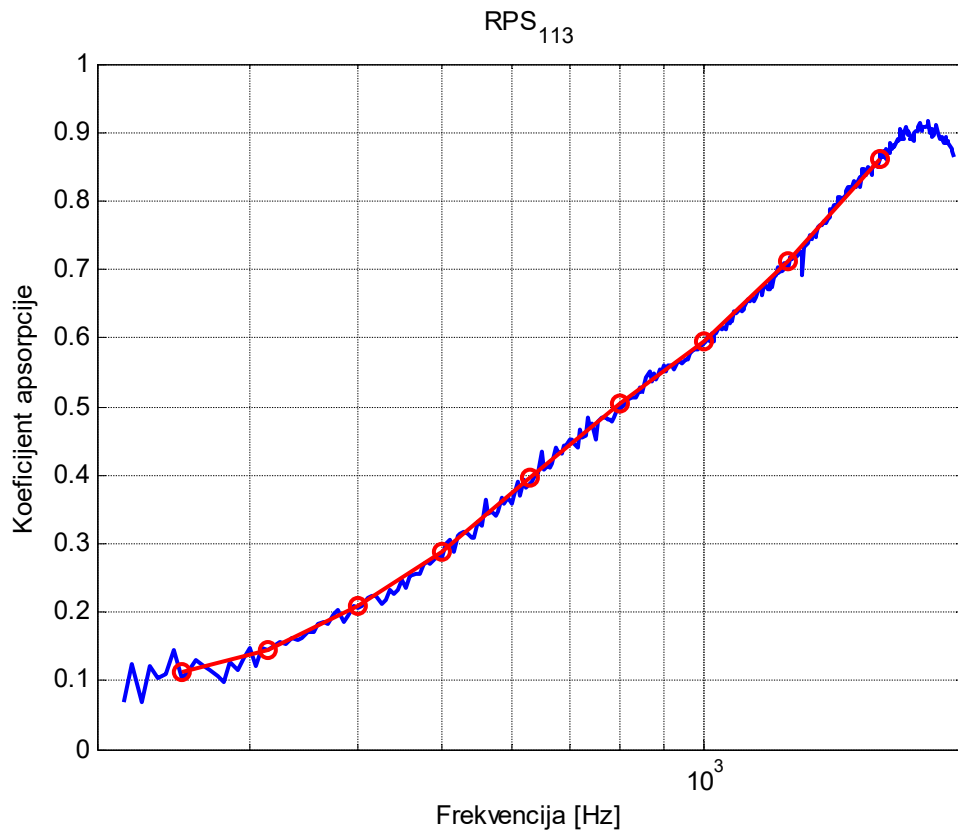
КОМБИНАЦИЈА RPS



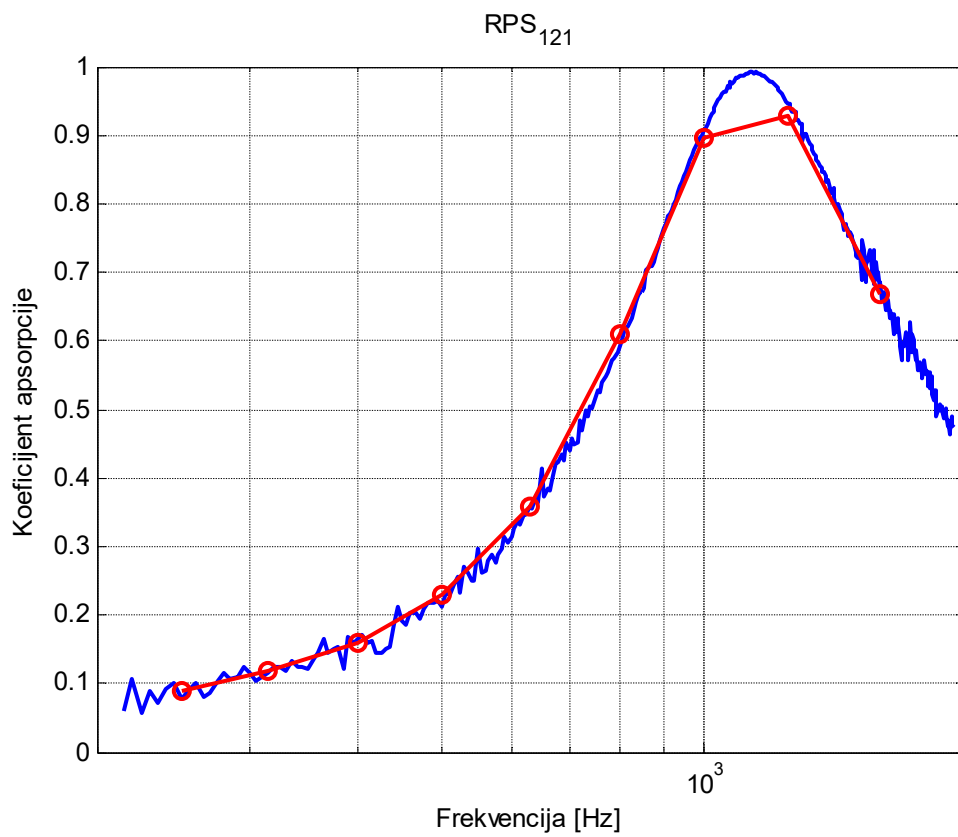
Слика П.1-21.



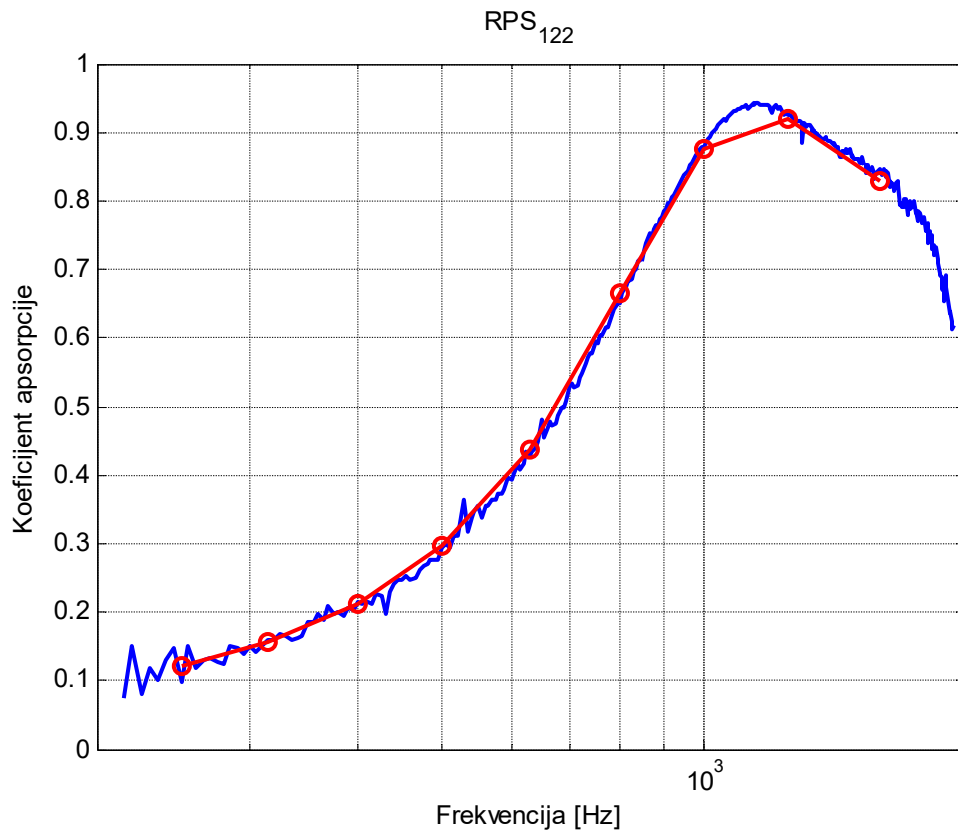
Слика П.1-22.



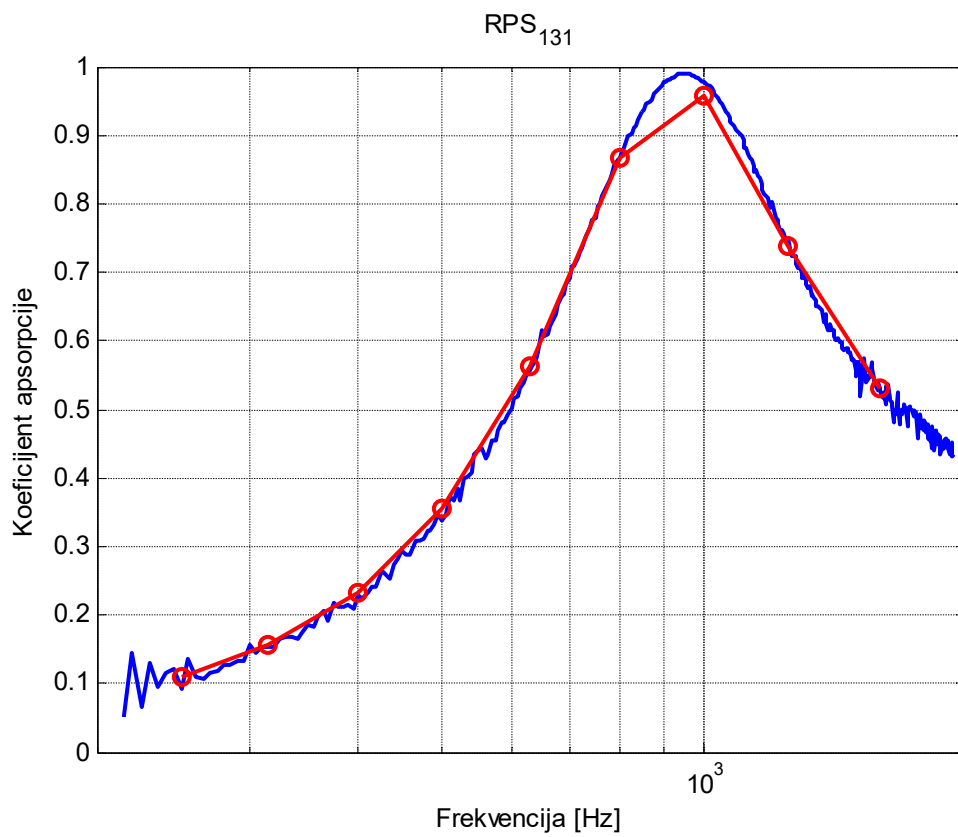
Слика П.1-23.



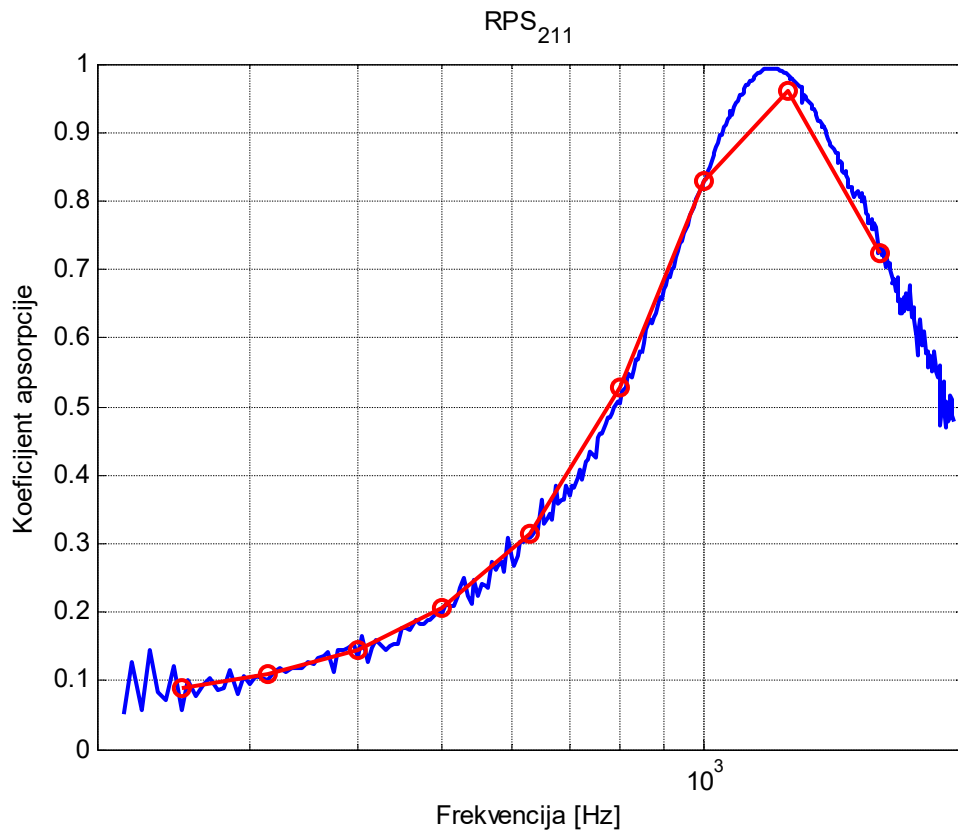
Слика П.1-24.



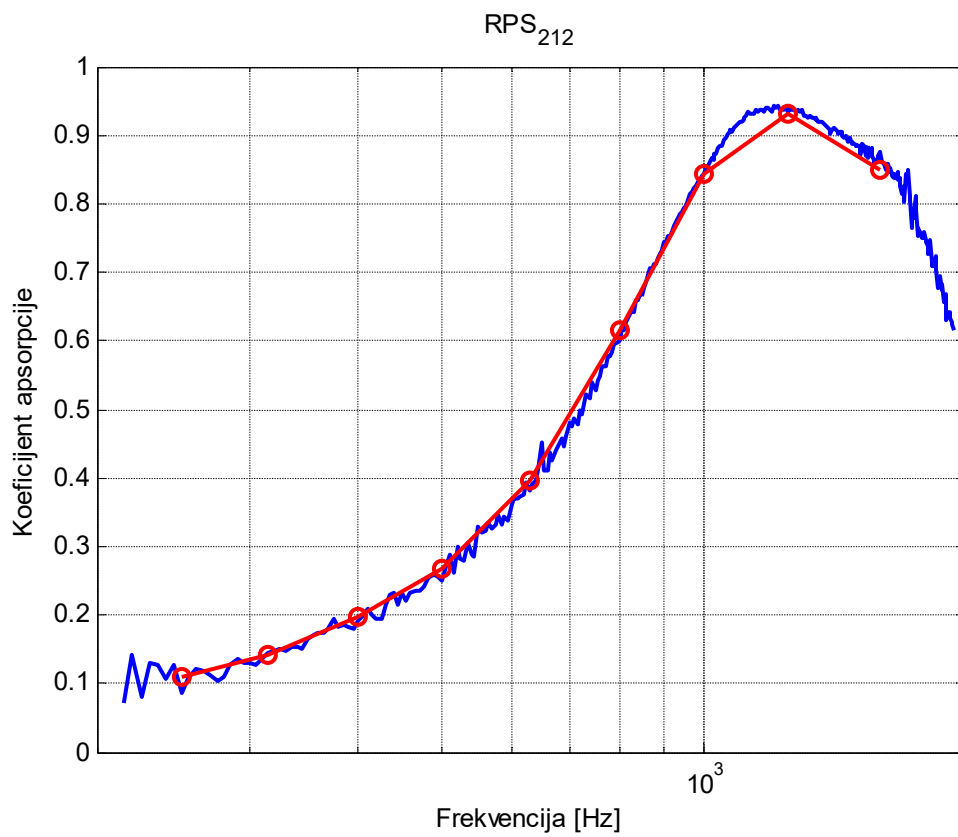
Слика П.1-25.



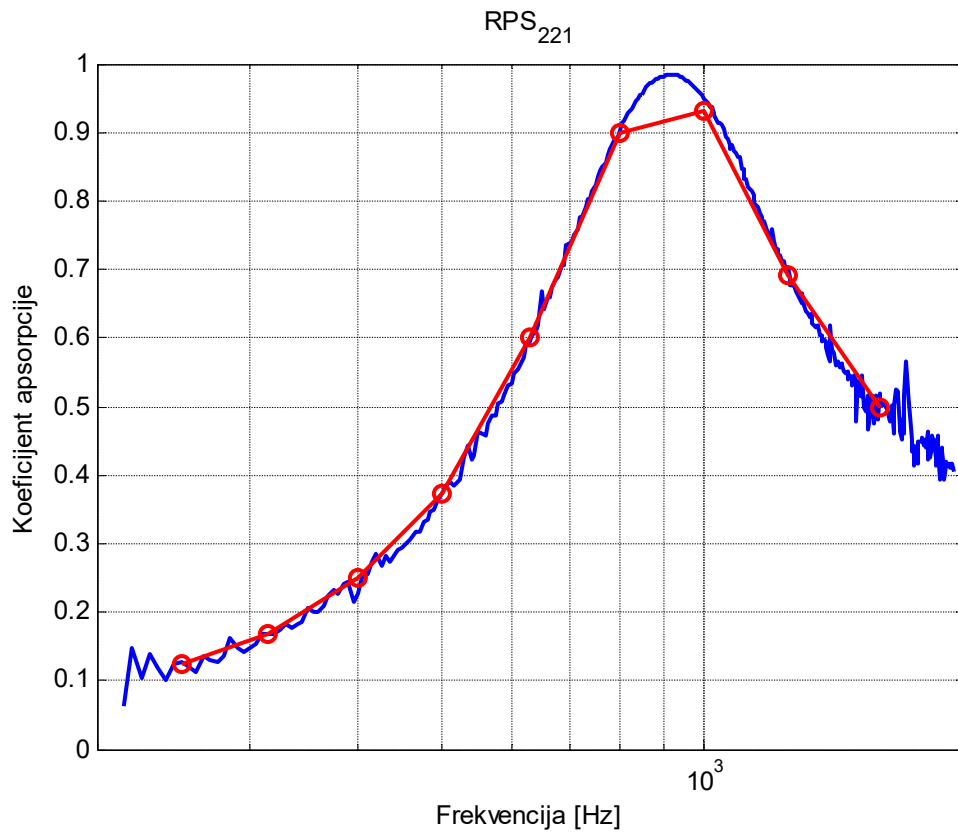
Слика П.1-26.



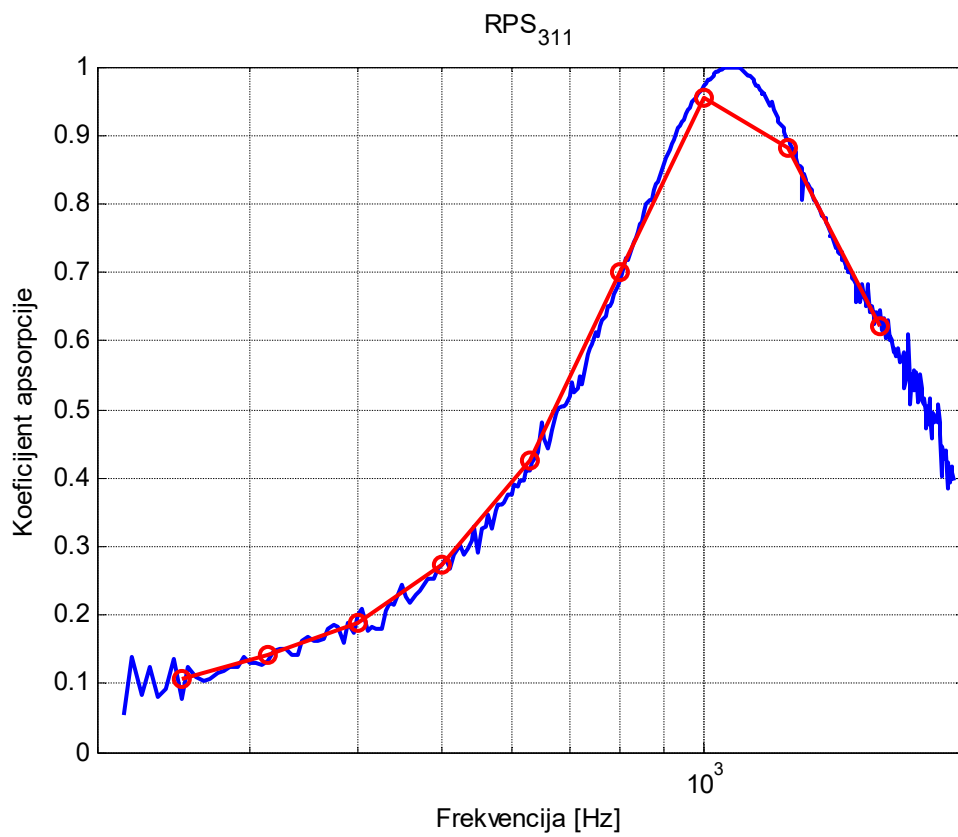
Слика П.1-27.



