



ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI”



DIN BACĂU

FACULTATEA DE INGINERIE

Calea Mărășești, Nr. 157, Bacău 600115
Tel. +40-234-542411, tel./fax +40-234-545753

www.ub.ro; e-mail: rector@ub.ro



Ing. Florin Marian V. NEDEFF

**Rezumat
la**

TEZA DE DOCTORAT

**STUDII ȘI CERCETĂRI CU PRIVIRE LA
POSIBILITATEA DE CREȘTERE A
CONFORTULUI ACUSTIC ÎNTR-O ÎNCĂPERE
DESTINATĂ VORBIRII**

Conducători științifici:

**Prof. univ. dr. Adriana Luminița FÎNARU
Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău**

**Prof. univ. dr. Maricel AGOP
Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași**

**BACĂU
2017**

MULȚUMIRI

Realizarea acestei lucrări a fost posibilă cu ajutorul unor instituții și specialiști de renume din țară și din străinătate.

În cadrul pregătirii doctorale am realizat un stagiu de cercetare de patru luni la o universitate de prestigiu din Europa, respectiv Universitatea din Cadiz, Spania, unde m-am documentat în domeniul temei tezei de doctorat. Mulțumesc mentorilor de la această universitate, care m-au coordonat: profesor Jose Luis Cueto Ancela, profesor Ricardo Hernández Molina Rodrigo, profesor Juan Antonio López Ramirez, profesor Diego Sales Márquez. Mulțumesc tuturor colegilor de la această universitate.

Deoarece teza a fost îndrumată în cotutelă, aduc cele mai calde mulțumiri distinsului profesor Maricel Agop, conducător de doctorat la Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” Iași, și titular la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, care mi-a coordonat pașii în cercetare. De asemenea, îmi exprim întreaga mea recunoștință și celui alt conducător științific de la Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău, distinsei doamne profesor Adriana Fînaru pentru sprijinul acordat.

Mulțumesc mult colectivului de cadre didactice de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Facultatea de mecanică, Departamentul de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Robotică, în special doamnei profesor Carmen Bujoreanu. De la aceeași universitate mulțumesc profesorului Dumitru Nedelcu pentru ajutorul acordat în procurarea unor materiale acustice necesare determinărilor.

Mulțumesc domnișoarei dr. ing. Doina Constantinescu, director tehnic cercetare-dezvoltare de la S.C. ICEFS COM S.R.L. Săvinești-Neamț, pentru amabilitatea și ajutorul prompt acordat pentru procurarea unor materiale necesare determinărilor.

Mulțumesc conducerii firmei S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău pentru colaborarea în realizarea liantului și în pregătirea probelor.

Mulțumesc colegilor de la Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău care pe parcursul pregătirii mele atât în stagiul, cât și la elaborarea și finalizarea tezei de doctorat, au fost permanent alături de mine. Emil, Mirela, Narcis, Claudia, Oana, Dana, dar în special lui Gabi (inginerul departamentului Inginerie mecanică și ingineria mediului), care m-a ajutat efectiv la realizarea dispozitivelor acustice și la efectuarea tuturor determinărilor în încăperea luată în studiu.

Mulțumesc conducerii Facultății de Inginerie și conducerii Universității „Vasile Alecsandri” din Bacău pentru că au asigurat toate condițiile la nivel optim pentru a putea realiza cercetările propuse.

Autorul

CUPRINS

	T/R
Introducere	6/6
1. NOȚIUNI TEORETICE DE ACUSTICA UNUI SPAȚIU PUBLIC ÎNCHIS	10/7
1.1. Noțiuni teoretice privind unda sonoră	10/7
1.2. Calitatea sunetului	13/7
1.3. Caracteristicile unui sistem acustic	18/7
1.4. Acustica spațiilor închise (încăperilor)	19/7
1.5. Propagarea sunetului	21/7
1.5.1. Propagarea sunetului în aer liber	21/7
1.5.2. Propagarea sunetului în încăperi	22/7
1.5.3. Fenomene la propagarea sunetului în încăperi	25/7
1.6. Absorbția sunetului în încăperi	28/8
1.6.1. Coeficientul de absorbție și indicele de absorbție acustică ponderată	29/8
1.7. Concluzii privind acustica spațiilor închise	33/8
2. PARAMETRII ACUSTICI	35/9
2.1. Parametri privind reverberația	38/9
2.2. Parametri energetici	48/10
2.3. Parametri care descriu inteligibilitatea vorbirii	53/11
2.4. Parametri spațiali	57/11
2.5. Concluzii privind parametrii acustici	61/11
3. MATERIALE ACUSTICE	63/12
3.1. Proprietățile materialelor acustice	65/12
3.1.1. Proprietățile microscopice	65/12
3.1.2. Proprietăți macroscopice	67/12
3.2. Coeficientul de reducere a zgomotului (NRC)	68/12
3.3. Factori care influențează coeficientul de absorbție	69/12
3.4. Tipuri de materiale și dispozitive acustice	71/12
3.4.1. Materiale acustice poroase și fibroase	72/12
3.4.2. Panouri vibratoare	74/12
3.4.3. Rezonatori de absorbție	76/12
3.4.4. Absorbitori micști	79/12
3.4.5. Alte dispozitive și materiale	80/13
3.5. Aerul și mobilierul din încăperi	80/13
3.6. Concluzii privind materialele acustice	83/13
4. STADIUL ACTUAL CU PRIVIRE LA PERFORMANȚELE ACUSTICE ALE UNEI ÎNCĂPERI	84/13
4.1. Durata optimă de reverberație a sunetului într-o încăpere	84/13
4.2. Stadiul actual privind proiectarea și amenajarea încăperilor în vederea asigurării calității acustice	85/13
4.3. Îmbunătățirea proprietăților acustice ale unei încăperi	86/14
4.4. Recomandări desprinse din stadiul actual cu privire la confortul acustic al unei încăperi	87/14
4.5. Concluzii privind stadiul actual	92/14
5. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND PROPAGAREA SUNETULUI.....	94/15
5.1. Noțiuni generale.....	94/15
5.2. 5.2. Consecințe ale nediferențiabilității pe o subvarietate spațială tridimensională fractală.....	95/15
5.3. Derivata covariantă fractală.....	98/17
5.4. Principiul covarianței de scală și legile de conservare.....	100/18

5.5.	Ecuția de mișcare a unui „mediu” fractal.....	101/19
5.6.	Modele de mediu fractal. Mediu elastic fractal. Legea fractală de tip Hook generalizată.....	103/20
5.7.	Ecuții de propagare în medii elastice fractale.....	104/21
5.8.	Legi de conservare prin fractalitate de tip Markov.....	106/22
5.9.	Propagarea unei ”perturbații” sonore într-un mediu fractal.....	107/23
5.10.	Posibile corelații ale modelului teoretic cu experimental.....	111/26
5.11.	Concluzii privind contribuțiile teoretice.....	123/27
6.	APARATE DE MĂSURARE ȘI PROGRAME SOFTWARE DE INTERPRETARE A DATELOR OBTINUTE	125/28
6.1.	Aparate și instalații de măsură.....	125/28
6.1.1.	Sonometrul.....	125/28
6.1.2.	Analizorul portabil de zgomot.....	127/28
6.1.3.	Stație portabilă de monitorizare.....	127/28
6.1.4.	Sursă de sunet OmniPowerType 4292-L.....	129/28
6.2.	Software-uri de măsurare a nivelului de zgomot.....	130/28
6.2.1.	Lima – software de hărți de zgomot și calcul al zgomotului ambiental – tip 7812 A/B/C.....	130/28
6.2.2.	Software-ulAcoustic Determinator tip 7816.....	130/28
6.2.3.	Software-ulCadna de predicție a nivelului de zgomot ambiental.....	131/28
7.	MATERIALELE UTILIZATE ȘI METODOLOGIA DE CERCETARE APLICATE ÎN CAMERA ANECOICĂ	133/29
7.1.	Materiale utilizate.....	133/29
7.2.	Coefficientul de absorbție al materialelor studiate.....	143/33
7.3.	Metodologia de cercetare.....	143/33
7.3.1.	Camera anecoică de la Facultatea de Mecanică - Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.....	146/34
7.4.	Rezultate obținute.....	147/34
7.5.	Concluzii privind coeficientul de absorbție determinat prin măsurare.....	156/36
8.	MATERIALELE UTILIZATE ȘI METODOLOGIA DE CERCETARE A SUNETULUI ÎNTR-O ÎNCĂPERE PUBLICĂ	157/37
8.1.	Echipamente și standarde utilizate.....	157/37
8.1.1.	Sursa de sunet OmniPowerType 4292-L.....	158/37
8.1.2.	Standardul SR EN ISO 3382-3:2012 – Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 3: Birouri deschise și Standardul SR EN ISO 3382-2:2008 – Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 2: Durata de reverberație a încăperilor obișnuite.....	159/37
8.2.	Materiale utilizate.....	159/37
8.3.	Încăperea pentru studiul parametrilor acustici.....	161/37
8.4.	Obiectivele de cercetare propuse.....	162/38
8.5.	Metoda de măsurare.....	164/39
8.5.1.	Condițiile de măsurare.....	164/39
8.5.2.	Numărul pozițiilor de măsurare.....	164/39
8.5.3.	Excitarea încăperii.....	165/39
8.5.4.	Stabilirea volumului încăperii.....	166/39
8.5.5.	Stabilirea poziției microfonului și a sursei.....	166/39
8.5.6.	Poziționarea dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii.....	167/40
8.6.	Rezultate obținute.....	168/40
8.6.1.	Determinarea prin măsurare a timpilor de reverberație.....	176/44
8.6.2.	Determinarea prin calcul a timpilor de reverberație.....	190/46
8.6.3.	Determinarea prin măsurare a timpului de descreștere (amortizare) timpurie (EDT – Early Decay Time).....	196/47
8.6.4.	Determinarea prin calcul a luminozității sunetului (TR – Treble Ratio).....	200/48