Слика П.1-28.

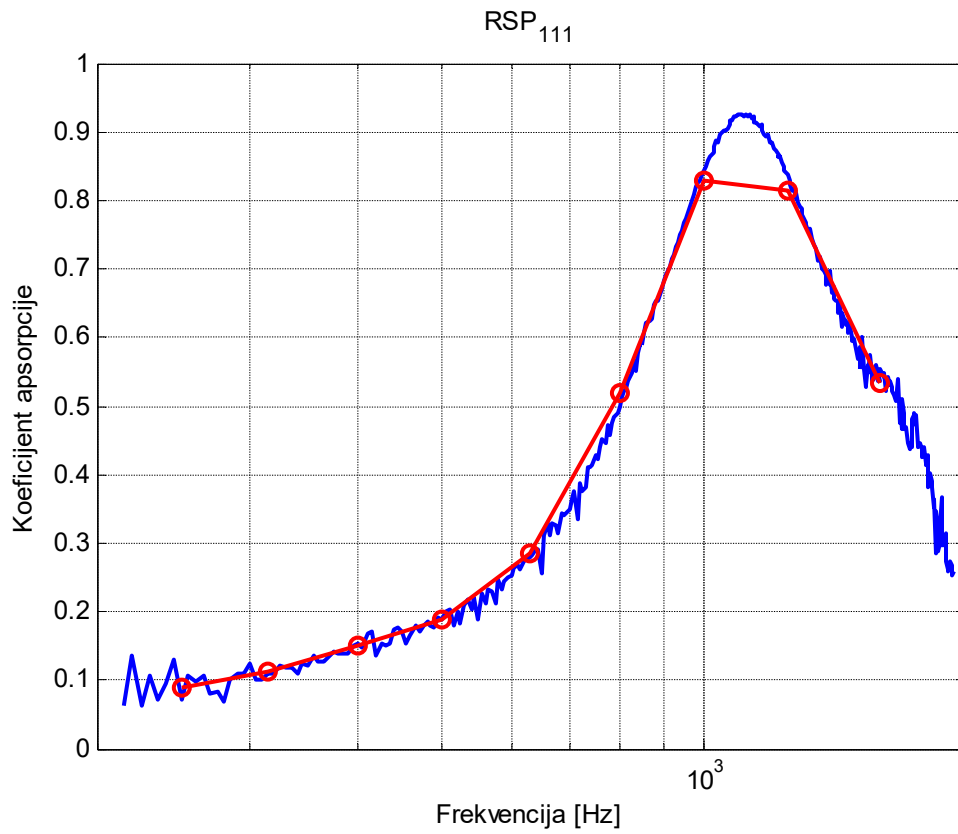


Слика П.1-29.

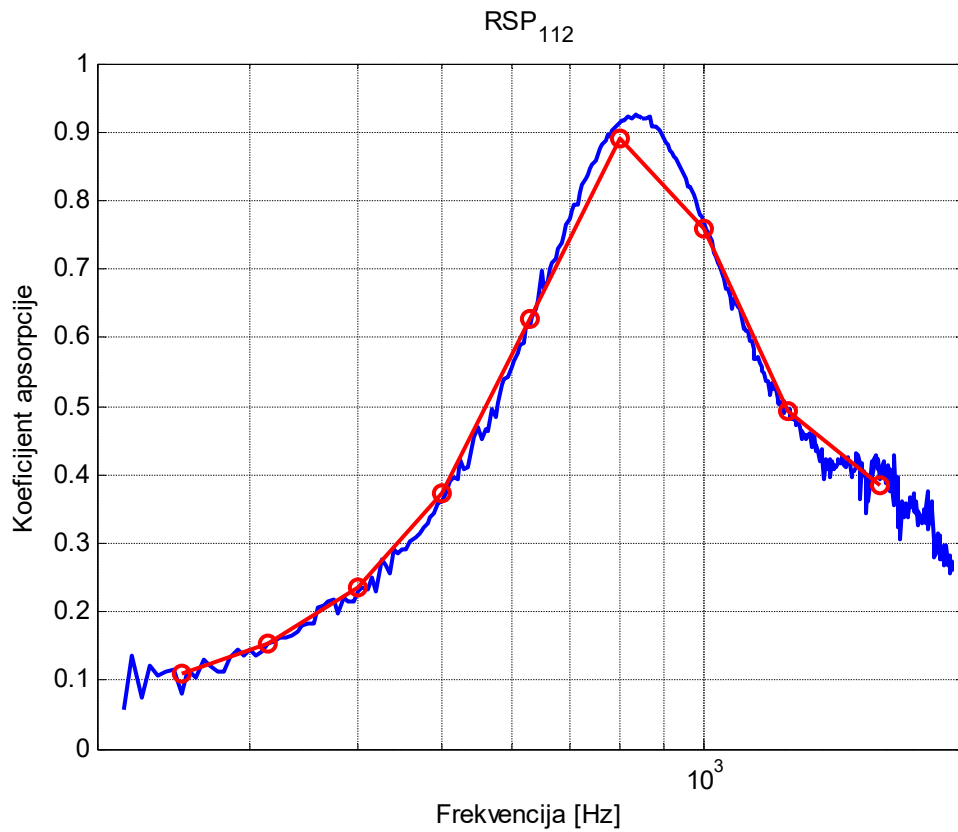


Слика П.1-30.

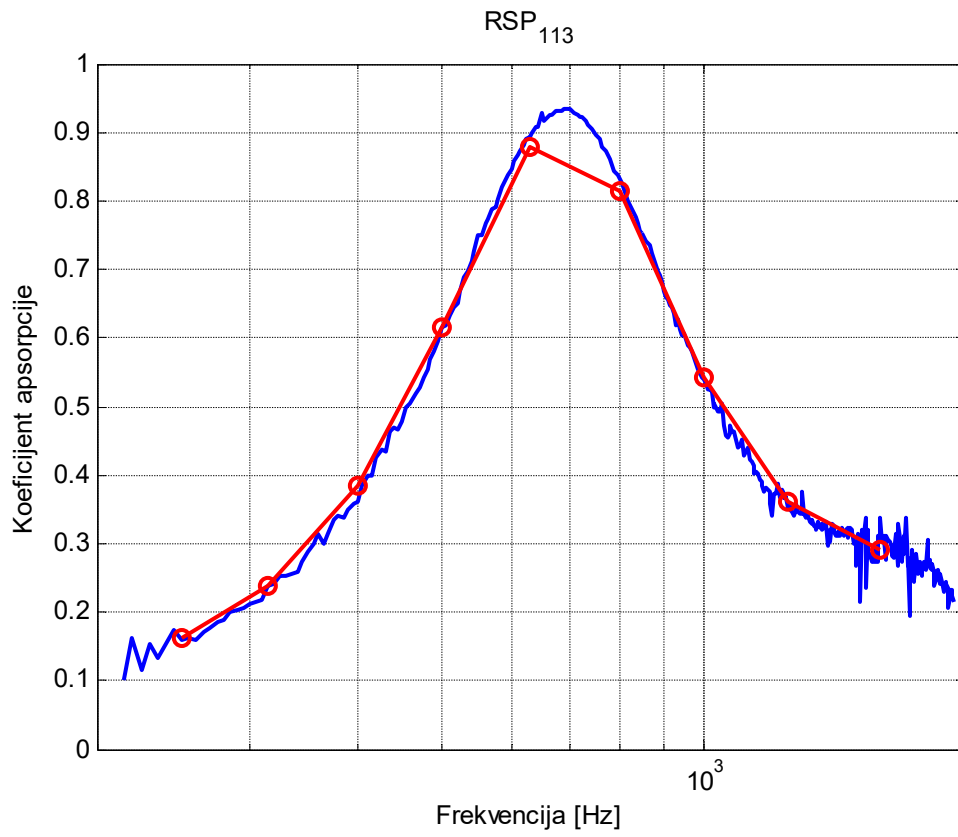
КОМБИНАЦИЈА RSP



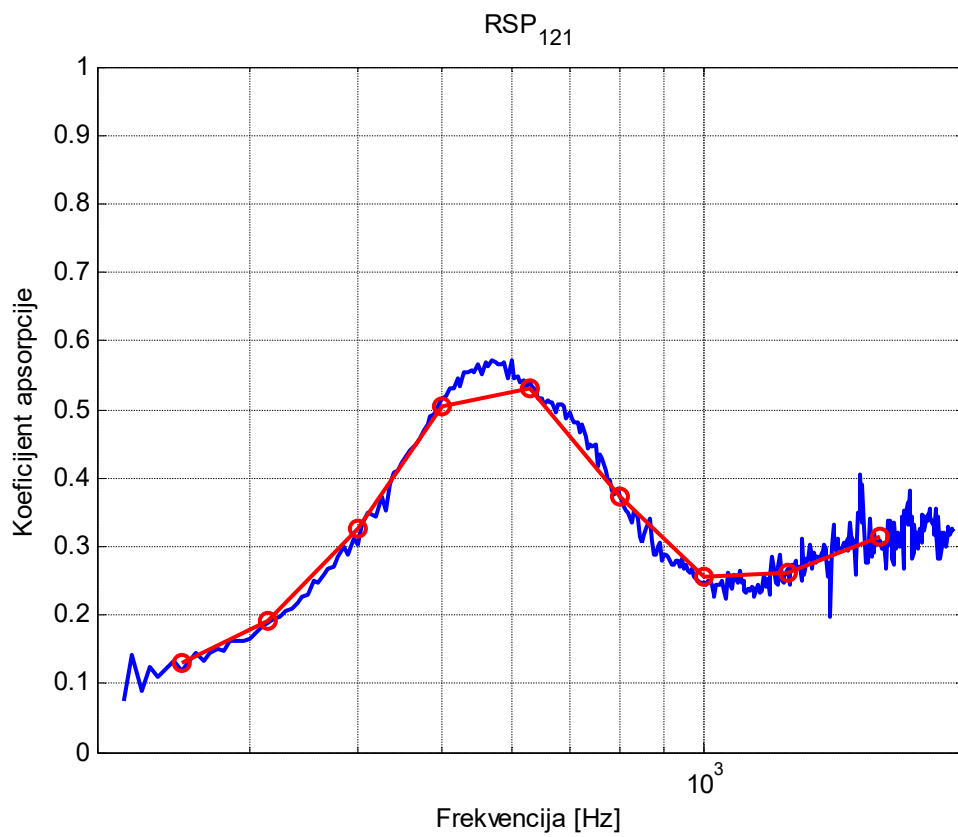
Слика П.1-31.



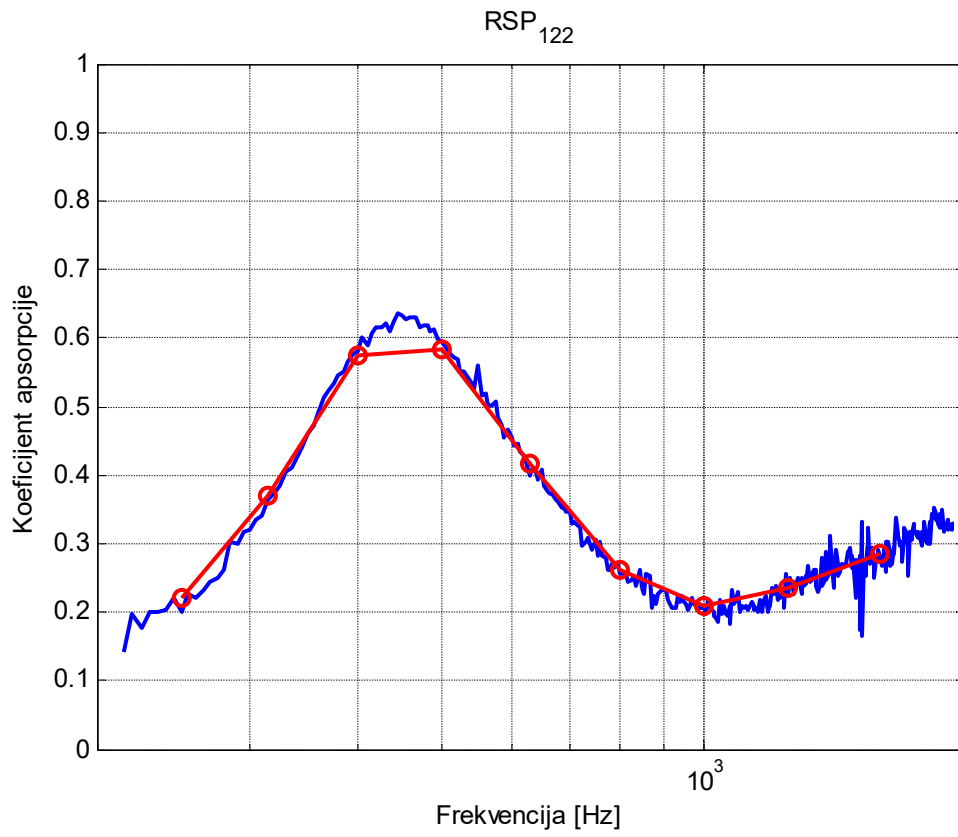
Слика П.1-32.



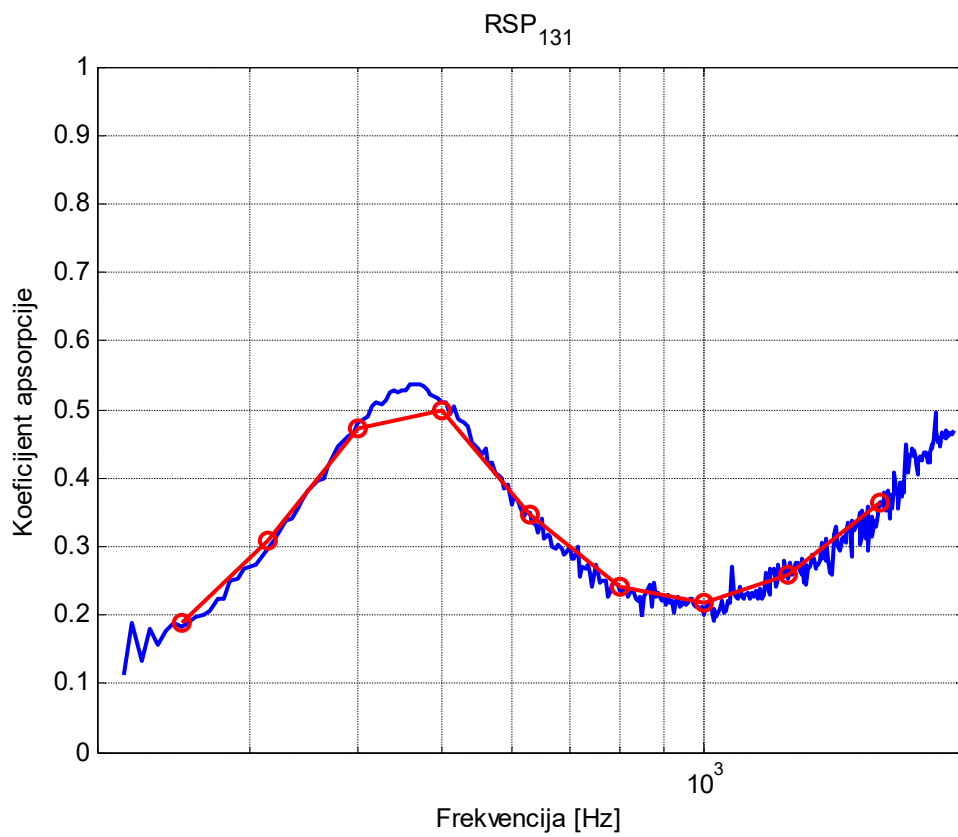
Слика П.1-33.



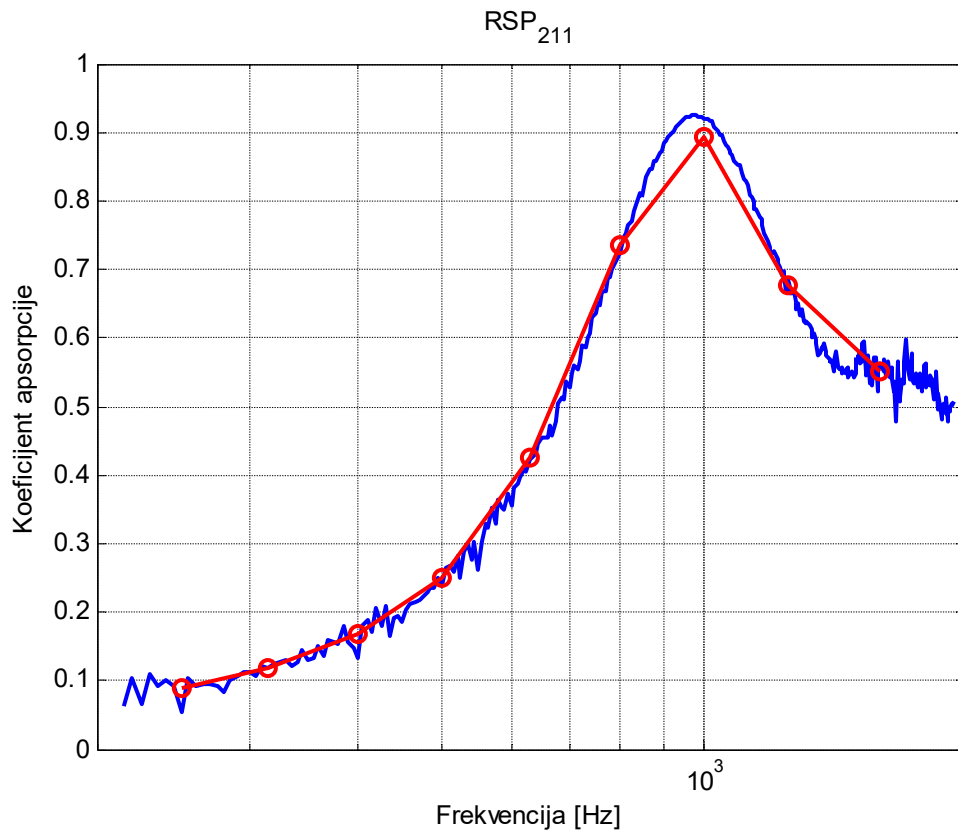
Слика П.1-34.



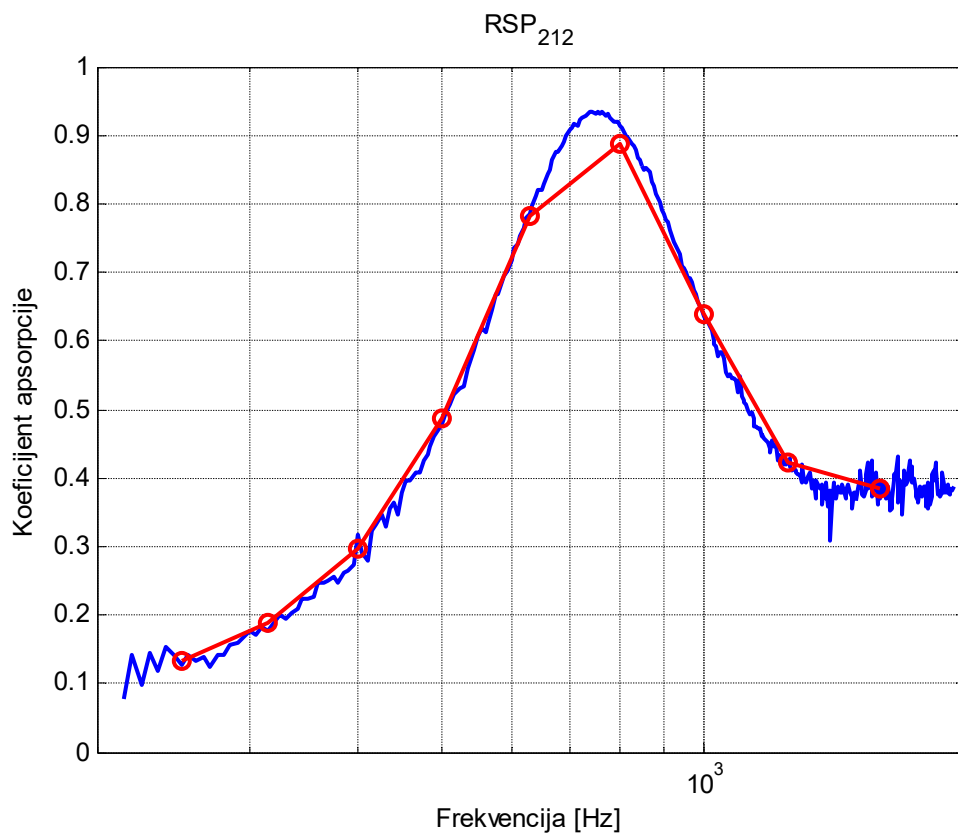
Слика П.1-35.