8.6.5.	Determinarea prin calcul a clarității vorbirii (<i>C50</i>)	201/49
8.6.6.	Determinarea prin calcul a definiției (<i>D50</i>)	203/49
8.6.7.	Determinarea prin calcul a timpului central (<i>Ts</i>)	203/50
8.6.8.	Determinarea prin calcul a parametrului privind procentul de consoane percepute (<i>%AICons</i>)	204/50
8.6.9.	Determinarea prin calcul a parametrului indicele rapid de transmitere a vorbirii (<i>RASTI</i>)	207/52
8.7.	Parametrii acustici extinși la toate materialele încercate în camera anecoică..	209/52
8.8.	Parametrii acustici pentru încăperea cu geometrie variabilă a tavanului	214/54
8.9.	Concluzii privind parametrii acustici ai încăperii studiate	228/59
9.	ELABORAREA UNOR MODELE MATEMATICE	231/61
9.1.	Cu privire la pozițiile de așezare a dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii	231/61
9.1.1.	Identificarea modelului matematic privind pozițiile de așezare a dispozitivelor (panourilor) acustice	233/61
9.1.2.	Verificarea modelului matematic privind așezarea dispozitivelor (panourilor) acustice	238/62
9.2.	Cu privire la materialul dispozitivelor (panourilor) acustice	240/62
9.2.1.	Identificarea modelului matematic privind materialul dispozitivelor	240/62
9.2.2.	Verificarea modelului matematic privind materialul dispozitivelor	242/64
9.3.	Corelații cu privire la alți parametri acustici ai unei încăperi	243/64
9.3.1.	Identificarea modelului matematic pentru parametrii acustici	243/64
9.3.2.	Verificarea modelului matematic cu privire la alți parametri acustici	245/65
9.4.	Concluzii cu privire la elaborarea modelelor matematice	245/65
10.	CONCLUZII GENERALE	247/66
	BIBLIOGRAFIE	265/76
	Lista figurilor	283/...
	Lista tabelelor	296/...
	Anexe (1, 2.1, 2.2, 3, 4: doar în format electronic)	299/...

INTRODUCERE

Un deosebit interes este manifestat în ultimul timp *de acustica spațiului închis și acustica arhitecturală*, respectiv de modul în care sunetele se propagă în spații închise (încăperi). Așa cum rezultă din definiția *reverberației*, orice spațiu închis posedă acest fenomen datorat reflexiilor sonore multiple care se produc după ce sursa sonoră și-a încetat emisia. În funcție de destinația spațiului închis reverberația va avea o anumită durată, obținută prin folosirea unor materiale și structuri acustice corespunzătoare, coroborate și cu geometria spațiului închis. Modul de îndeplinire a acestor condiții va determina nivelul de *confort acustic* din respectivul spațiu închis [71, 147, 149, 173].

Studiile și cercetările realizate și prezentate în teză au pornit de la ideea obținerii unui confort acustic bun într-un spațiu închis destinat desfășurării unor activități publice în grupuri medii de lucru (25-50 persoane). Pornind de la geometria spațiului închis, impusă prin construcția sălii, s-a căutat să se realizeze un confort acustic care poate fi variat în timp și în spațiu. S-au studiat atât diferitele posibilități de modificare a geometriei tavanului unei încăperi, cât și diferite tipuri de materiale, unele ecologice și tradiționale, care pot să amenajeze tavanul respectivei încăperi. Geometria tavanului încăperii se poate modifica pentru a realiza un anumit tip de confort acustic pe durata unei zile, pentru același tip de material folosit, rezultând astfel mai multe tipuri de structuri acustice care au putut fi studiate. De asemenea, s-au studiat și posibilitățile de eliminare a paralelismului între tavanul încăperii și pardoseala acesteia.

Întrebările care au apărut pe parcursul documentării teoretice, dar și pe parcursul determinărilor experimentale s-au referit la: Care ar fi cea mai bună structură acustică pentru fiecare tip de sală? Cum putem realiza o structură acustică care să păstreze pe parcursul zilei același confort acustic perceput de un receptor uman, știind că receptorul auditiv uman nu rămâne constant în timp la primirea informațiilor?

Ce materiale se pot folosi? Ce materiale tradiționale și ecologice se pot folosi? Cum se pot grupa aceste materiale pentru a obține efectele dorite?

Teza conține 187 figuri, 58 tabele și 290 relații matematice.

CAPITOLUL 1. NOȚIUNI TEORETICE DE ACUSTICA UNUI SPAȚIU PUBLIC ÎNCHIS

1.1. Noțiuni teoretice privind unda sonoră

Undele se pot clasifica după următoarele criterii, astfel [15, 21, 42, 58, 187, 208, 209]:

1. După forma suprafeței de undă, avem: unde sferice, unde circulare, unde plane;
2. După direcția de oscilație a particulelor mediului: unde transversale (specifice pentru medii solide) și unde longitudinale (se propagă în toate mediile: solide, lichide și gazoase);
3. După tipul de energie transportat, avem: unde elastice, unde electromagnetice și unde magneto-hidro dinamice.

1.2. Calitatea sunetului

Undele sonore (sunetul) sunt undele acustice sferice longitudinale care se propagă în medii solide, lichide și gazoase. Aceste unde sunt cauzate de particulele care vibrează de-a lungul direcției de propagare, realizându-se zone alternative de joasă sau înaltă presiune și au frecvența cuprinsă în intervalul (20 – 20.000) Hz [21, 78, 139, 147, 187, 207, 208, 209, 210].

1.3. Caracteristicile unui sistem acustic

Un sistem acustic este format din următoarele elemente: masa acustică (inerția acustică), capacitatea acustică (complanța acustică), rezistența acustică și impedanța acustică [21, 42, 147, 165, 187]. Pentru o încăpere putem vorbi de sistem acustic închis.

1.4. Acustica spațiilor închise (încăperilor)

Așa cum s-a menționat în introducerea, pentru fiecare tip de încăpere trebuie asigurată o anumită acustică, sau altfel spus trebuie asigurat un anumit timp de reverberație corespunzător destinației încăperii. Astfel vom avea [6, 21, 42, 147, 149, 173, 186, 187, 188]:

- Încăperi fără cerințe speciale legate de comunicația verbală și perceperea muzicii;
- Încăperi destinate pentru conferințe;
- Încăperi destinate pentru ascultarea muzicii.

1.5. Propagarea sunetului

1.5.1. Propagarea sunetului în aer liber. Undele sonore emise de o sursă omnidirecțională se propagă sferic (în mod egal în toate direcțiile - pornind de la sursă) [188].

1.5.2. Propagarea sunetului în încăperi. În încăperi câmpul sonor nu este sferic, ci depinde de geometria încăperii și de proprietățile acustice ale pereților încăperii și ale obiectelor din încăpere. Energia acustică într-o încăpere când întâlnește un obstacol (perete, mobilier, draperii, ferestre, panouri etc.) o parte este reflectată, altă parte este absorbită de obstacol și o altă parte este transmisă (cea care trece prin obstacol) (fig. 1.13). Mărimea fiecărei părți de energie acustică depinde de tipul obstacolului, respectiv de proprietățile acustice ale acestuia [6, 21, 42, 147, 149, 173, 186, 187, 188].

O încăpere poate fi caracterizată de raportul între dimensiunile sale: înălțime (h) / lățime (l) / lungime (L). „Raportul de aur” (Golden Room Ratio) pentru o încăpere este: $1/1,6/2,6$ [270].

1.5.3. Fenomene la propagarea sunetului în încăperi

La propagarea sunetului într-o încăpere (încăpere) pot apărea următoarele fenomene: interferența acustică, reflexia, refracția, difuzia și difracția [112].

1.6. Absorbția sunetului în încăperi

Gradul de audibilitate dintr-o încăpere este determinat de absorbția acustică, respectiv de pierderea de energie a undelor acustice în încăperea respectivă (pe elemente de construcție, mobilier etc.). Plafonul încăperii joacă un rol important pentru reflexia, absorbția și transmiterea undelor sonore. Structurile și materialele utilizate în construcția clădirilor și în amenajarea interiorului acestora se aleg în funcție de coeficientul de absorbție (α) și de indicele de absorbție acustică ponderată (α_p) [21, 92, 94, 129, 149, 188, 212, 219, 221, 222].

1.6.1. Coeficientul de absorbție și indicele de absorbție acustică ponderată

Coeficientul de absorbție (α) este folosit pentru a exprima capacitatea unui material de a absorbi undele sonore, respectiv de a transforma energia cinetică a undelor sonore absorbite în energie termică. Aceasta este o caracteristică importantă în acustica încăperilor, în special pentru calcularea timpului de reverberație [21, 42, 43, 94, 121, 149, 165, 173, 187, 188, 212, 214, 215].

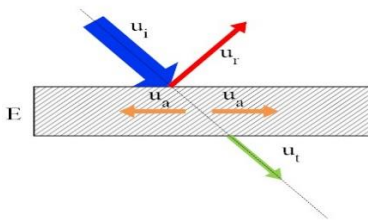


Fig. 1.13. Modul de repartiție a energiei acustice la întâlnirea unui obstacol [149, 188].

Coeficientul de absorbție (α) se exprimă în procente și reprezintă raportul dintre suma totală a energiei absorbite (Ea) și energiei transmise (Et) de către material și energia totală incidentă a undelor sonore (E) [24, 94, 149, 173, 188, 218, 219]:

$$\alpha = \frac{Ea + Et}{E} 100, (\%) \quad (1.42)$$

Indicele de absorbție acustică ponderată (α_p) reprezintă valoarea curbei de referință la 500 Hz după translatarea acesteia față de curba coeficienților de absorbție conform *SR EN ISO 11654:1997* [21, 94, 188, 222].