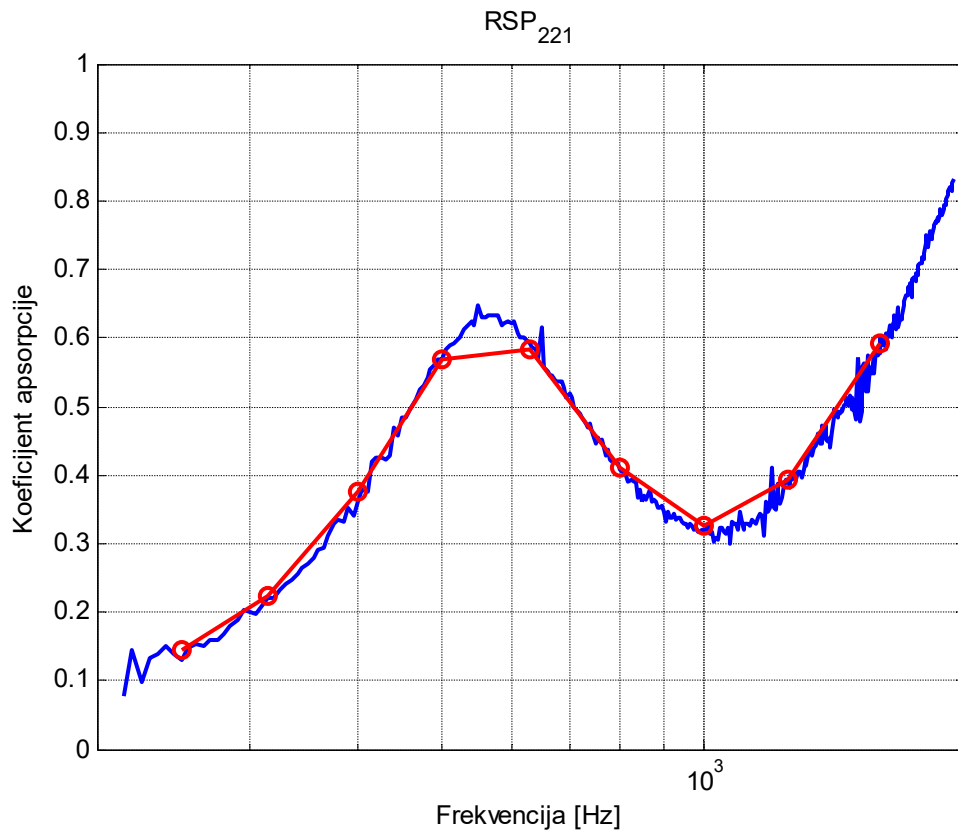
Слика П.1-36.



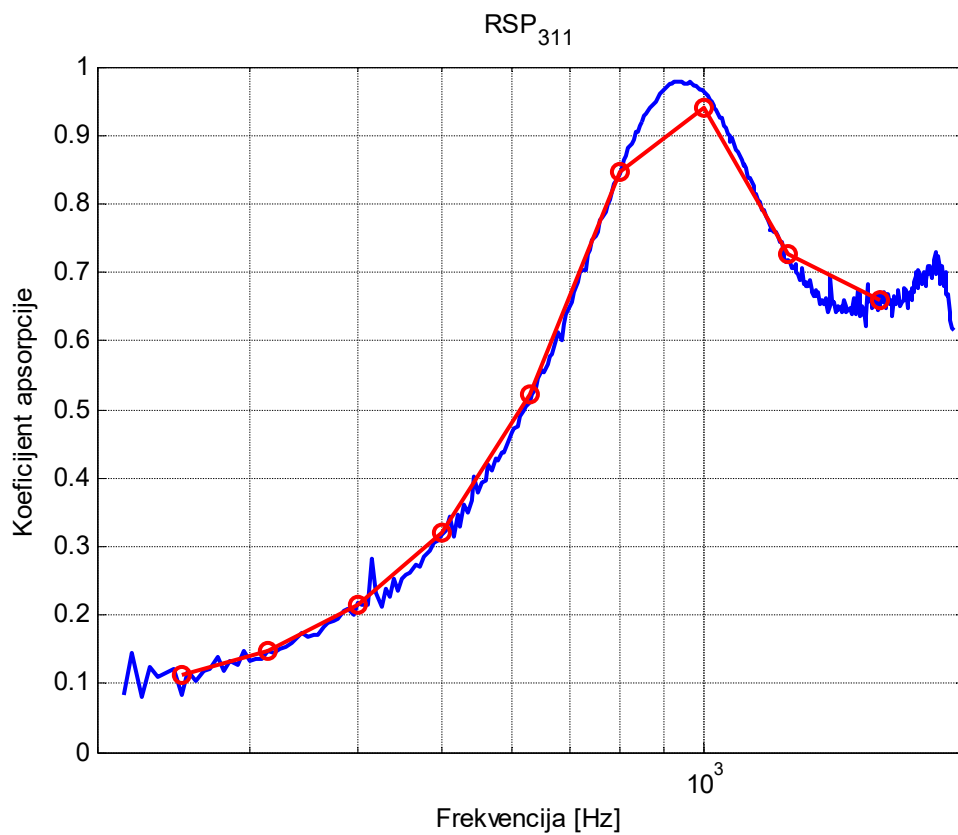
Слика П.1-37.



Слика П.1-38.

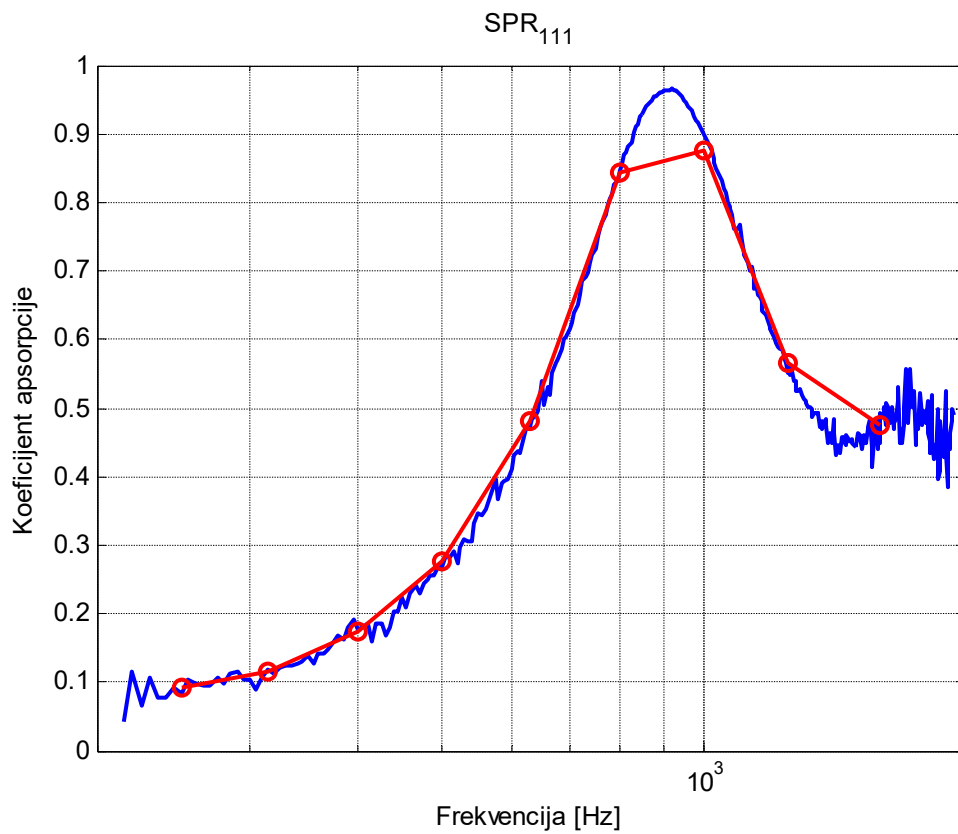


Слика П.1-39.

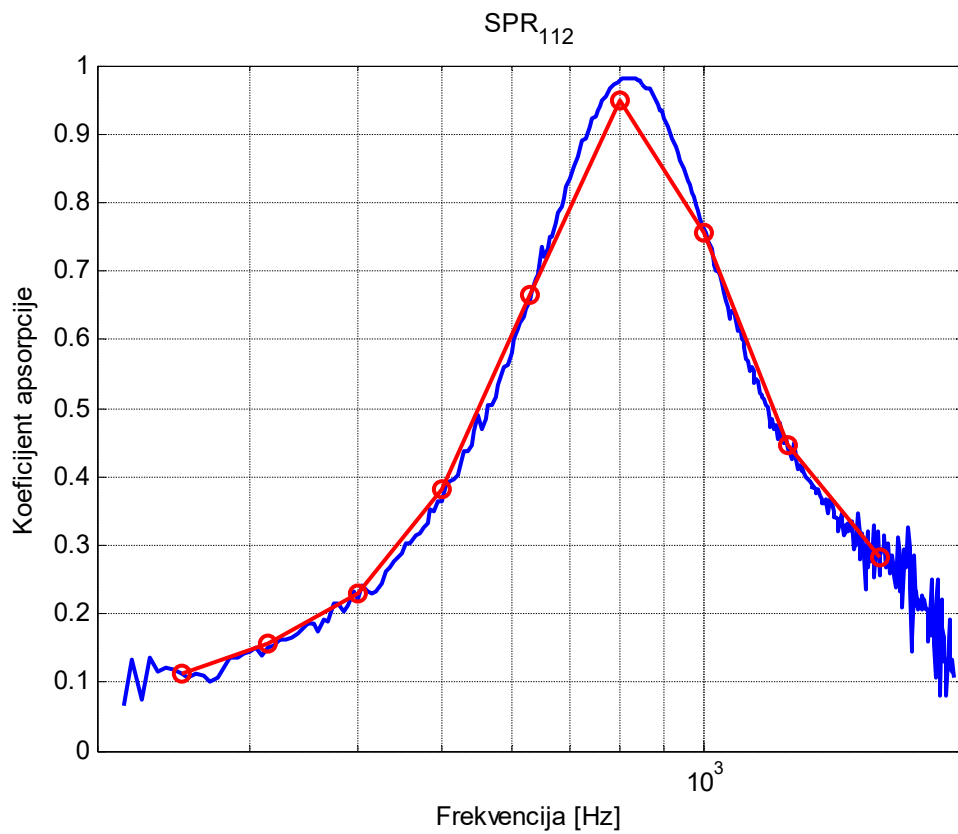


Слика П.1-40.

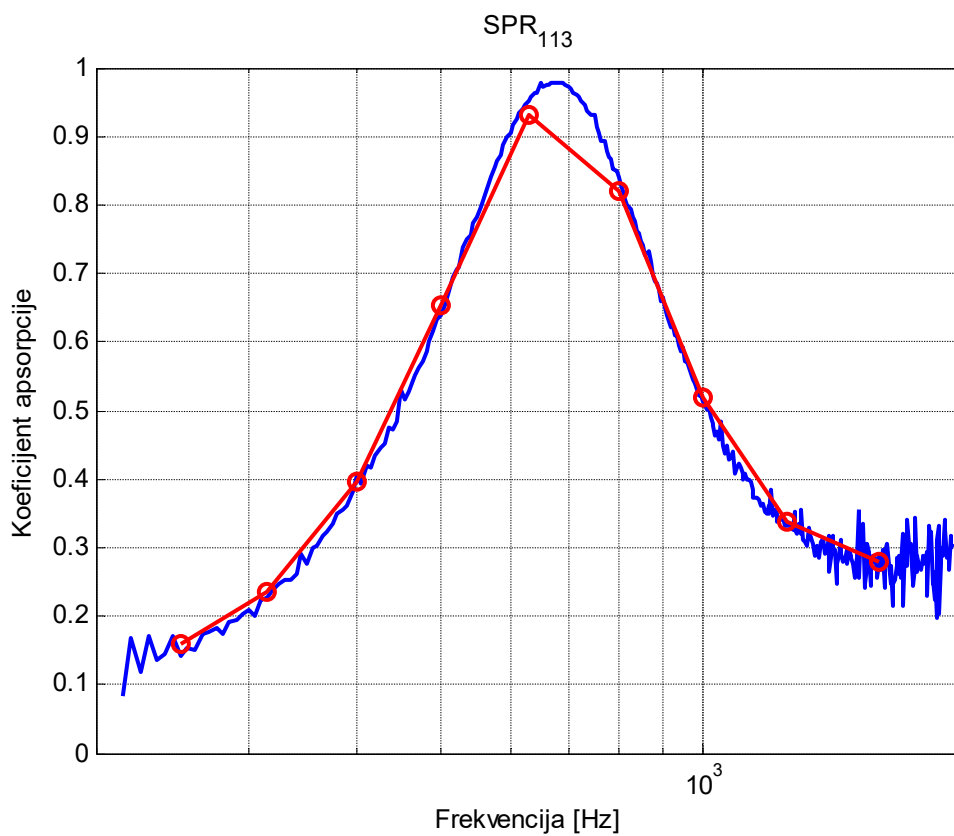
КОМБИНАЦИЈА SPR



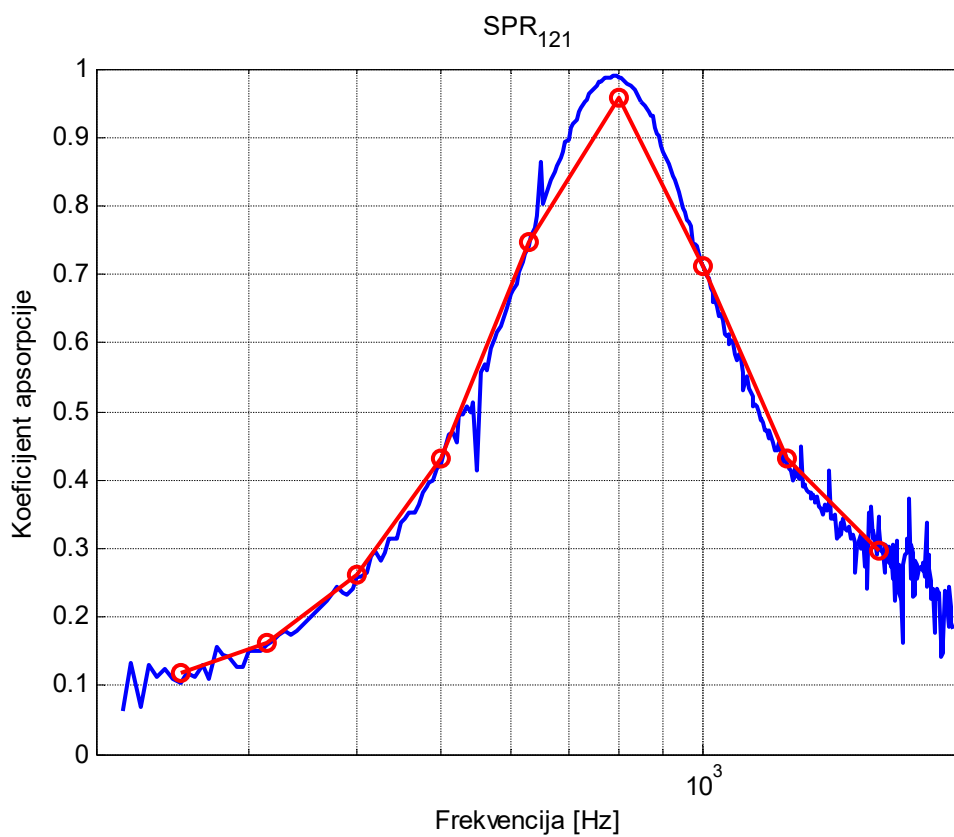
Слика П.1-41.



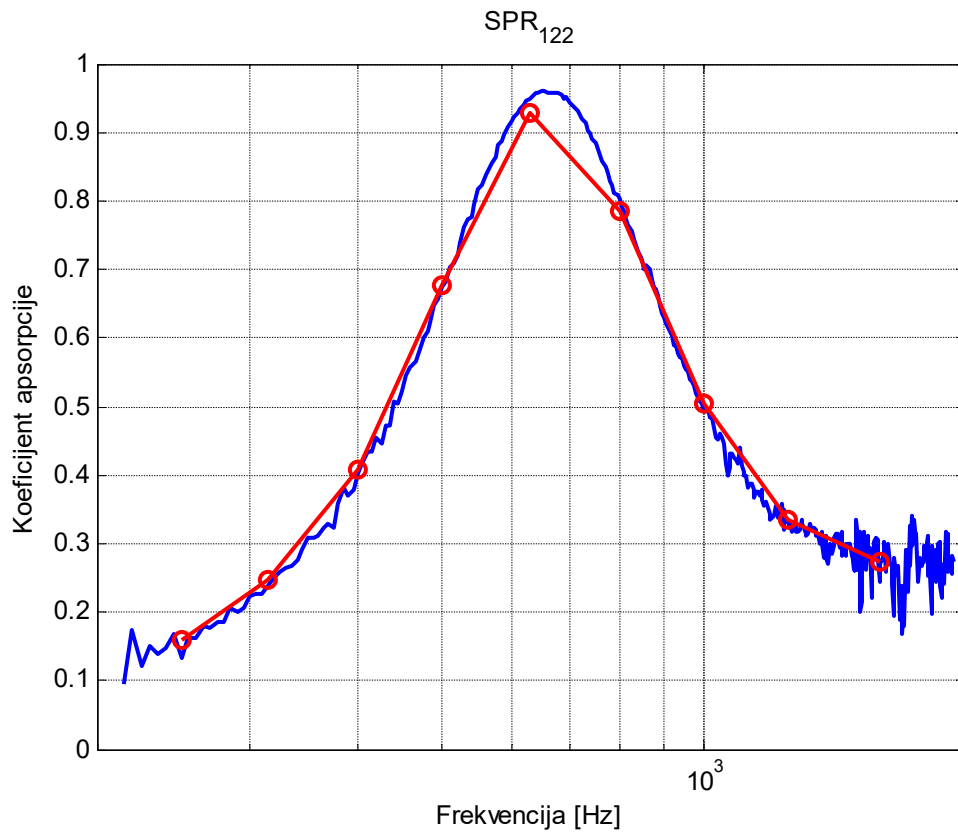
Слика П.1-42.



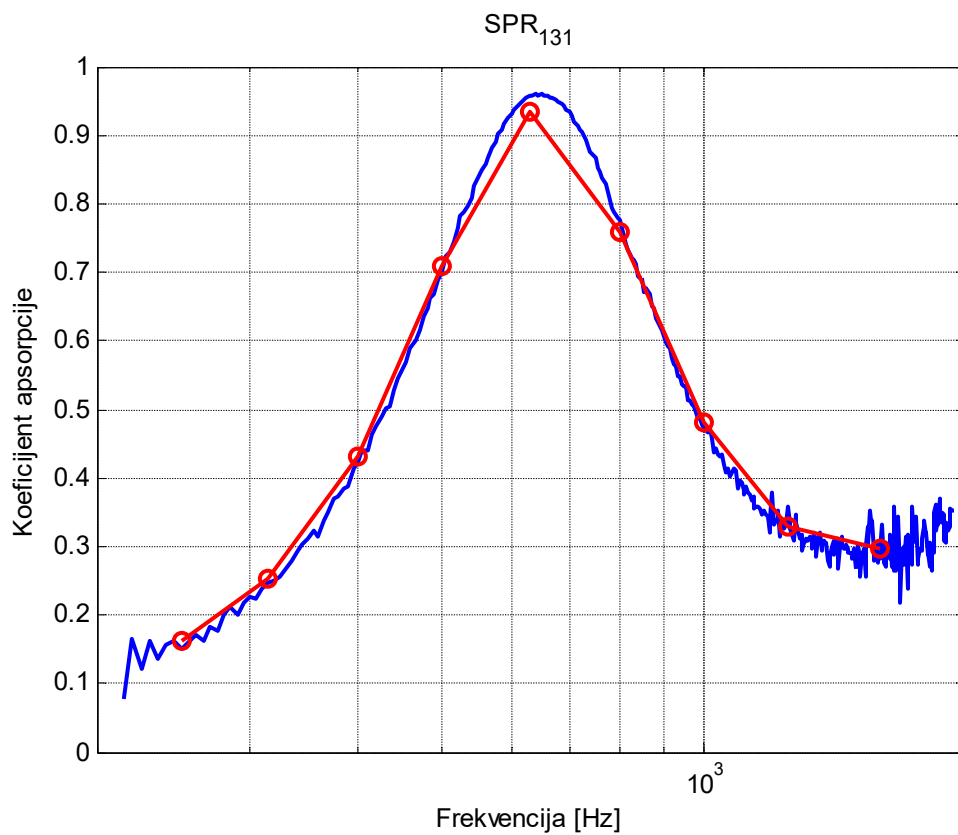
Слика П.1-43.



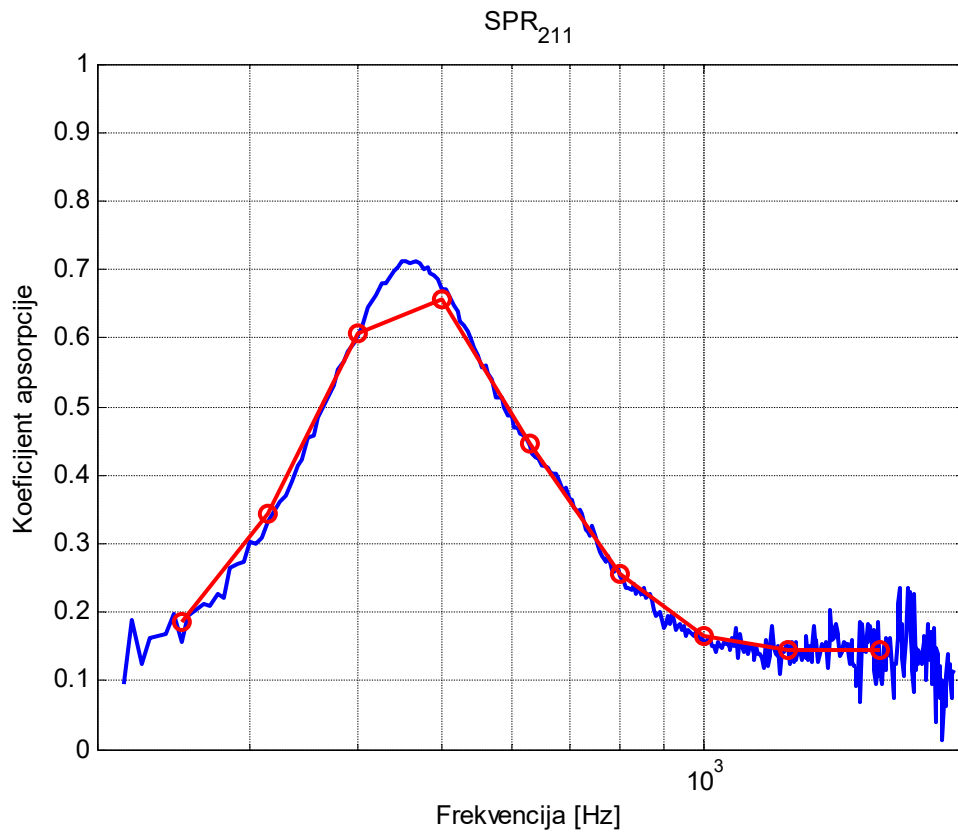
Слика П.1-44.



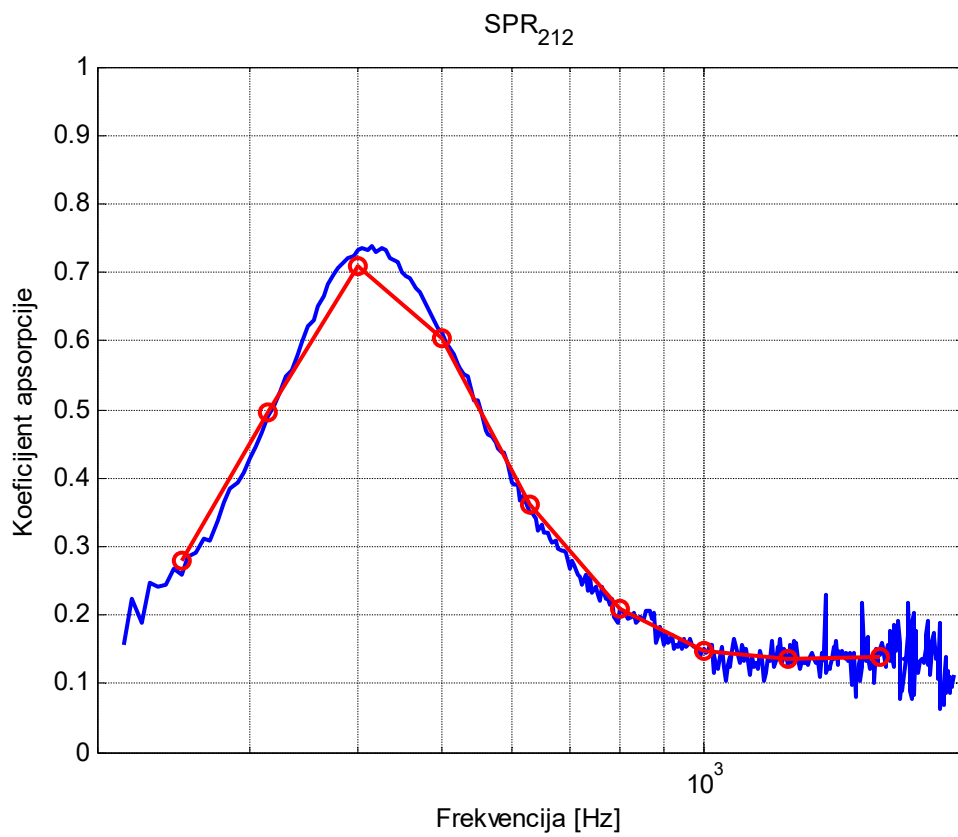
Слика П.1-45.



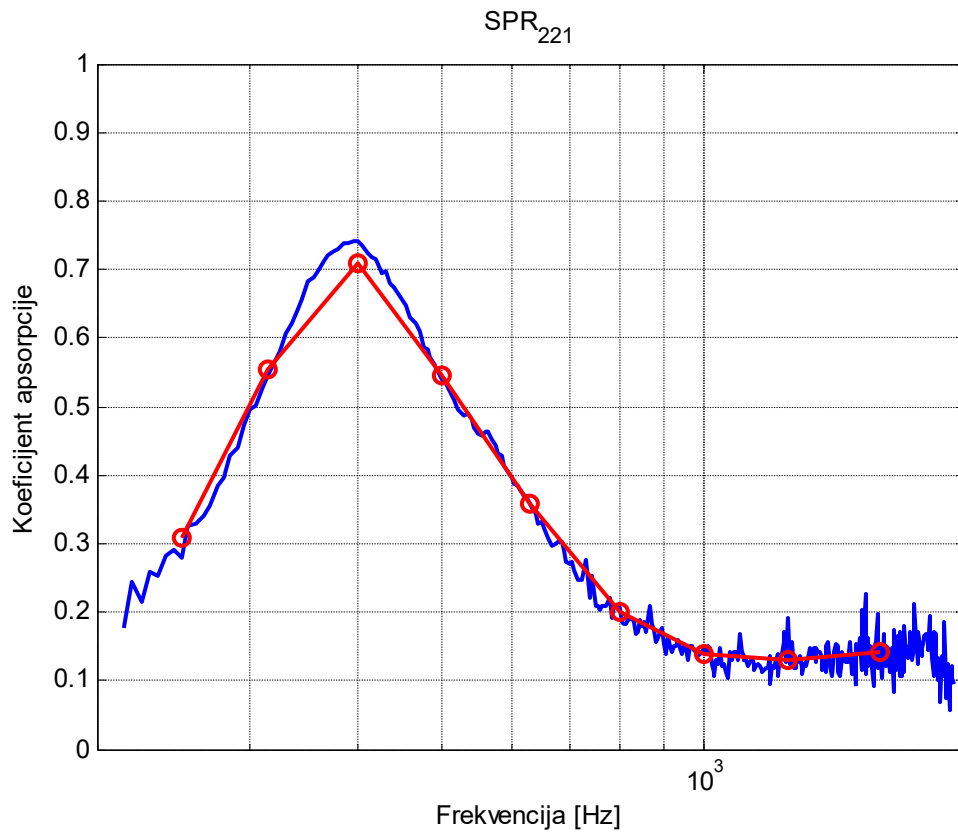
Слика П.1-46.



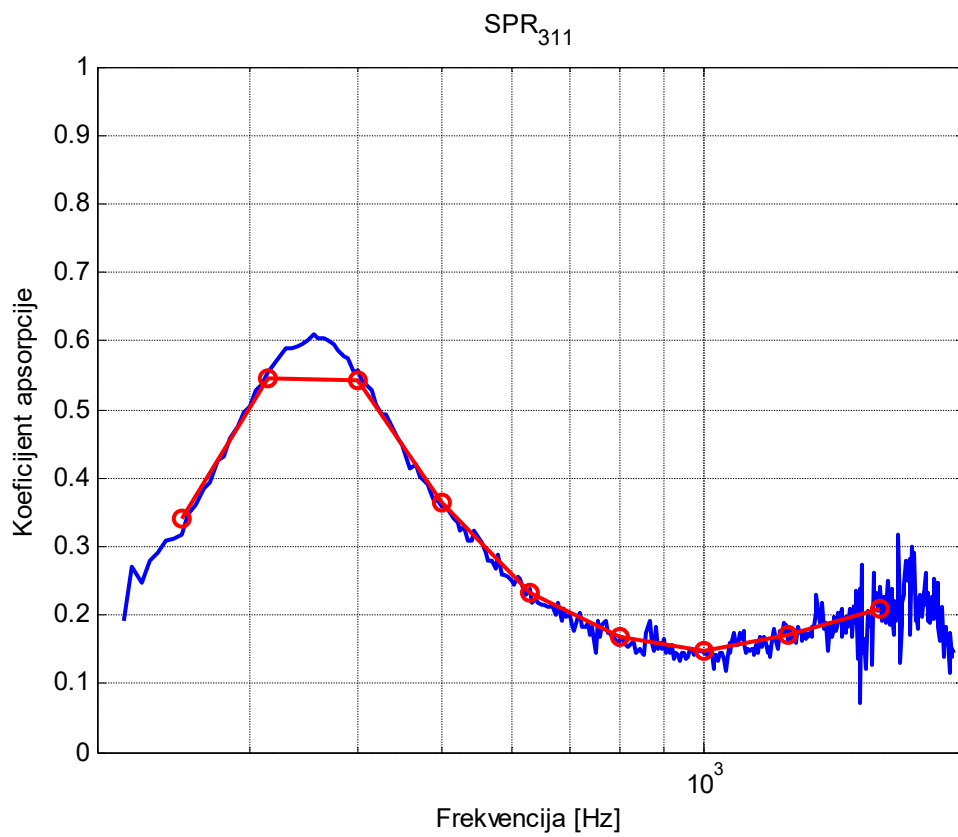
Слика П.1-47.



Слика П.1-48.

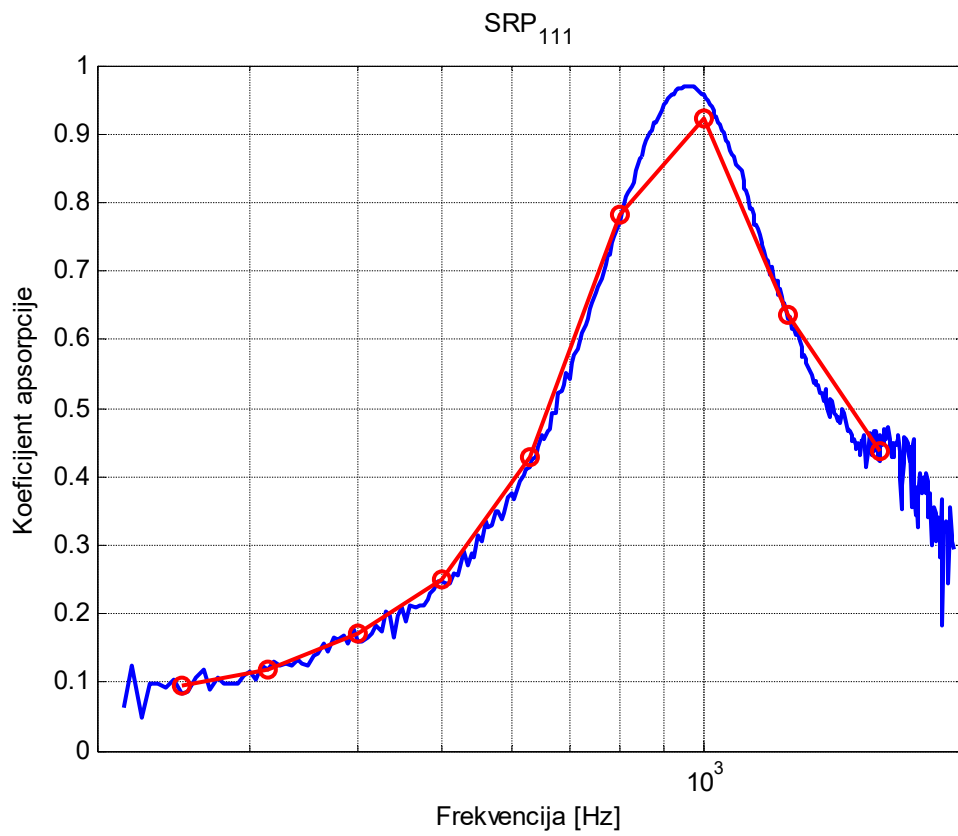


Слика П.1-49.

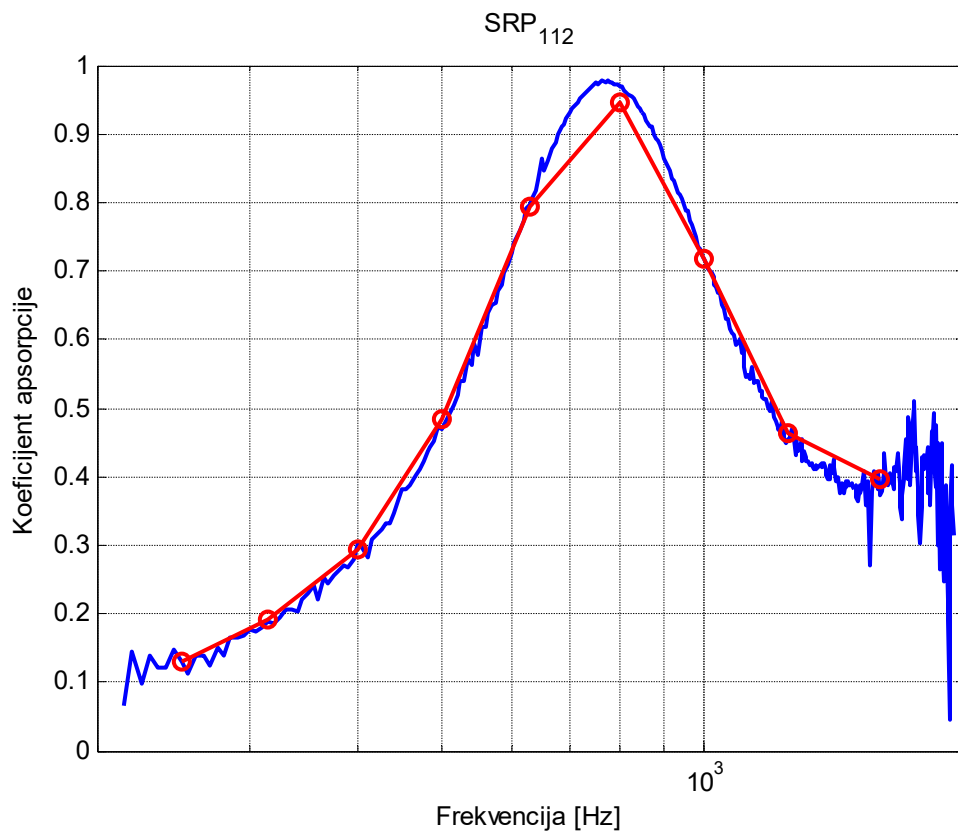


Слика П.1-50.

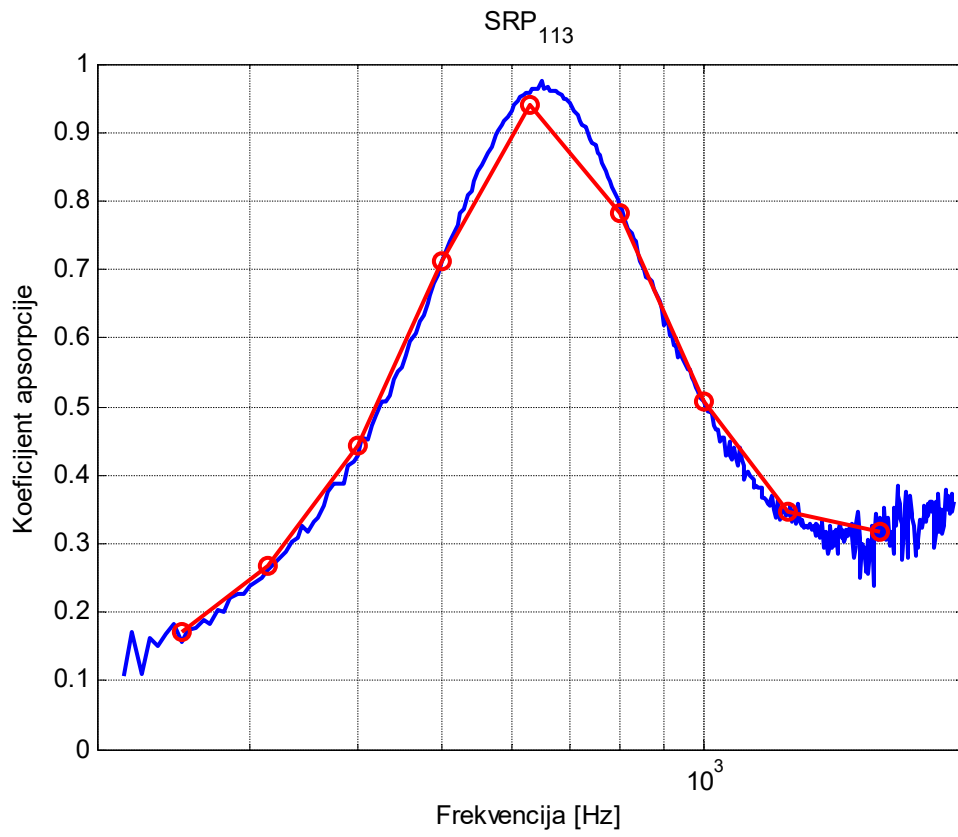
КОМБИНАЦИЈА SRP



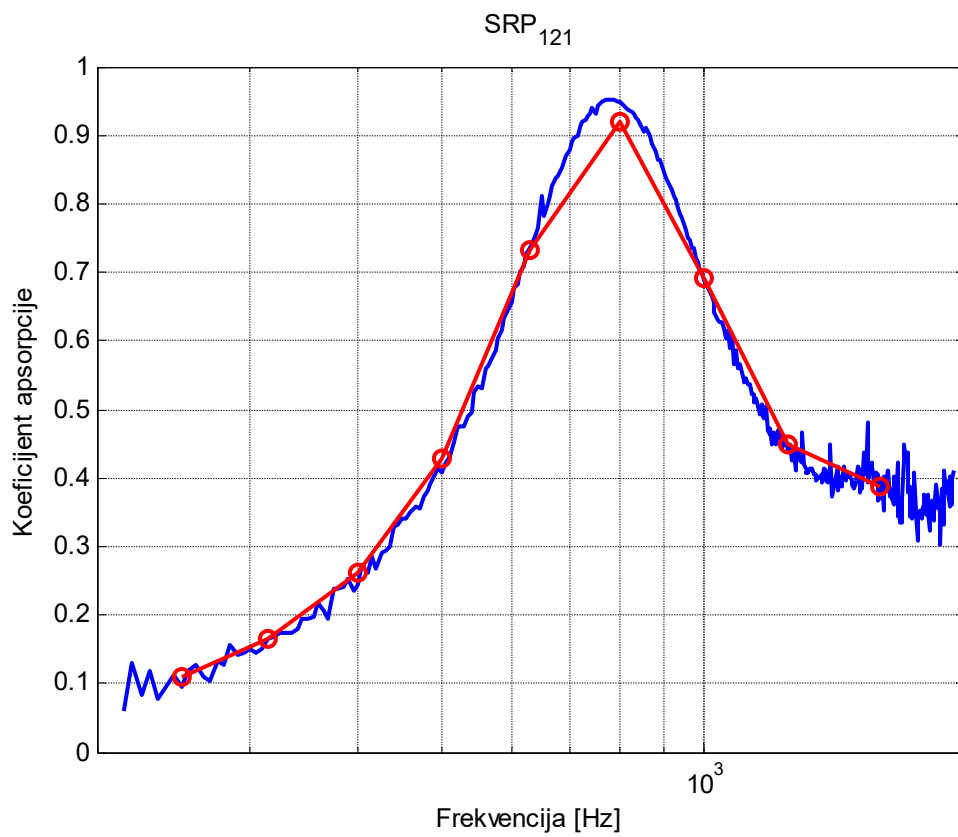
Слика П.1-51.