1.7. Concluzii privind acustica spațiilor închise

1. Pentru fiecare tip de încăpere trebuie asigurată o anumită acustică. Prin tip de încăpere se înțelege: destinația încăperii (săli de curs, săli de audiții muzicale, săli de teatru etc.), volumul încăperii, mărimea pereților încăperii, forma încăperii (forme cu pereți opuși paraleli sau nu);
1. Pereții netezi și duri ai unei încăperii reflectă un procent mai mare al undei sonore, iar timpul de reverberație este mai mare [119];
2. Distanța între pereții încăperii influențează direct timpul de reverberație;
3. Arhitectura încăperii destinate vorbirii trebuie să asigure reflexii primare (de ordinul unu) care amplifică sunetul. Reflexiile de ordinul doi, trei etc. (reflexii întârziate) trebuie eliminate [21, 42]. Cu cât cantitatea de reflexii suprapuse peste sunetul direct este mai mică, cu atât recepția sunetului va fi mai corectă (lipsită de distorsiuni acustice) [119];
4. Pentru încăperi mici destinate vorbirii trebuie asigurat un timp de reverberație scurt;
5. Pentru ca acustică cât mai bună la o încăpere, timpul de reverberație trebuie să aibă valori apropiate pentru tot spectrul de audiofrecvență [119];
6. Confortul acustic al unei încăperii se stabilește după mai multe criterii. Pentru încăperi cu volum mic și la frecvențe joase ale sunetului trebuie luate în considerare modulele încăperii (axiale, tangențiale și oblice). Cele mai importante sunt modulele axiale datorate dimensiunii oricărei dintre cele trei laturi ale încăperii [270];

7. În încăperi atenuarea acustică a undelor sonore este mai mică (poate ajunge la 0 dB, nu există atenuare), iar în aer liber atenuarea poate ajunge la 6 dB (atenuare înaltă) pentru fiecare dublare a distanței față de sursa sonoră [188];
8. În încăperi câmpul sonor nu este sferic, acesta depinde de geometria încăperii și de proprietățile acustice ale pereților încăperii, ale obiectelor și persoanelor din încăpere [94, 188]
9. Cu cât distanța față de sursa sonoră se mărește, câmpul sonor este format din sunetele directe și sunetele reflectate [188];
10. Gradul de audibilitate într-o încăpere este determinat de absorbția acustică. Toate materialele utilizate la construcția încăperii, la amenajarea și mobilarea ei, precum și persoanele din încăpere sunt caracterizate de un coeficient de absorbție [21, 42];
11. Coeficientul de absorbție al unui material variază în funcție de frecvența sunetului și de unghiul la care unda sonoră ajunge pe materialul respectiv [24, 94, 149];
12. Pentru asigurarea unui anumit confort acustic, dimensiunile și materialele de construcție ale încăperilor trebuie impuse încă din faza de proiectare. Pentru încăperi existente, un anumit confort acustic este mai greu de asigurat, deoarece trebuie realizate corecții atât cu privire la modulile încăperii (în special cele axiale), cât și la materialele din care a fost construită încăperea.

CAPITOLUL 2. PARAMETRII ACUSTICI

2.1. Parametri privind reverberația

Acești parametri caracterizează încăperile pentru orice tip de activitate care se desfășoară în ele, din punct de vedere al timpilor de percepere de către receptor (ascultător) a undelor sonore emise de surse aflate în interiorul încăperii și reprezintă gradul de „vivacitate” al încăperii.

Timpul de reverberație (durata de reverberație) ($T60$). Reverberația este un fenomen nedorit, deoarece se suprapune peste sunetul nou emis și confortul acustic al încăperii scade [45, 57, 73, 79, 82, 83, 94, 120, 172, 173, 178, 188, 217, 219, 222, 224, 225, 229].

Acesta este cel mai cunoscut parametru și este numit parametrul fundamental al științei acustice, rata de descreștere este măsurată prin regresia liniară a celor mai mici pătrate a curbei de descreștere măsurată de la un nivel de 5 dB sub nivelul inițial până la 35 dB. Acesta este numit $T30$. Când valoarea finală este raportată de la 5 dB sub nivelul inițial până la 25 dB obținem $T20$. Este important de menționat că, chiar și în cazul în care rata de descreștere este măsurată la doar 30 dB sau 20 dB, timpul de reverberație este întotdeauna exprimat ca timpul necesar pentru o descreștere de 60 dB. Dacă descreșterea (degradarea) este liniară, atunci: $T60 = T30 = T20$ [29, 32, 73].

Timpul de reverberație este principalul parametru care exprimă calitatea acustică a unei încăperi (este un parametru obiectiv) [63]. Pentru determinarea timpului de reverberație într-o încăpere cel mai des se folosește formula empirică a lui *W.C.Sabine*:

$$T60 = \frac{0,16 \cdot V}{4m \cdot V + Ab_{tot}} \quad , \quad (s) \quad (2.2)$$

unde:

V reprezintă volumul camerei;

$4m \cdot V$ – absorbția aerului (unde: m este coeficientul de absorbție al aerului);

Ab_{tot} – absorbția sonoră totală a încăperii, a obiectelor din încăpere și a persoanelor din încăpere (relațiile de calcul 1.44, 1.45, 1.46).