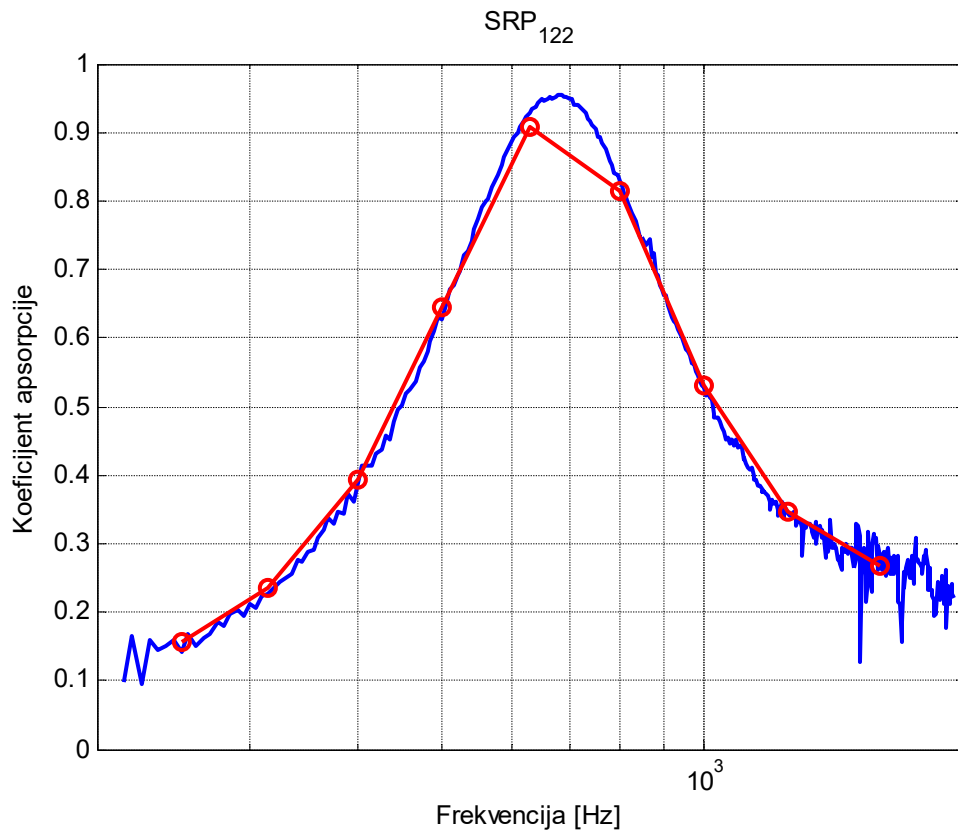
Слика П.1-52.



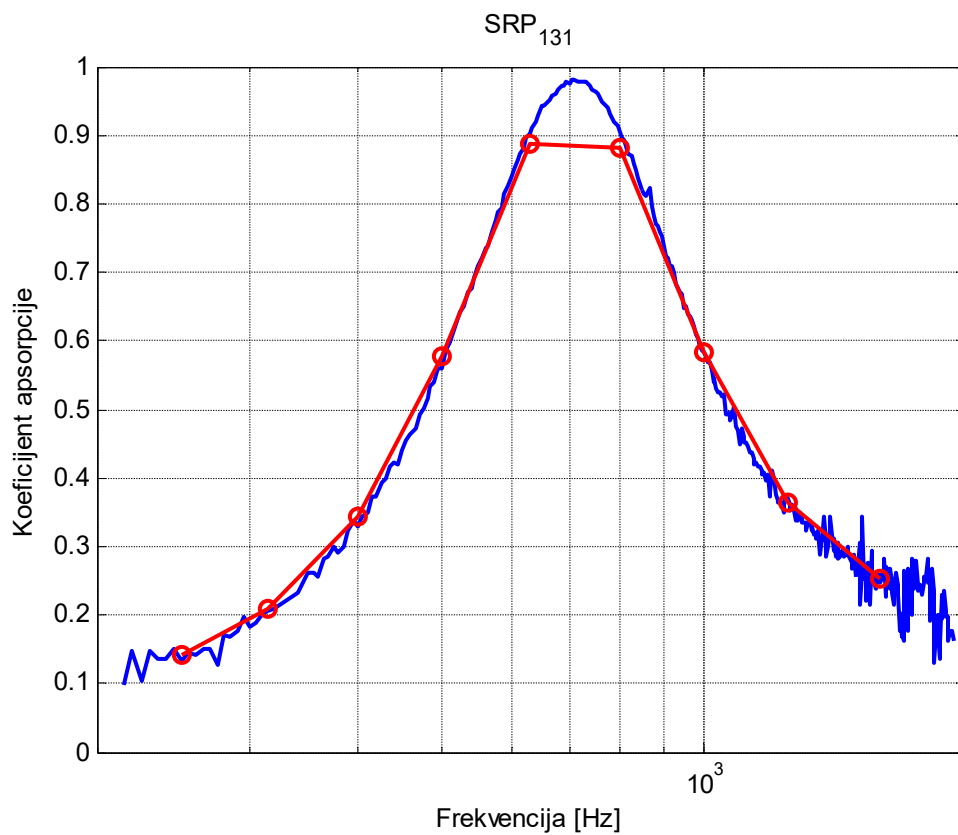
Слика П.1-53.



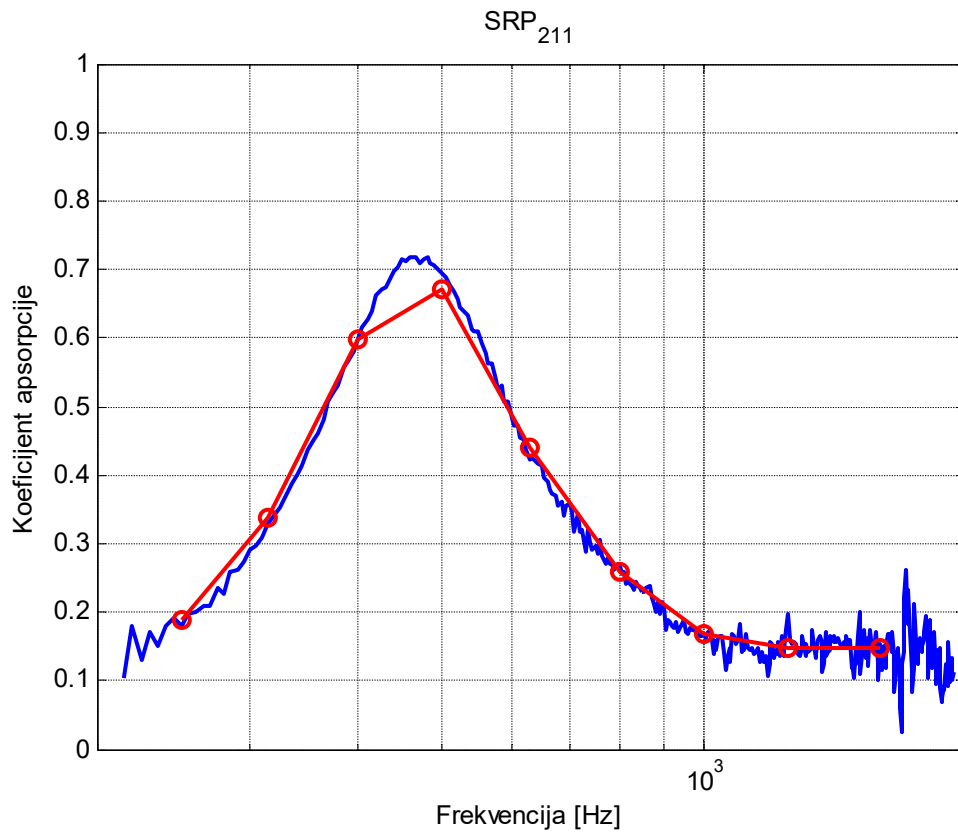
Слика П.1-54.



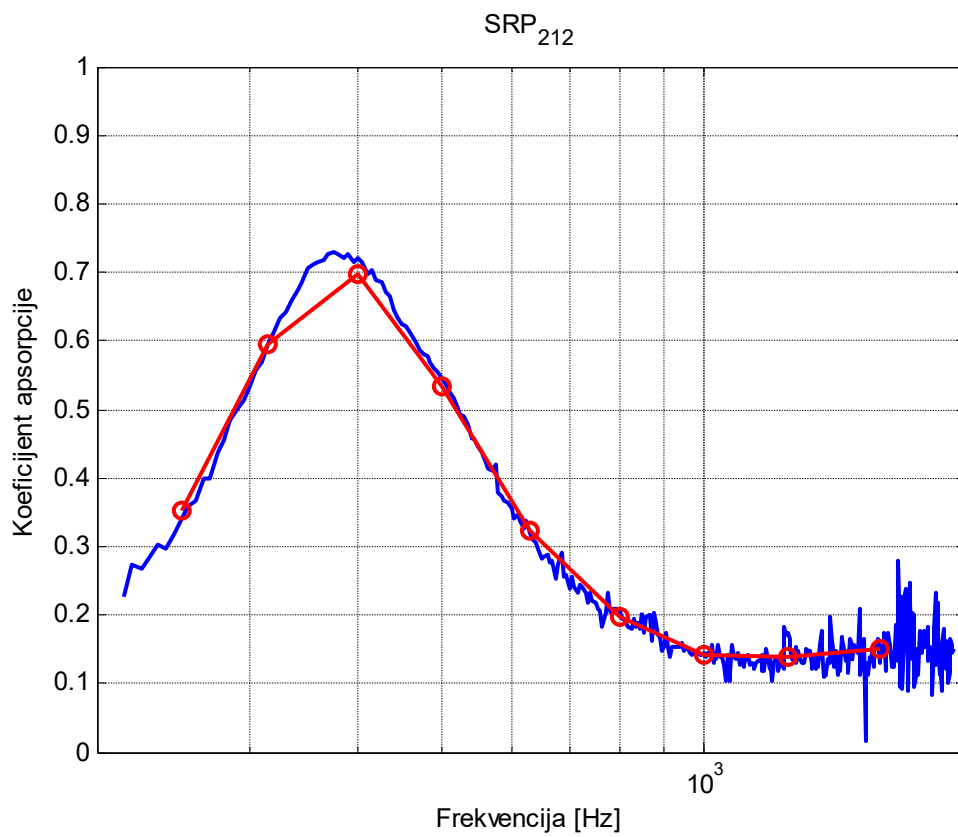
Слика П.1-55.



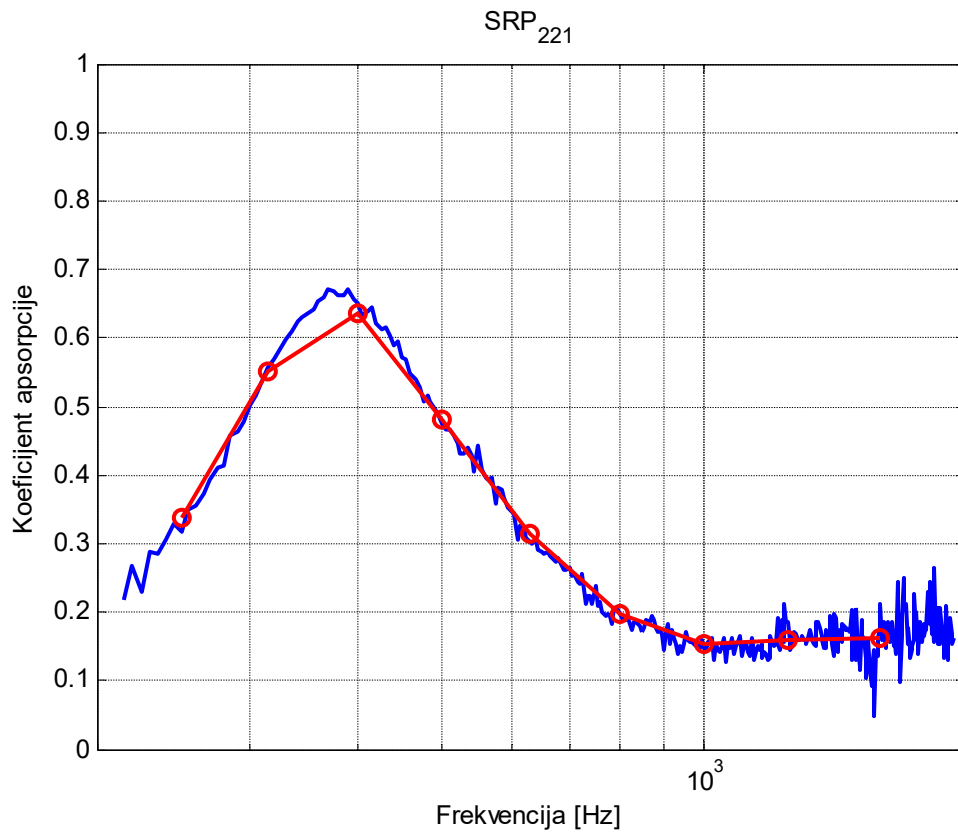
Слика П.1-56.



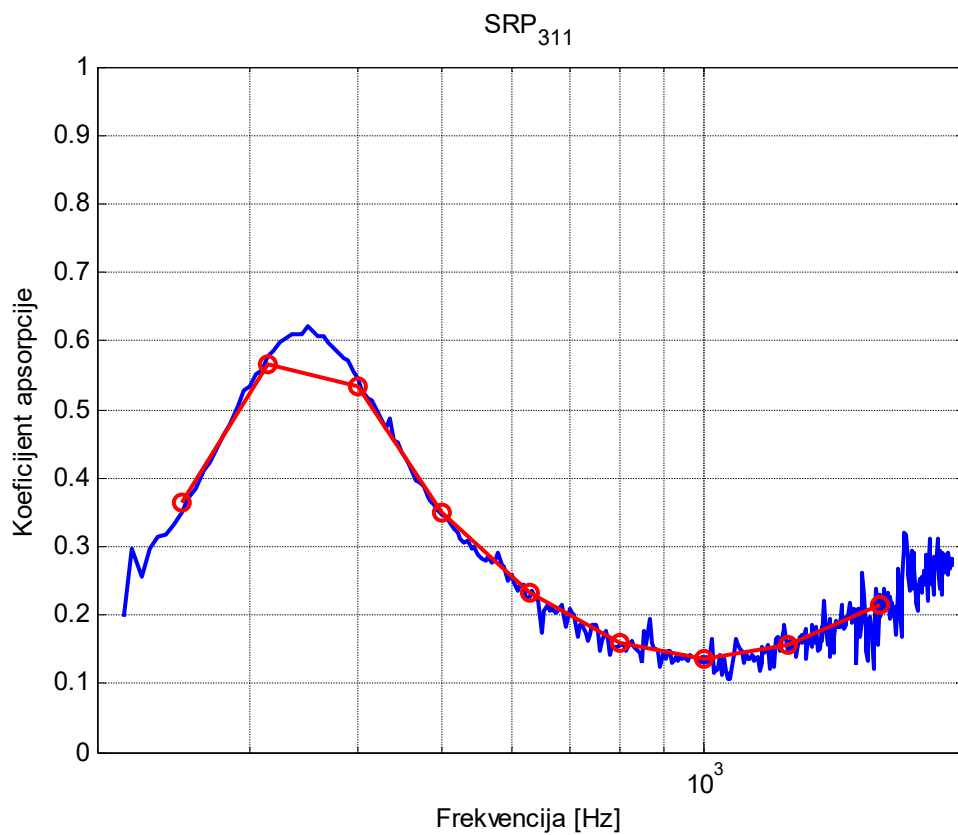
Слика П.1-57.



Слика П.1-58.



Слика П.1-59.



Слика П.1-60.

ПРИЛОГ 2

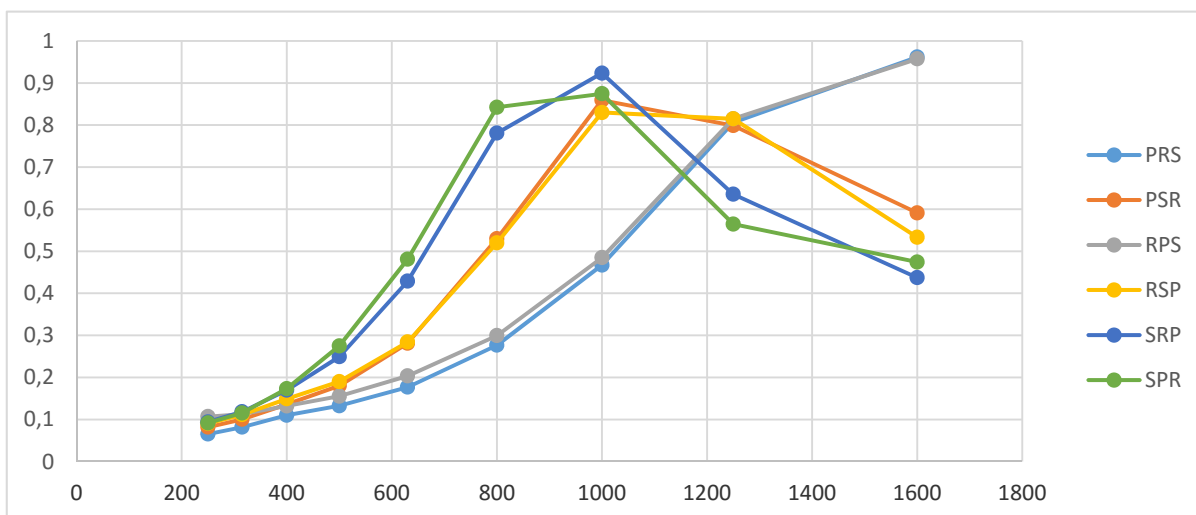
АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА АПСОРПЦИОНИХ СВОЈСТАВА КОМБИНАЦИЈЕ ВИШЕСЛОЈНИХ МАТЕРИЈАЛА

а. Анализа по дебљини материјала

ДЕБЉИНА „111“

Табела П.2-1. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „111“

	PRS	RPS	PSR	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	111	111	111	111	111	111
250	0.065403	0.106768	0.081669	0.090381	0.094124	0.091864
315	0.081754	0.112977	0.100337	0.111477	0.118329	0.115381
400	0.110151	0.132228	0.136019	0.149125	0.169697	0.173294
500	0.132488	0.15544	0.180264	0.189903	0.249146	0.274927
630	0.176941	0.203529	0.281283	0.284134	0.428847	0.480895
800	0.276618	0.299444	0.529618	0.519804	0.780862	0.842337
1000	0.466964	0.484799	0.859289	0.829825	0.923467	0.874502
1250	0.806442	0.814937	0.798673	0.814791	0.635481	0.564559
1600	0.961704	0.957445	0.591062	0.533044	0.437243	0.474362



Слика П.2-1. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „111“

КОМЕНТАР:

За дебљину вишеслојног апсорбера $d=30$ mm који се формира од истих дебљина три разнородна материјала ($d_i=10$ mm) се може уочити да на положај максимума коефицијента апсорпције утиче само редослед постављања песка.

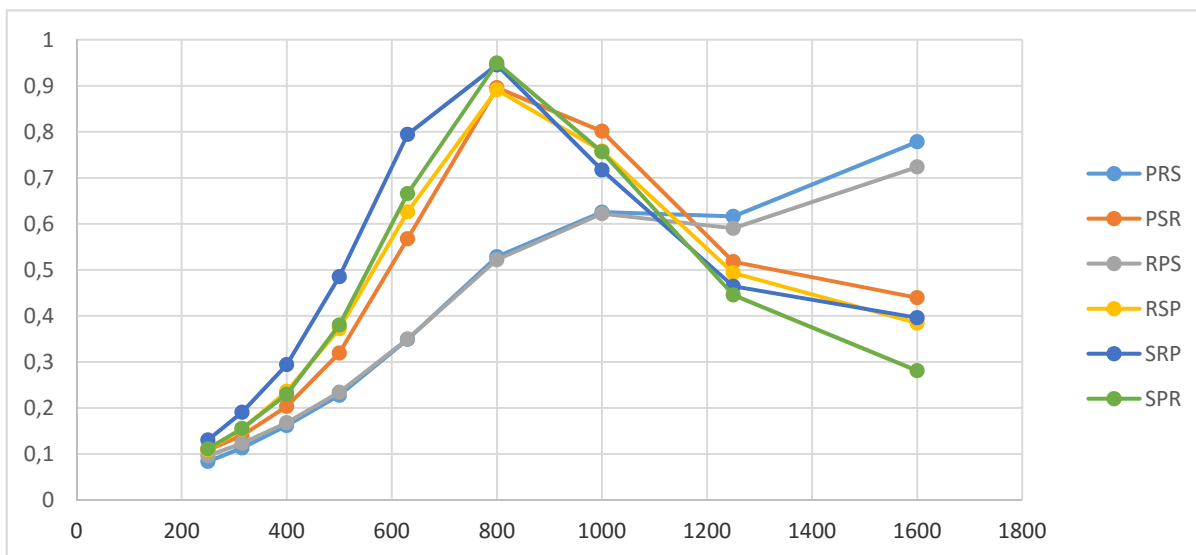
- Уколико се песак налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ($\alpha=0,9$) ће бити на фреквенцији од 1600 Hz.
- Уколико је слој песка у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ($\alpha=0,8-0,82$) ће бити на фреквенцијама од 1000 Hz до 1200 Hz.
- Уколико је слој песка на страни звучног извора (SRP и SPR) максимална вредност коефицијента апсорпције ($\alpha=0,82-0,87$) ће бити на фреквенцијама од 800 Hz до 1000 Hz.

Међусобни положај гуме и пластике у комбинацији са песком готово да нема битног утија на величину коефицијента апсорпције.

ДЕБЉИНА „112“

Табела П.2-2. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „112“

	PRS	RPS	PSR	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	112	112	112	112	112	112
250	0.083639	0.095832	0.108265	0.109246	0.130283	0.111374
315	0.113109	0.123076	0.139954	0.154183	0.190544	0.155239
400	0.161671	0.168097	0.203262	0.236061	0.294072	0.229831
500	0.227436	0.234078	0.319238	0.372028	0.485261	0.380207
630	0.349116	0.349637	0.567609	0.626084	0.794438	0.665741
800	0.52846	0.522123	0.895888	0.891147	0.945371	0.9495
1000	0.625431	0.622038	0.801311	0.758271	0.716981	0.756291
1250	0.61617	0.59035	0.517714	0.493398	0.464348	0.445422
1600	0.778313	0.723645	0.439507	0.384409	0.396053	0.280885



Слика П.2-2. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „112“

КОМЕНТАР:

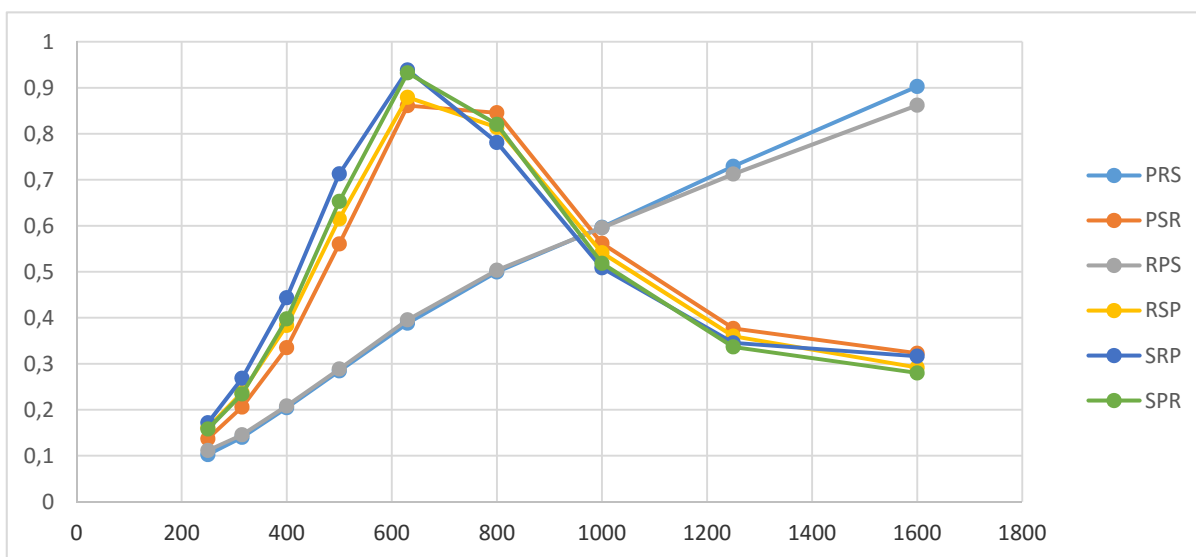
За комбинацију „112“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=40$ mm се може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=20$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцији од 1600 Hz, али је мања него за случај комбинације 111 ($\alpha=0,7 - 0,8$)
- Уколико је слој песка $d=10$ mm у средини (RSP и PSR) или испред звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 600 Hz до 1000 Hz ($\alpha=0,95$ за $f=800$ Hz).
- Дебљи слој гуме или пластике ($d=20$ mm) на супротној страни од звучног извора знатно повећава коефицијент апсорпције на фреквенцијама од 600 Hz до 1000 Hz.

ДЕБЉИНА „113“

Табела П.2-3. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „113“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	113	113	113	113	113	113
250	0.102374	0.136827	0.111479	0.160836	0.171469	0.157897
315	0.140086	0.205812	0.145393	0.237577	0.26832	0.234245
400	0.20422	0.334766	0.20825	0.383393	0.44348	0.397579
500	0.284213	0.56046	0.288417	0.61479	0.712759	0.652815
630	0.387935	0.861195	0.395575	0.879226	0.938814	0.932448
800	0.499513	0.84567	0.503391	0.81374	0.781098	0.820475
1000	0.59657	0.561643	0.59567	0.541328	0.508415	0.518403
1250	0.729277	0.376712	0.712378	0.359852	0.345386	0.336551
1600	0.902714	0.322843	0.861957	0.291786	0.316319	0.279959



Слика П.2-3. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „113“

КОМЕНТАР:

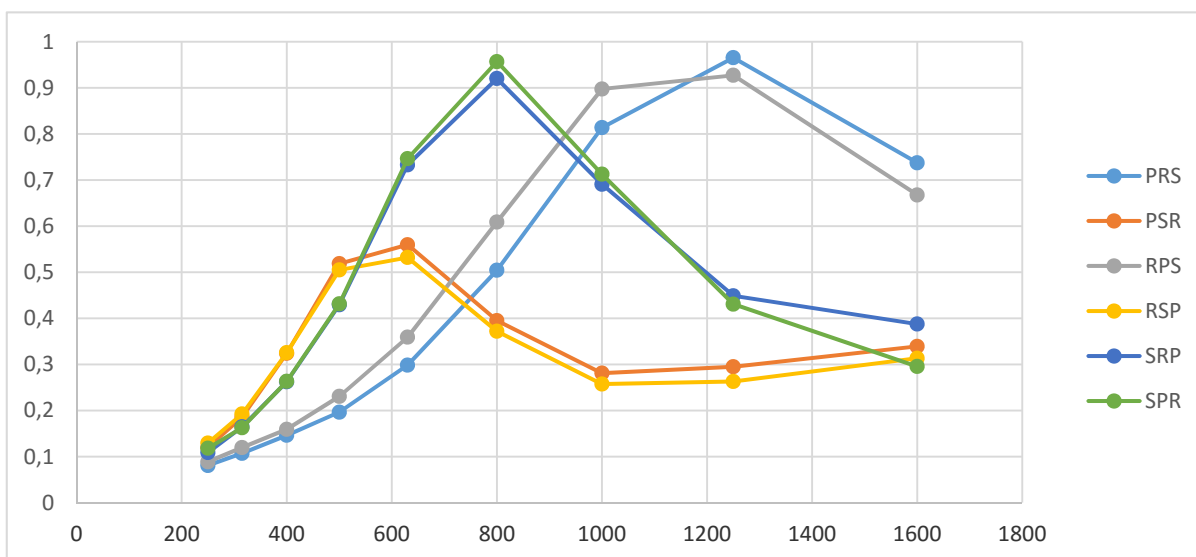
За комбинацију „113“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm се може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=30$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцији од 1600 Hz и има вредност $\alpha=0,85 - 0,90$).
- Уколико је слој песка $d=10$ mm у средини (RSP и PSR) или испред звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 500 Hz до 900 Hz ($\alpha=0,95$ за $f=600$ Hz).
- Слој гуме или пластике дебљине $d=30$ mm на супротној страни од звучног извора делује тако да се максимална вредност коефицијента апсорпције помера улево ($\alpha_{\max}=0,95$ за $f=600$ Hz).

ДЕБЉИНА „121“

Табела П.2-4. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „121“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	121	121	121	121	121	121
250	0.080623	0.119564	0.088654	0.129033	0.108541	0.118066
315	0.107004	0.185519	0.119554	0.192289	0.16458	0.162648
400	0.146149	0.324102	0.159129	0.325261	0.262326	0.26313
500	0.196237	0.518438	0.230513	0.504926	0.429278	0.431229
630	0.298362	0.559645	0.359079	0.531921	0.732947	0.746528
800	0.504182	0.395001	0.60897	0.371932	0.920295	0.95693
1000	0.813699	0.280838	0.897615	0.257213	0.690979	0.712679
1250	0.965368	0.294774	0.927215	0.2629	0.448764	0.430675
1600	0.737504	0.339055	0.667576	0.313358	0.387439	0.29555



Слика П.2-4. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „121“

КОМЕНТАР:

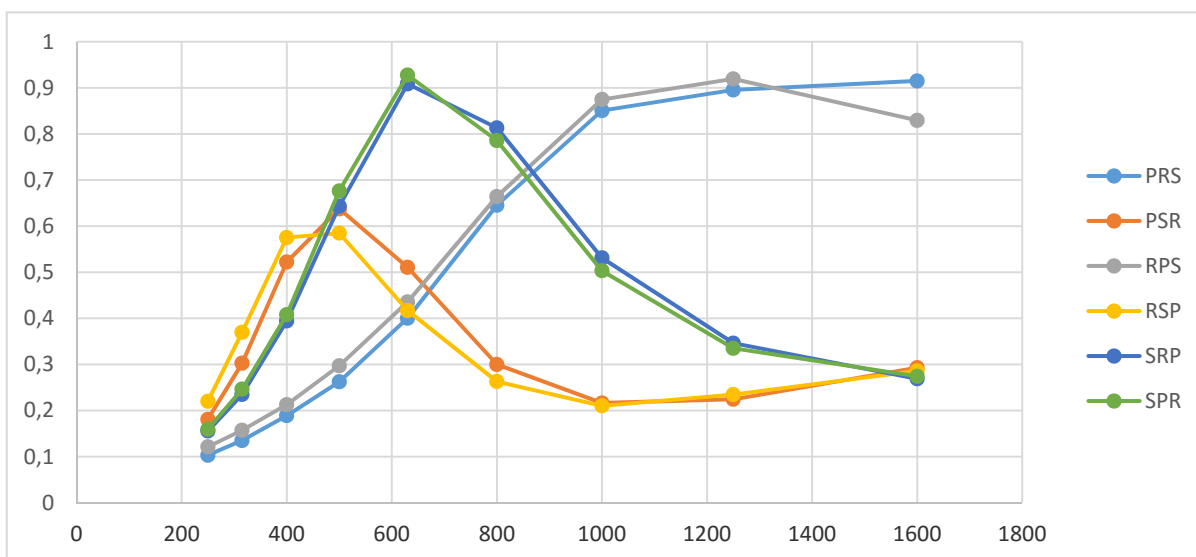
За комбинацију „121“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=40$ mm код којег је средњи слој дебљине $d=20$ mm се може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=10$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцији од 1250 Hz и има вредност $\alpha=0,87 - 0,89$.
- Уколико је слој песка $d=20$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 600 Hz до 1000 Hz ($\alpha=0,96-0,98$ за $f=800$ Hz).
- Уколико је слој песка $d=10$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 500 Hz до 630 Hz али је његова вредност знатно нижа ($\alpha=0,55$ за $f=630$ Hz).

ДЕБЉИНА „122“

Табела П.2-5. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „122“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	122	122	122	122	122	122
250	0.10295	0.180668	0.121103	0.219866	0.155588	0.159197
315	0.134761	0.302461	0.157036	0.369623	0.234629	0.246233
400	0.188832	0.522136	0.212603	0.575244	0.394276	0.407839
500	0.262137	0.637437	0.297084	0.584781	0.643315	0.676277
630	0.40014	0.510473	0.435674	0.416928	0.908591	0.927589
800	0.645387	0.299899	0.664176	0.262848	0.813204	0.785685
1000	0.850654	0.216103	0.874769	0.209952	0.530925	0.503161
1250	0.89539	0.224207	0.919373	0.234594	0.346077	0.334857
1600	0.914881	0.292929	0.82952	0.285847	0.268762	0.274081



Слика П.2-5. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „122“

КОМЕНТАР:

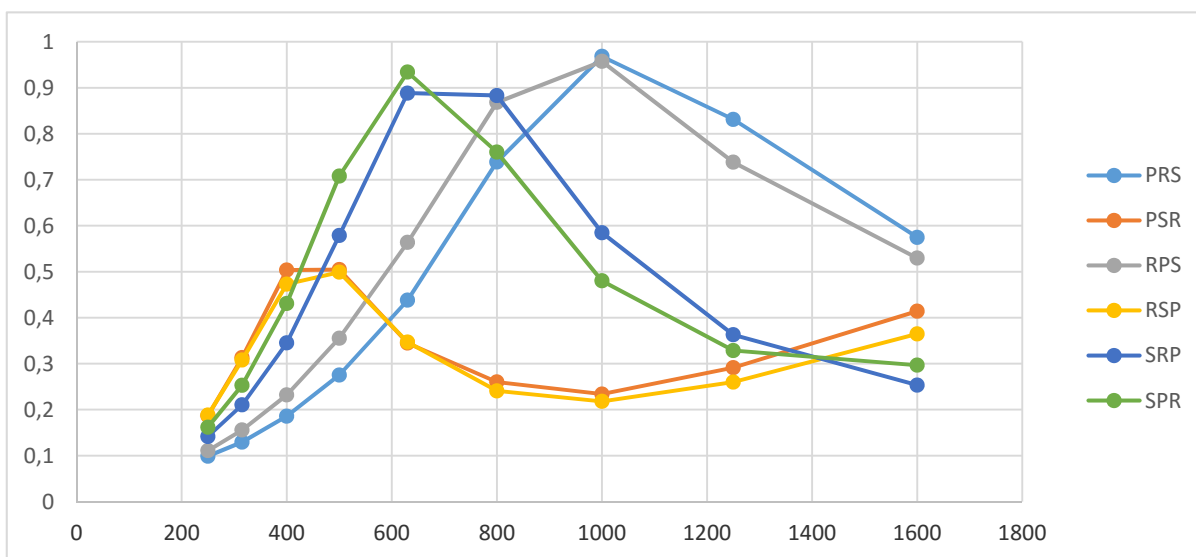
За комбинацију „122“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm код којег су први и средњи слој дебљине $d=20$ mm се може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=20$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 1000 Hz до 1600 Hz и има вредност $\alpha=0,85 - 0,92$.
- Уколико је слој песка $d=20$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 500 Hz до 800 Hz ($\alpha_{\max}=0,92$ за $f=630$ Hz).
- Уколико је слој песка $d=10$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 400 Hz до 500 Hz али је његова вредност знатно нижа ($\alpha=0,58$).

ДЕБЉИНА „131“

Табела П.2-6. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „131“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	131	131	131	131	131	131
250	0.098721	0.186553	0.110791	0.188088	0.141507	0.161804
315	0.12938	0.313087	0.155584	0.308003	0.210258	0.252918
400	0.185818	0.503427	0.231911	0.472905	0.344945	0.430779
500	0.275265	0.504423	0.355352	0.498895	0.578598	0.707946
630	0.438007	0.344683	0.563688	0.346768	0.888206	0.934084
800	0.738579	0.260038	0.868261	0.240777	0.88299	0.760045
1000	0.968178	0.233858	0.957342	0.218	0.584639	0.480047
1250	0.831239	0.291207	0.738118	0.259906	0.362831	0.328428
1600	0.574606	0.414196	0.52946	0.364652	0.253346	0.296565



Слика П.2-6. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „131“

КОМЕНТАР:

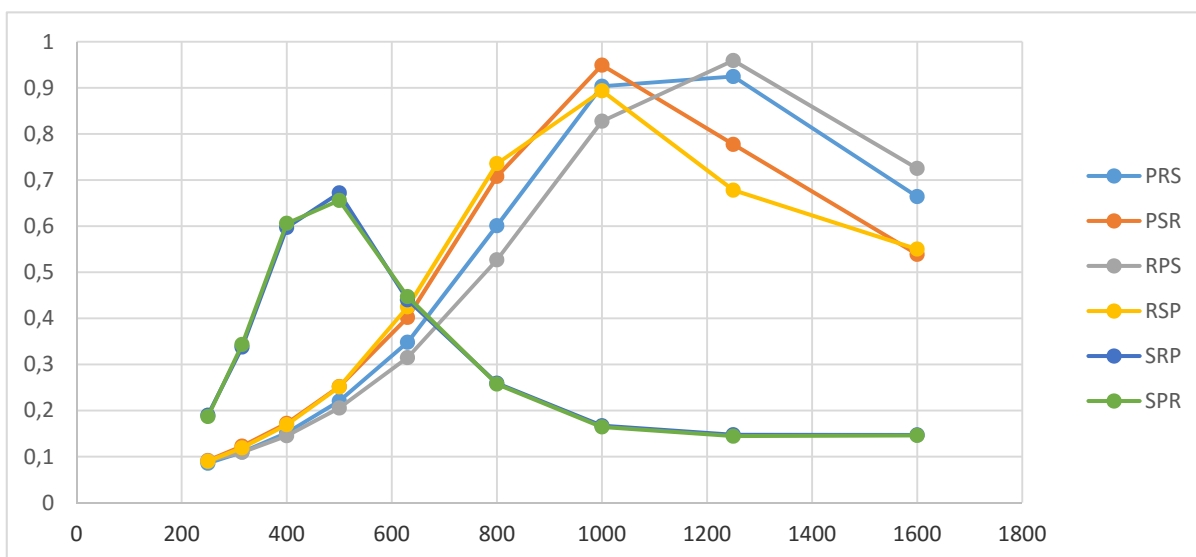
За комбинацију „131“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm код којег је средњи слој дебљине $d=30$ mm се може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=10$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 800 Hz до 1250 Hz и има вредност $\alpha=0,80 - 0,95$.
- Уколико је слој песка $d=30$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 630 Hz до 800 Hz ($\alpha_{\max}=0,92$ за $f=630$ Hz).
- Уколико је слој песка $d=10$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 400 Hz до 500 Hz али је његова вредност знатно нижа ($\alpha=0,50$).