Factorii $4m \cdot V$ se referă la absorbția aerului din încăpere și pot fi neglijați pentru încăperi de dimensiuni mici. În aceste cazuri timpul de reverberație se determină cu relația [87, 188]:

$$T60 = \frac{0,16 \cdot V}{Ab_{tot}} \quad (s) \quad (2.3)$$

Domeniul de măsurare pentru $T30$ de pe curba de descreștere este corespunzător pentru o scădere a nivelului presiunii sonore de la -5 dB la -35 dB, prin extrapolare $T60 = 2T30$. $T20$ este paralel cu $T30$ și

se referă la un interval de descreștere a curbei corespunzător scăderii nivelului de presiune sonoră cu 20 dB (de la -5 dB la -25 dB), $T60 = 3T20$ (prin extrapolare). $T10$ la fel ca $T30$ și $T20$ este paralel cu aceștia, fiind timpul de descreștere de la -5 dB la -15 dB, $T60 = 6T10$ (prin extrapolare) (fig. 2.5) [45, 82, 89, 182, 183, 225].

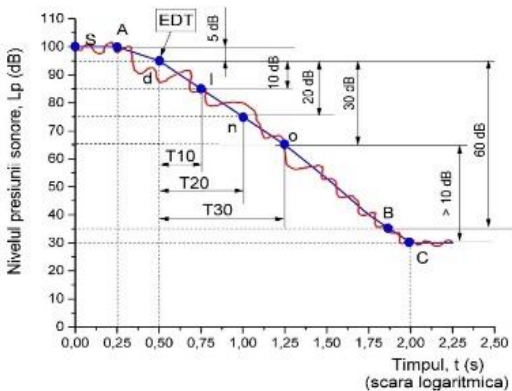


Fig. 2.5. Imaginea grafică a EDT (Early Decay Time – timpul de descreștere timpurie) și a timpilor: $T10$, $T20$, $T30$ [7, 224, 233, 235].

Timpul de descreștere (amortizare) timpurie (EDT – Early Decay Time). Reprezintă timpul necesar ca nivelul presiunii sonore să scadă cu 10 dB după ce sursa sonoră a fost oprită. EDT este un parametru subiectiv și se determină similar ca $T10$ (fig. 2.5) [26, 32, 45, 82, 89, 97, 173, 178, 182, 217, 225]. EDT se utilizează din momentul în care s-a descoperit faptul că percepția subiectivă a reverberației are o legătură puternică cu timpul de descreștere inițial. Datorită diferențelor între reverberația timpurie și târzie, pot apărea diferențe între EDT și $T30$ [48, 56, 124, 157, 159, 173, 178].

Bass Ratio (BR) sau căldura acustică, caracterizează modul în care o încăpere răspunde la frecvențele joase, astfel încât sunt percepute sunetele joase (bașii). Nu caracterizează prea bine o încăpere destinată vorbirii, deoarece vocea umană nu emite sunete într-un interval mare de frecvențe. În cazul muzicii, sunt instrumentele care emit sunete în intervale mari de frecvențe. Acest parametru reflectă bogăția armonică la frecvențele joase și caracterizează încăperea pentru consolidarea sunetelor de frecvență joasă [80, 122, 230].

TrebleRatio (TR) sau luminozitatea sunetului, reflectă bogăția armonică la frecvențe ridicate și caracterizează încăperea pentru consolidarea sunetelor de frecvență ridicată.

2.2. Parametri energetici

Acești parametri analizează energia sunetului și caracterizează încăperea din punct de vedere al clarității privind percepția vorbirii și a muzicii, al definiției vorbirii, al timpului central sau a sonorității încăperii [29]. La fel, sunt măsurați sau calculați pentru încăperile nepopulate și populate.

Claritatea vorbirii (C) este un parametru în legătură cu inteligibilitatea vorbirii și arată gradul de separare între diferitele sunete ale mesajului oral [227]. Acest parametru este împărțit în două: claritatea vocii ($C50$) și claritatea muzicii ($C80$). Media aritmetică a clarității de la frecvențele începând cu 500 Hz până la 4.000 Hz, reprezintă $C50$ [7, 26, 29, 32, 35, 80, 82, 89, 122, 132, 174, 183, 227, 230, 234].

Definiția (D) reprezintă raportul dintre energia percepută de receptor în primele 50 ms și energia totală transmisă de sursă. Valoarea de 50 ms este reprezentativă pentru claritatea vocii (vorbire) [7, 29, 44, 48, 56, 82, 122, 124, 173, 174, 183, 225, 230, 235].

Timpul central (T_s) este numit și „centrul de greutate” al energiei răspunsului la impuls (al curbei de descreștere), deoarece măsoară timpul de la începutul curbei până la centrul de greutate al curbei de descreștere [29, 32, 56, 82, 124, 157, 174, 225, 230, 234].

Sonoritatea (G) reprezintă diferența dintre nivelul sonor produs de o sursă într-un punct al încăperii și nivelul sonor al aceleiași surse aflată într-o cameră izolată fonic, față de un receptor aflat la 10 m de

sursă. Acest parametru reflectă gradul de amplificare produs de o încăpere.

2.3. Parametri care descriu inteligibilitatea vorbirii

Sunt parametri subiectivi, care pot fi exprimați prin numărul de cuvinte fără sens fonetic, înțelese de ascultător (receptor) aflat în încăpere, deci reflectă nivelul de înțelegere a cuvintelor [8, 229, 236]. Din această grupă se vor analiza următorii parametri: *STI*, *RASTI* și *%AICons*.