ДЕБЉИНА „211“

Табела П.2-7. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „211“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	211	211	211	211	211	211
250	0.085545	0.0913	0.090342	0.089672	0.18979	0.186698
315	0.109738	0.122553	0.109226	0.118795	0.337431	0.343195
400	0.151636	0.172016	0.145023	0.169059	0.597172	0.606062
500	0.2202	0.251937	0.205261	0.251015	0.671976	0.655882
630	0.347841	0.401837	0.314706	0.424719	0.440179	0.446846
800	0.601005	0.707774	0.52683	0.735541	0.259045	0.25725
1000	0.903528	0.949266	0.827615	0.893654	0.16683	0.164202
1250	0.924651	0.777373	0.959362	0.678036	0.147223	0.144251
1600	0.663934	0.538716	0.725034	0.550119	0.146744	0.145836



Слика П.2-7. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „211“

КОМЕНТАР:

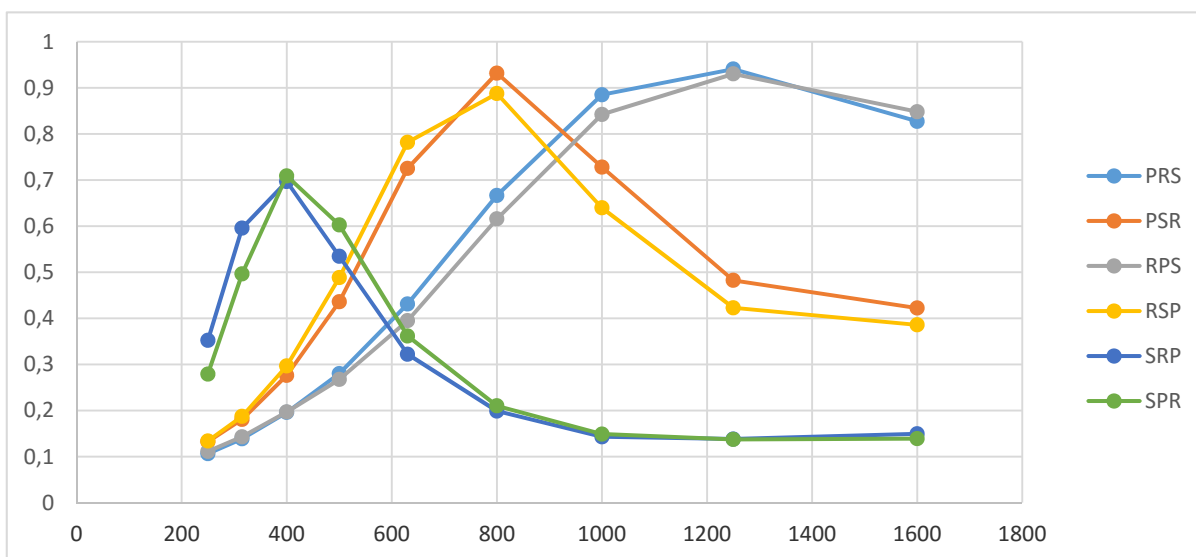
За комбинацију „211“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=40$ mm код којег је слој дебљине $d=20$ mm на страни звучног изворасе може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=10$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 1000 Hz до 1400 Hz и има максималну вредност $\alpha_{\max}=0,95$ за $F=1250$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=10$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 800 Hz до 1250 Hz ($\alpha_{\max}=0,95$ за $f=1000$ Hz).
- Уколико је слој песка $d=20$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 400 Hz до 500 Hz и има вредност $\alpha=0,60-0,65$.

ДЕБЉИНА „212“

Табела П.2-8. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „212“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	212	212	212	212	212	212
250	0.106216	0.132196	0.111065	0.133738	0.352064	0.278946
315	0.138526	0.180645	0.142801	0.18722	0.595701	0.496373
400	0.195734	0.276223	0.196845	0.29666	0.696827	0.708933
500	0.280052	0.435778	0.267403	0.488176	0.534554	0.602754
630	0.431139	0.725208	0.394788	0.781895	0.322016	0.361684
800	0.666616	0.931884	0.615754	0.887657	0.198694	0.209997
1000	0.885125	0.728086	0.842352	0.639584	0.142811	0.148761
1250	0.940825	0.482283	0.930331	0.422744	0.137964	0.13703
1600	0.827478	0.422213	0.848212	0.385812	0.149249	0.138836



Слика П.2-8. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „212“

КОМЕНТАР:

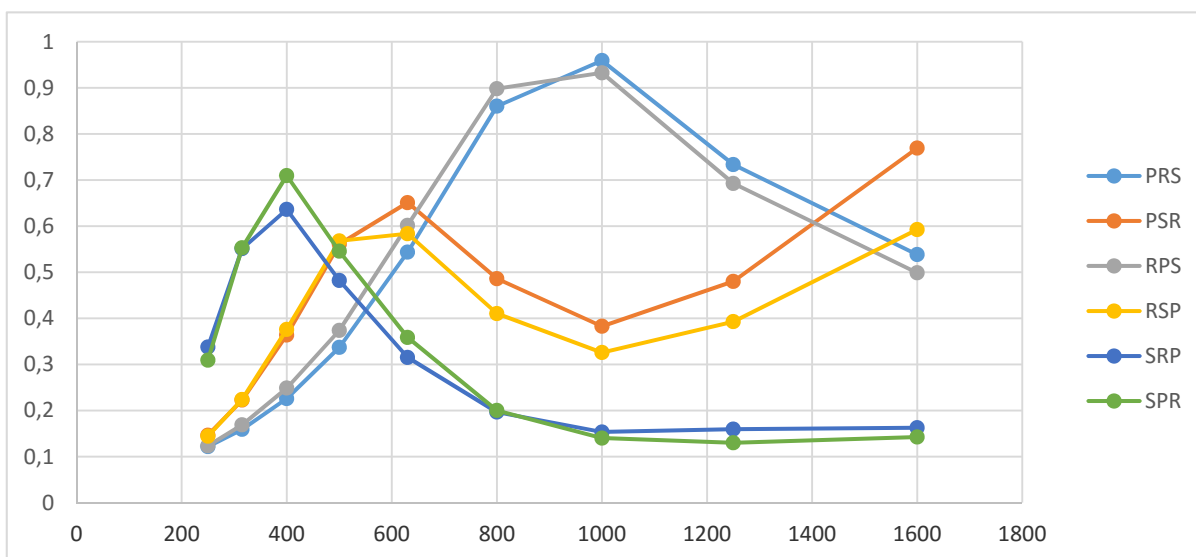
За комбинацију „212“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm код којег је слој дебљине $d=10$ mm у средини, може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=20$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 1000 Hz до 1600 Hz и има максималну вредност $\alpha_{\max}=0,95$ за $F=1250$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=10$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 630 Hz до 1000 Hz ($\alpha_{\max}=0,94$ за $f=800$ Hz).
- Уколико је слој песка $d=20$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 250 Hz до 500 Hz и има вредност $\alpha=0,60-0,70$.

ДЕБЉИНА „221“

Табела П.2-9. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „221“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	221	221	221	221	221	221
250	0.121446	0.146381	0.123121	0.144091	0.337482	0.308975
315	0.158972	0.222613	0.168659	0.223713	0.551147	0.552949
400	0.225828	0.363697	0.248641	0.37582	0.636251	0.70971
500	0.336752	0.560824	0.3736	0.56791	0.48215	0.545569
630	0.543413	0.650883	0.601695	0.583497	0.315116	0.358449
800	0.860206	0.486012	0.898325	0.410273	0.196443	0.199947
1000	0.959211	0.382604	0.932609	0.325772	0.153309	0.14007
1250	0.733616	0.480055	0.692707	0.392722	0.159376	0.129855
1600	0.538263	0.769476	0.498586	0.592546	0.162505	0.142329



Слика П.2-9. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „221“

КОМЕНТАР:

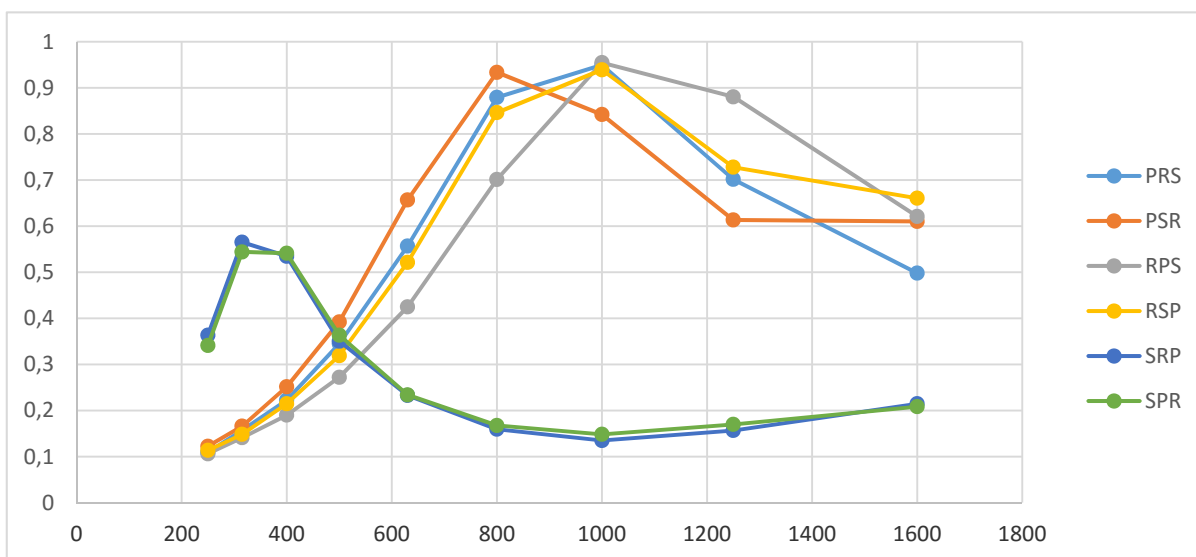
За комбинацију „221“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm код којег је слој дебљине $d=10$ mm на супротној страни од звучног извора, може уочити следеће:

- Уколико се песак дебљине $d=10$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 800 Hz до 1250 Hz и има максималну вредност $\alpha_{\max}=0,95$ за $F=1000$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=20$ mm у средини (RSP и PSR) коефицијента апсорпције има два максимума. Први максимум је $\alpha_{\max1}=0,65$ за $f=630$ Hz а други $\alpha_{\max2}=0,78$ за $f=1600$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=20$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 315 Hz до 500 Hz и има вредност $\alpha=0,58-0,70$.

ДЕБЉИНА „311“

Табела П.2-10. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „311“

	PRS	PSR	RPS	RSP	SRP	SPR
fc [Hz]	311	311	311	311	311	311
250	0.109018	0.122403	0.106029	0.113521	0.363411	0.341122
315	0.156758	0.166008	0.140946	0.148196	0.565124	0.544013
400	0.222475	0.251542	0.189917	0.214724	0.534523	0.541079
500	0.344792	0.392158	0.272106	0.318959	0.350532	0.363356
630	0.556751	0.656865	0.42488	0.521359	0.232701	0.233807
800	0.879372	0.933682	0.701349	0.84631	0.159239	0.16754
1000	0.949759	0.842235	0.954742	0.939215	0.134863	0.148144
1250	0.701428	0.613334	0.8805	0.727955	0.156527	0.169785
1600	0.497876	0.61012	0.62097	0.66044	0.214596	0.20832



Слика П.2-10. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију „311“

КОМЕНТАР:

За комбинацију „311“ вишеслојног апсорбера укупне дебљине $d=50$ mm код којег је слој дебљине $d=30$ mm на страни звучног извора, може уочити следеће:

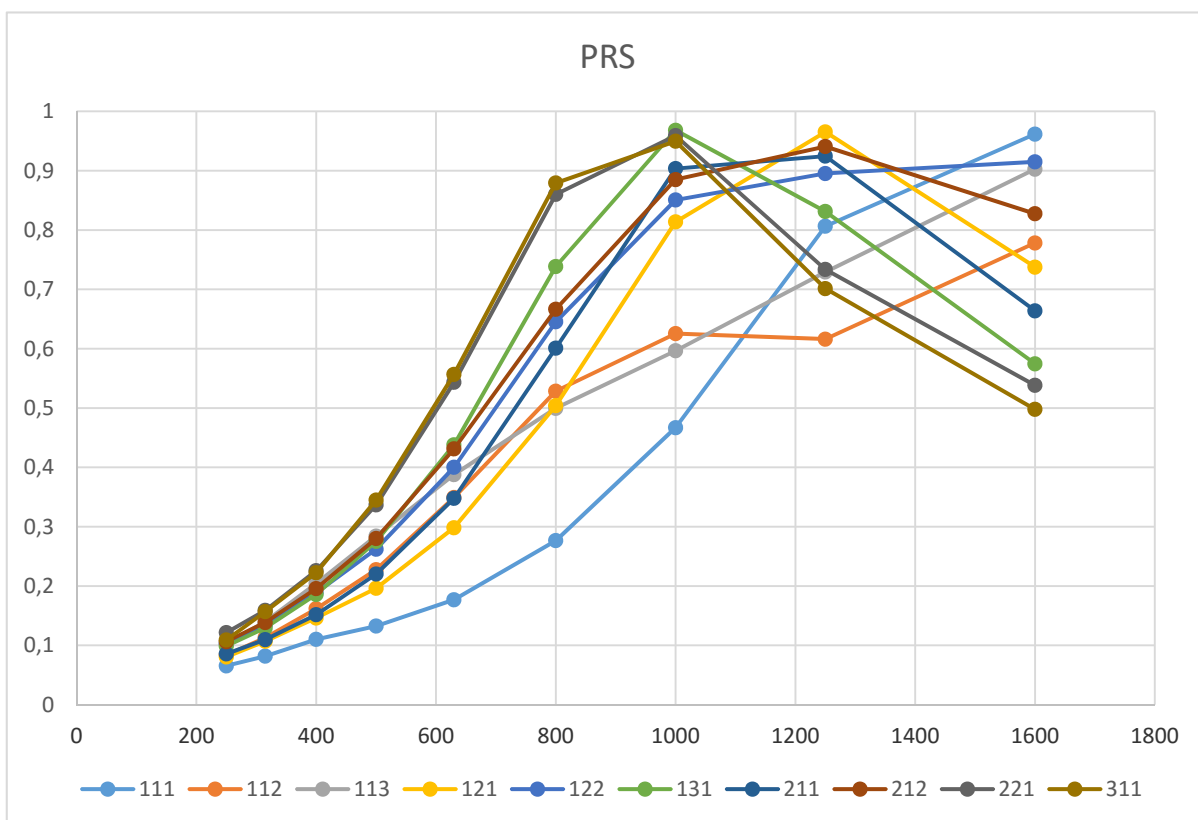
- Уколико се песак дебљине $d=10$ mm налази на супротној страни звучног извора (PRS и RPS) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 800 Hz до 1250 Hz и има максималну вредност $\alpha_{\max}=0,95$ за $F=1000$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=10$ mm у средини (RSP и PSR) максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити у фреквентном интервалу од 700 Hz до 1200 Hz и има максималну вредност $\alpha_{\max}=0,95$ за $f_1=800$ Hz и $f_2=1000$ Hz.
- Уколико је слој песка $d=30$ mm на страни звучног извора (SRP и SPR), максимална вредност коефицијента апсорпције ће бити на фреквенцијама од 250 Hz до 315 Hz и има вредност $\alpha=0,55-0,58$.

б. АНАЛИЗА ПО РЕДОСЛЕДУ СЛАГАЊА МАТЕРИЈАЛА

РЕДОСЛЕД PRS

Табела П.2-11. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију PRS

	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS	PRS
fc [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.065403	0.083639	0.102374	0.080623	0.10295	0.098721	0.085545	0.106216	0.121446	0.109018
315	0.081754	0.113109	0.140086	0.107004	0.134761	0.12938	0.109738	0.138526	0.158972	0.156758
400	0.110151	0.161671	0.20422	0.146149	0.188832	0.185818	0.151636	0.195734	0.225828	0.222475
500	0.132488	0.227436	0.284213	0.196237	0.262137	0.275265	0.2202	0.280052	0.336752	0.344792
630	0.176941	0.349116	0.387935	0.298362	0.40014	0.438007	0.347841	0.431139	0.543413	0.556751
800	0.276618	0.52846	0.499513	0.504182	0.645387	0.738579	0.601005	0.666616	0.860206	0.879372
1000	0.466964	0.625431	0.59657	0.813699	0.850654	0.968178	0.903528	0.885125	0.959211	0.949759
1250	0.806442	0.61617	0.729277	0.965368	0.89539	0.831239	0.924651	0.940825	0.733616	0.701428
1600	0.961704	0.778313	0.902714	0.737504	0.914881	0.574606	0.663934	0.827478	0.538263	0.497876

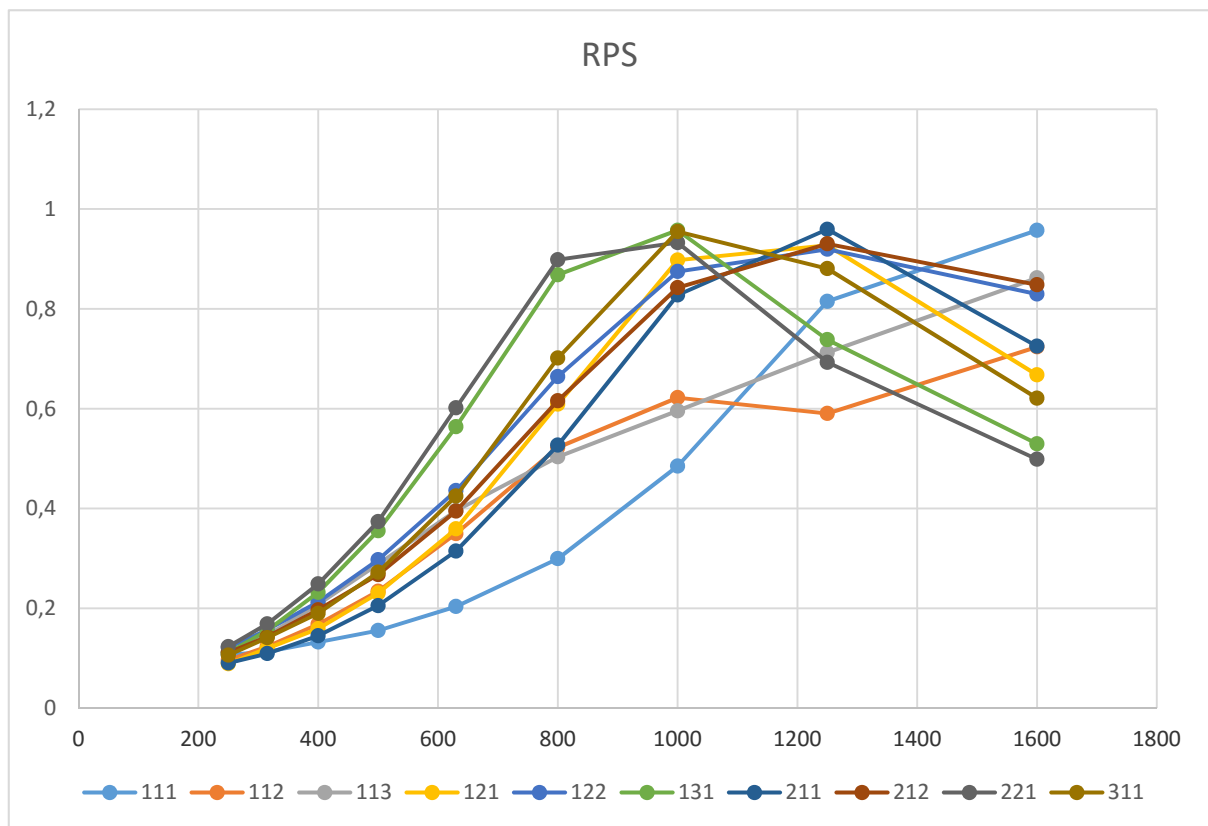


Слика П.2-11. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију PRS

РЕДОСЛЕД RPS

Табела П.2-12. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију RPS

	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS	RPS
fc [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.106768	0.095832	0.111479	0.088654	0.121103	0.110791	0.090342	0.111065	0.123121	0.106029
315	0.112977	0.123076	0.145393	0.119554	0.157036	0.155584	0.109226	0.142801	0.168659	0.140946
400	0.132228	0.168097	0.20825	0.159129	0.212603	0.231911	0.145023	0.196845	0.248641	0.189917
500	0.15544	0.234078	0.288417	0.230513	0.297084	0.355352	0.205261	0.267403	0.3736	0.272106
630	0.203529	0.349637	0.395575	0.359079	0.435674	0.563688	0.314706	0.394788	0.601695	0.42488
800	0.299444	0.522123	0.503391	0.60897	0.664176	0.868261	0.52683	0.615754	0.898325	0.701349
1000	0.484799	0.622038	0.59567	0.897615	0.874769	0.957342	0.827615	0.842352	0.932609	0.954742
1250	0.814937	0.59035	0.712378	0.927215	0.919373	0.738118	0.959362	0.930331	0.692707	0.8805
1600	0.957445	0.723645	0.861957	0.667576	0.82952	0.52946	0.725034	0.848212	0.498586	0.62097