Indicele de transmitere a vorbirii (*STI* - SPEECH TRANSMISSION INDEX), este un parametru asociat cu inteligibilitatea vorbirii, deci se recomandă pentru analiza încăperilor destinate vorbirii [40, 83, 89, 183]. Acest indice se definește pentru șapte benzi de frecvență ($125 \div 8.000$ Hz).

Room Acoustics *STI* (*RASTI*) este un parametru care simplifică calculul parametrului *STI*, ia în calcul doar câteva frecvențe și este, la fel, asociat cu inteligibilitatea vorbirii [7, 79, 183, 227, 230, 235].

%AICons reprezintă procentul de consoane pierdute (nepercepute) de un receptor (ascultător) aflat la o distanță față de sursa de sunet. A fost definit de cercetătorul olandez *V.M.A. Peutz* [79, 82, 134, 183, 230].

2.4. Parametri spațiali

Acești parametri se referă la efectele spațiale create pentru sunet de către o încăpere, respectiv la corelarea semnalelor sonore percepute de cele două urechi, sau la analiza semnalelor sonore laterale față de semnalele venite la receptor din toate direcțiile [29]

Interaural Cross Correlation (*IACC*) sau corelarea încrucișată a semnalelor sonore, este un parametru responsabil pentru corelarea sunetelor percepute de fiecare ureche și dă indicații asupra gradului de similitudine între cele două semnale [26, 32, 73, 122, 132, 178, 146, 234].

Early Lateral Energy Fraction (*LF*) sau fracțiunea de energie laterală timpurie, reprezintă raportul dintre energia care ajunge lateral la un receptor în primele *50 ms* (*80 ms*) și energia care ajunge din toate direcțiile tot în primele *50 ms* (*80 ms*). Acest parametru reprezintă gradul de spațialitate al sunetului [32, 45].

Early Lateral Energy Fraction Cosine (*LFC*) este o aproximare a fracțiunii de energie laterală timpurie cosinus, care are aceeași semnificație, dar ține seama de cosinusul unghiului de incidență *i*. *LFC* are valori apropiate cu *LF* [16].

Echo Criterio (*EC*) sau Criteriu Ecou, este un parametru care poate determina ecoul într-un punct al încăperii [80, 230]:

2.5. Concluzii privind parametrii acustici

1. Calitatea acustică a unei încăperi, destinată pentru vorbire sau ascultarea muzicii, este dată de parametrii acustici ai sunetului în acea încăpere;
2. Parametrii acustici sunt dependenți de frecvența sunetului;
3. Parametrii acustici sunt standardizați și se pot grupa în mai multe categorii: parametri temporali, parametri energetici, parametri privind inteligibilitatea, parametri spațiali;
4. Dintre parametrii acustici temporali cei mai studiați sunt: timpul de reverberație – *T60*, timpul de descreștere timpurie – *EDT* (Early Decay Time), căldura acustică – *BR* (Bass Ratio), luminozitatea sunetului – *TR* (Treble Ratio);
5. Cei mai importanți parametri acustici energetici sunt: claritatea vorbirii – *C*, definiția – *D*, timpul central – *Ts*, sonoritatea – *G*;
6. Parametrii care descriu inteligibilitatea vorbirii sunt: indicele de transmitere a vorbirii – *STI* (Speech Transmission Index), Room Acoustics *STI* – *RASTI*, procentul de consoane nepercepute – *%AICons*;
7. Parametrii spațiali mai importanți se referă la: corelarea încrucișată a semnalelor sonore – *IACC* (Interaural Cross Correlation), fracțiunea de energie laterală timpurie – *LF* (Early Lateral Energy Fraction), fracțiunea de energie laterală timpurie cosinus – *LFC* (Early Lateral Energy Fraction Cosine), criteriu ecou – *EC* (Echo Criterio).

CAPITOLUL 3.

MATERIALE ACUSTICE

Materialele și structurile care pot absorbi sau atenua sunete cu frecvențe din acest interval sunt folosite în construcția și amenajarea încăperilor pentru realizarea confortului acustic [88].

3.1. Proprietățile materialelor acustice

3.1.1. Proprietățile microscopice

Acestea se referă la rezistența la curgere a aerului prin materialele acustice (R_f) și porozitatea materialelor acustice (Φ) [30].

3.1.2. Proprietăți macroscopice

Acestea se referă la factorul de formă și dimensiunea porilor din materialele acustice și la sinuozitatea porilor [30].

3.2. Coeficientul de reducere a zgomotului (NRC) este definit ca media aritmetică a coeficientului de absorbție corespunzător benzilor centrate la 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz și 2.000 Hz [30].

3.3. Factorii care influențează coeficientul de absorbție

Coeficientul de absorbție a unui material depinde de mai mulți factori, respectiv: grosimea materialului, porozitatea materialului, densitatea materialului, distanța dintre materialul absorbant și peretele rigid, geometria suprafeței absorbante [246].

3.4. Tipuri de materiale și dispozitive acustice

Absorbția sunetului se poate face prin dispozitive și materiale. Astfel putem vorbi despre materiale poroase, materiale fibroase, panouri vibrante, rezonatoare etc. [21, 30, 129, 136, 149, 188, 226, 241, 245].