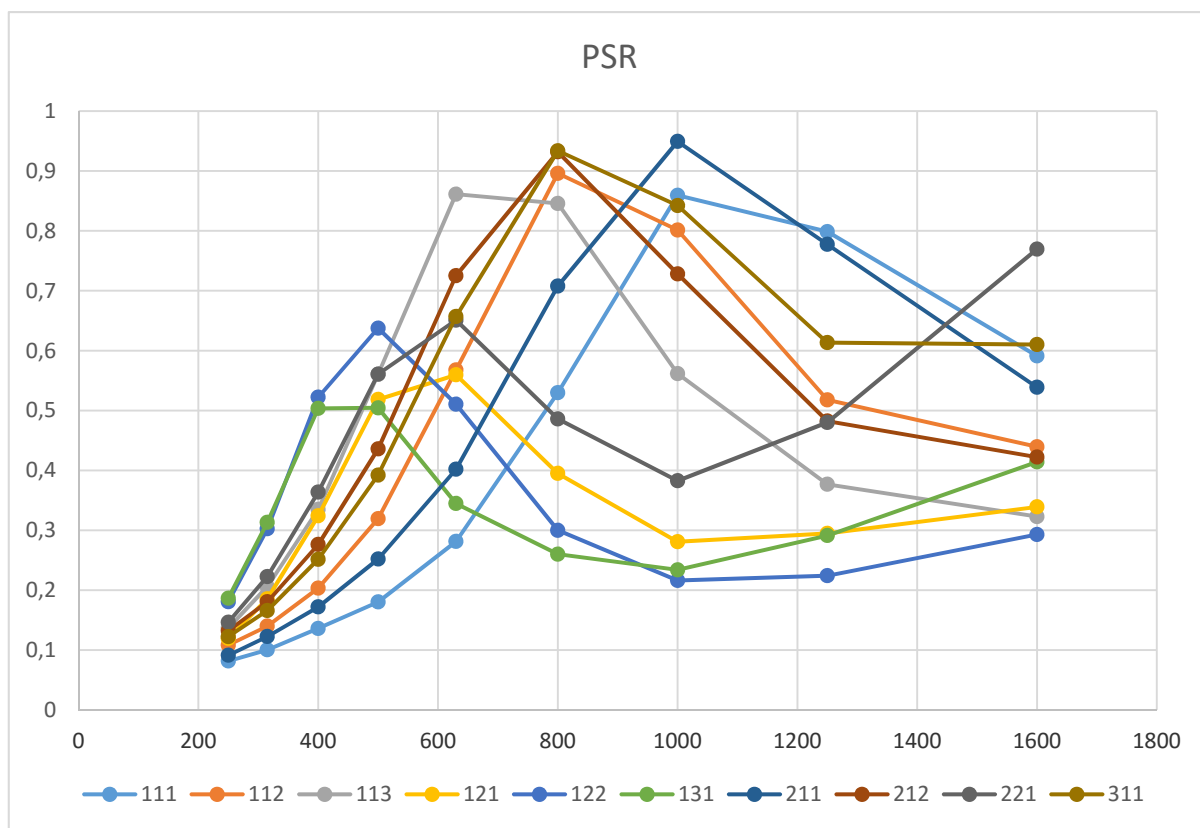


Слика П.2-12. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију RPS

РЕДОСЛЕД PSR

Табела П.2-13. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију PSR

	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR	PSR
fc [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.081669	0.108265	0.136827	0.119564	0.180668	0.186553	0.0913	0.132196	0.146381	0.122403
315	0.100337	0.139954	0.205812	0.185519	0.302461	0.313087	0.122553	0.180645	0.222613	0.166008
400	0.136019	0.203262	0.334766	0.324102	0.522136	0.503427	0.172016	0.276223	0.363697	0.251542
500	0.180264	0.319238	0.56046	0.518438	0.637437	0.504423	0.251937	0.435778	0.560824	0.392158
630	0.281283	0.567609	0.861195	0.559645	0.510473	0.344683	0.401837	0.725208	0.650883	0.656865
800	0.529618	0.895888	0.84567	0.395001	0.299899	0.260038	0.707774	0.931884	0.486012	0.933682
1000	0.859289	0.801311	0.561643	0.280838	0.216103	0.233858	0.949266	0.728086	0.382604	0.842235
1250	0.798673	0.517714	0.376712	0.294774	0.224207	0.291207	0.777373	0.482283	0.480055	0.613334
1600	0.591062	0.439507	0.322843	0.339055	0.292929	0.414196	0.538716	0.422213	0.769476	0.61012

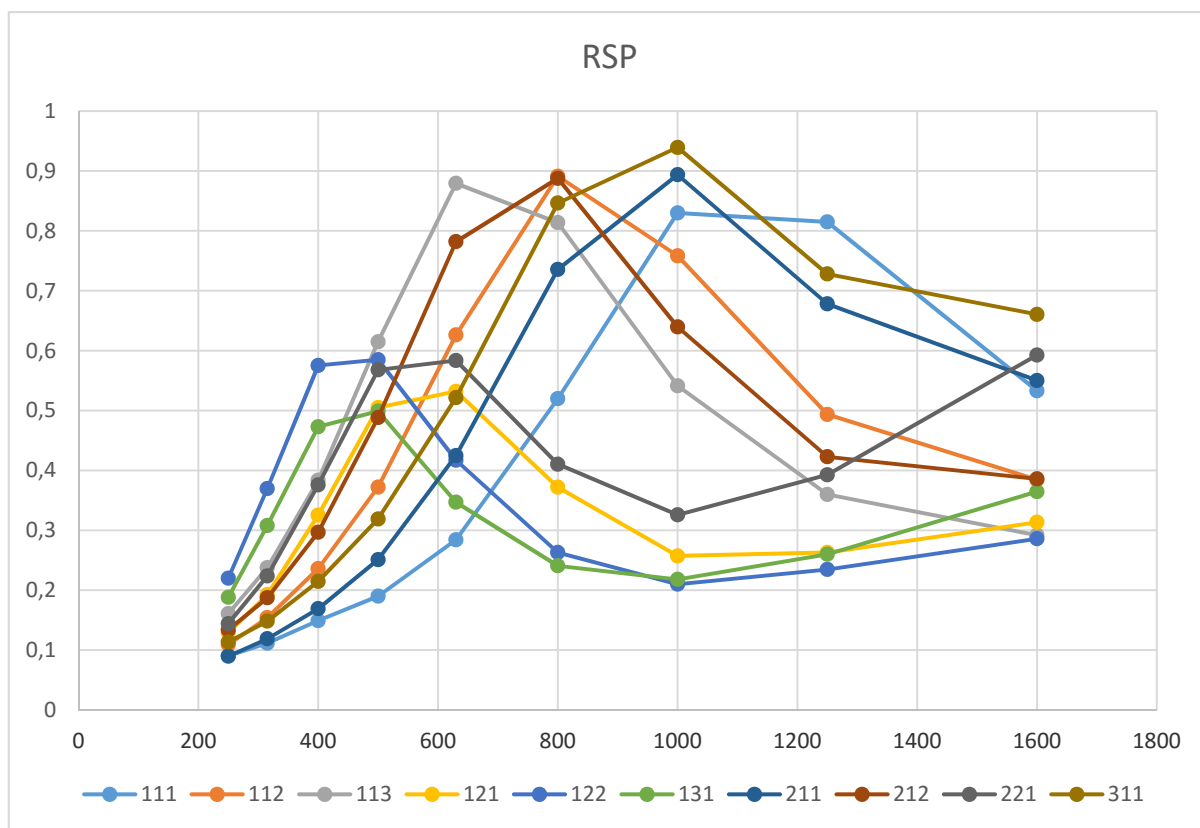


Слика П.2-13. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију PSR

РЕДОСЛЕД RSP

Табела П.2-14. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију RSP

	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP	RSP
fc [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.090381	0.109246	0.160836	0.129033	0.219866	0.188088	0.089672	0.133738	0.144091	0.113521
315	0.111477	0.154183	0.237577	0.192289	0.369623	0.308003	0.118795	0.18722	0.223713	0.148196
400	0.149125	0.236061	0.383393	0.325261	0.575244	0.472905	0.169059	0.29666	0.37582	0.214724
500	0.189903	0.372028	0.61479	0.504926	0.584781	0.498895	0.251015	0.488176	0.56791	0.318959
630	0.284134	0.626084	0.879226	0.531921	0.416928	0.346768	0.424719	0.781895	0.583497	0.521359
800	0.519804	0.891147	0.81374	0.371932	0.262848	0.240777	0.735541	0.887657	0.410273	0.84631
1000	0.829825	0.758271	0.541328	0.257213	0.209952	0.218	0.893654	0.639584	0.325772	0.939215
1250	0.814791	0.493398	0.359852	0.2629	0.234594	0.259906	0.678036	0.422744	0.392722	0.727955
1600	0.533044	0.384409	0.291786	0.313358	0.285847	0.364652	0.550119	0.385812	0.592546	0.66044

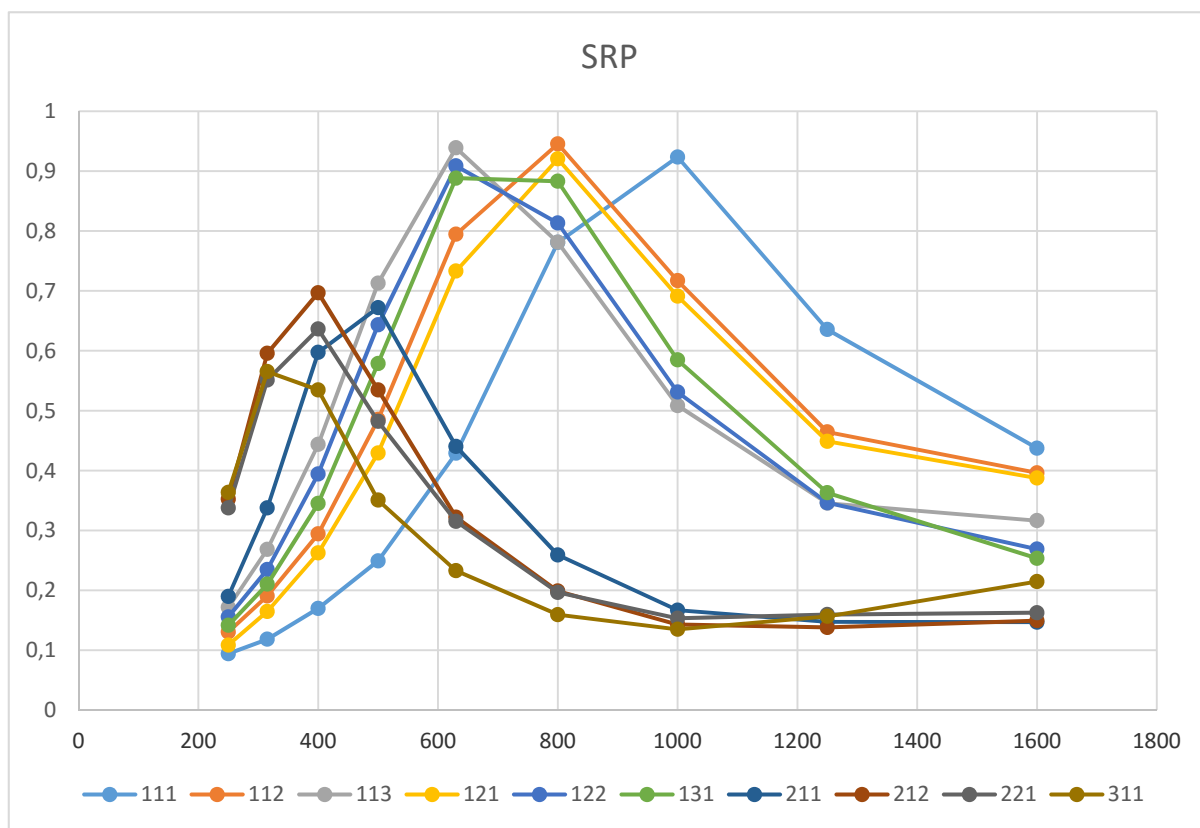


Слика П.2-14. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију RSP

РЕДОСЛЕД SRP

Табела П.2-15. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију SRP

	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP	SRP
f_c [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.094124	0.130283	0.171469	0.108541	0.155588	0.141507	0.18979	0.352064	0.337482	0.363411
315	0.118329	0.190544	0.26832	0.16458	0.234629	0.210258	0.337431	0.595701	0.551147	0.565124
400	0.169697	0.294072	0.44348	0.262326	0.394276	0.344945	0.597172	0.696827	0.636251	0.534523
500	0.249146	0.485261	0.712759	0.429278	0.643315	0.578598	0.671976	0.534554	0.48215	0.350532
630	0.428847	0.794438	0.938814	0.732947	0.908591	0.888206	0.440179	0.322016	0.315116	0.232701
800	0.780862	0.945371	0.781098	0.920295	0.813204	0.88299	0.259045	0.198694	0.196443	0.159239
1000	0.923467	0.716981	0.508415	0.690979	0.530925	0.584639	0.16683	0.142811	0.153309	0.134863
1250	0.635481	0.464348	0.345386	0.448764	0.346077	0.362831	0.147223	0.137964	0.159376	0.156527
1600	0.437243	0.396053	0.316319	0.387439	0.268762	0.253346	0.146744	0.149249	0.162505	0.214596

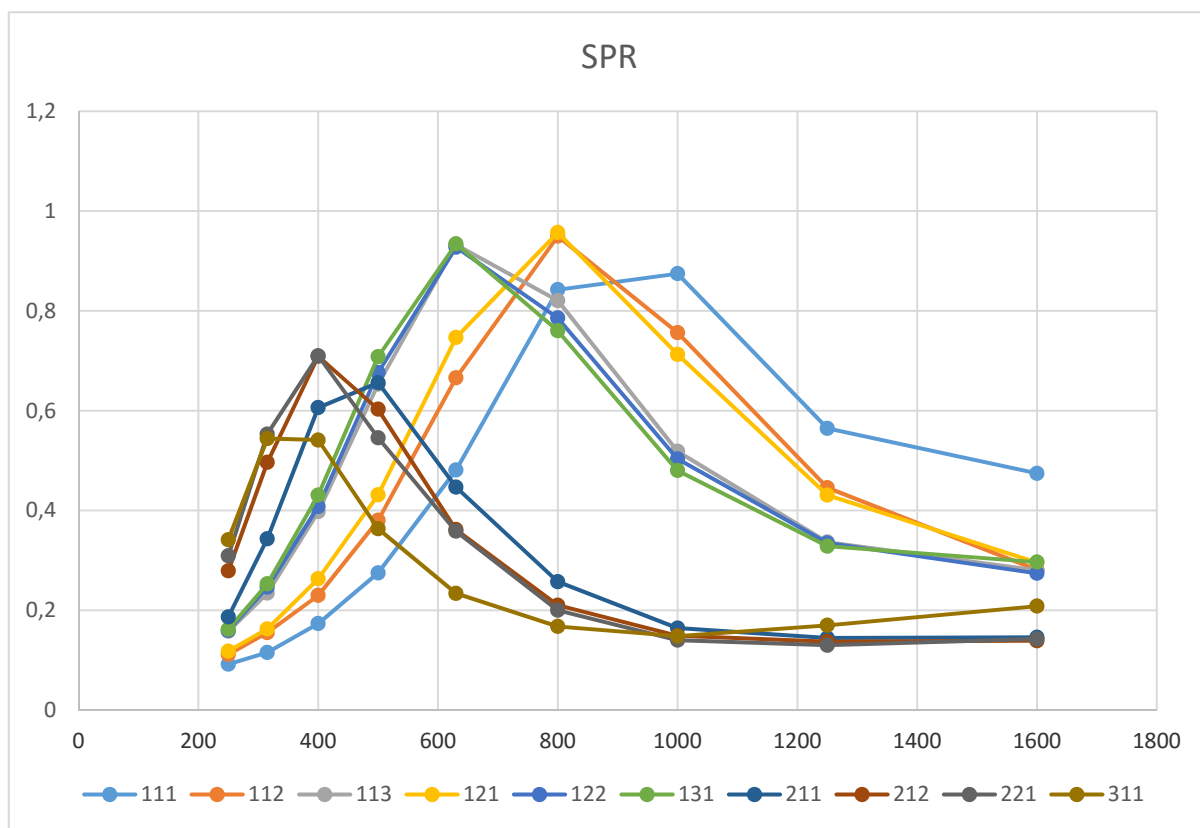


Слика П.2-15. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију SRP

РЕДОСЛЕД SPR

Табела П.2-16. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију SPR

	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR	SPR
fc [Hz]	111	112	113	121	122	131	211	212	221	311
250	0.091864	0.111374	0.157897	0.118066	0.159197	0.161804	0.186698	0.278946	0.308975	0.341122
315	0.115381	0.155239	0.234245	0.162648	0.246233	0.252918	0.343195	0.496373	0.552949	0.544013
400	0.173294	0.229831	0.397579	0.26313	0.407839	0.430779	0.606062	0.708933	0.70971	0.541079
500	0.274927	0.380207	0.652815	0.431229	0.676277	0.707946	0.655882	0.602754	0.545569	0.363356
630	0.480895	0.665741	0.932448	0.746528	0.927589	0.934084	0.446846	0.361684	0.358449	0.233807
800	0.842337	0.9495	0.820475	0.95693	0.785685	0.760045	0.25725	0.209997	0.199947	0.16754
1000	0.874502	0.756291	0.518403	0.712679	0.503161	0.480047	0.164202	0.148761	0.14007	0.148144
1250	0.564559	0.445422	0.336551	0.430675	0.334857	0.328428	0.144251	0.13703	0.129855	0.169785
1600	0.474362	0.280885	0.279959	0.29555	0.274081	0.296565	0.145836	0.138836	0.142329	0.20832



Слика П.2-16. Вредности коефицијената апсорпције за комбинацију SPR

ОБРАЗАЦ 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а мр Бранко Радичевићброј уписа 10/09-д

Изјављујем

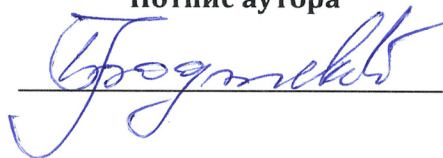
да је докторска дисертација под насловом

Развој модела одлучивања за избор оптималне смеше звучно
апсорпционих материјала

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Краљеву, 29.06.2016. године

Потпис аутора



ОБРАЗАЦ 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског радаИме и презиме аутора мр Бранко РадичевићБрој уписа 10/09-дСтудијски програм Производне технологијеНаслов рада Развој модела одлучивања за избор оптималне смеше звучно апсорпционих материјалаМентор Проф. др Милан КоларевићПотписани мр Бранко Радичевић

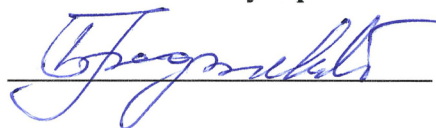
изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Крагујевцу.

У Краљеву, 29.06.2016. године

Потпис аутора



ОБРАЗАЦ 3.**Изјава о коришћењу**

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Крагујевцу унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Развој модела одлучивања за избор оптималне смеше звучно апсорпционих материјала

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

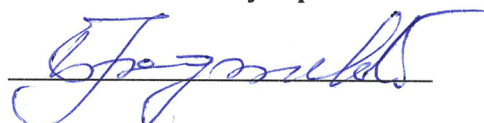
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Крагујевцу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, чији је кратак опис дат је на обрасцу број 4.).

У Краљеву, 29.06.2016. године

Потпис аутора



ОБРАЗАЦ 4.**1. Ауторство -**

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство - некомерцијално.

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално - без прераде.

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство - без прераде.

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима.

Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.