3.4.1. Materiale acustice poroase și fibroase

O absorbție bună a sunetului se realizează în materialele poroase și fibroase. Orice material folosit la construcția unei încăperi, la amenajarea ei, la mobilarea ei și toate persoanele aflate în încăpere realizează o absorbție a sunetului, mai mult sau mai puțin. Materialele care absorb în procent mare undele sonore sunt numite materiale absorbante.

3.4.2. Panouri vibratoare

Sunt realizate din lemn (PAL, OSB) sau material plastic, se montează la o anumită distanță față de peretele rigid și mai sunt numiți **absorbitori impermeabili sau neporoși** [5, 49, 129, 148, 149, 188, 215, 220, 242].

3.4.3. Rezonatori de absorbție

Pentru a reduce grosimea materialelor absorbante care prin grosime asigurau absorbția și la frecvențe joase a sunetelor, se pot folosi absorbitori de tipul rezonatorului Helmholtz [5, 19, 50, 65, 129, 130, 138, 148, 149, 188, 214, 215, 217, 242, 244, 245, 246].

3.4.4. Absorbitori micști

Aceste structuri absorbante sunt combinații între absorbitorii poroși și cei impermeabili. Pot fi alcătuiți din membrane perforate sau plăci perforate și pereți rigizi reflectanți, iar între ei va fi un spațiu, care poate fi umplut parțial sau total cu materiale fonoabsorbante [5, 10, 11, 37, 84, 115, 148, 149, 154, 155, 184].

3.4.5. Alte dispozitive și materiale

În plus pe lângă materialele absorbante, panouri rezonatoare, sunt folosite și corpuri absorbante. Acestea au diferite forme, cele mai utilizate sunt cele sub formă de placă (șicană) [136, 244].

3.5. Aerul și mobilierul din încăperi

Toate materialele și obiectele care mobilează sau se află într-o încăpere au proprietăți absorbante mai bune sau mai slabe. Astfel cel mai important material dintr-o încăpere este aerul din acea încăpere [50].

3.6. Concluzii privind materialele acustice

1. Materialele folosite în construcția și amenajarea încăperilor pot fi clasificate în două mari grupe [50, 212, 240]:
 - materiale care au rolul de a îmbunătăți calitatea sunetului în spații închise, numite și materiale absorbante;
 - materiale izolatoare acustice, care au rolul de a împiedica să iasă sau să intre sunetul din/în spațiul închis;
2. Materialele absorbante au rolul de a controla energia acustică din interiorul încăperii, respectiv de a o reduce. Aceste materiale acționează mai mult asupra energiei acustice reflectate;
3. Materialele acustice absorbante sunt caracterizate de:
 - proprietăți microscopice: rezistența la curgere a aerului prin material, porozitatea materialului acustic [30].
 - proprietăți macroscopice: factorul de formă și dimensiunea porilor, sinuoșitatea porilor;
4. Coeficientul de absorbție al unui material depinde de: grosimea materialului, densitatea materialului, distanța dintre materialul absorbant și peretele rigid, geometria suprafeței absorbante;
5. Materialele acustice sunt: materiale poroase sau fibroase, materiale (dispozitive) acustice rezonatoare, materiale (dispozitive) acustice mixte.

CAPITOLUL 4.

STADIUL ACTUAL CU PRIVIRE LA PERFORMANȚELE ACUSTICE ALE UNEI ÎNCĂPERI

4.1. Durata optimă de reverberație a sunetului într-o încăpere

Durata optimă de reverberație este un parametru subiectiv, deoarece cercetătorii se exprimă diferit asupra duratei exacte de reverberație pentru o anumită încăpere, dar și receptorii nu au aceleași percepții [17, 79, 82, 108, 150, 187, 211, 229].

La același volum al încăperii și aceleași materiale de construcție, putem realiza timpi de reverberație diferiți (recomandați în funcție de destinația încăperii) folosind diferite sisteme și materiale acustice la amenajarea încăperii.

4.2. Stadiul actual privind proiectarea și amenajarea încăperilor în vederea asigurării calității acustice

Pentru realizarea unui confort acustic optim la încăperi care au o anumită destinație din faza de proiectare, arhitecturii și proiectanții folosesc soluții constructive adecvate cu privire la forma încăperii, materialele de construcție și modul de amenajare a interiorului încăperii (forma și materialele pereților, tavanului, pardoselii, echipamentele din încăpere) [167, 168, 187, 255].

Pentru încăperile deja construite și care nu au fost proiectate pentru o anumită destinație acustică, se pune problema aplicării unei ergonomii acustice de corecție, respectiv proiectarea și realizarea unor amenajări care să facă atât corecții de formă pentru încăpere, cât și corecții materialelor utilizate.

Parametrii geometrici ai încăperii (lungime, lățime, înălțime) influențează acustica încăperii, respectiv formează volumul încăperii care stă la baza amenajărilor încăperilor din punct de vedere al timpului de reverberație [187, 252].

4.3. Îmbunătățirea proprietăților acustice ale unei încăperi

Pentru ca o încăpere să ajungă la anumiți parametri privind confortul acustic trebuie luate măsuri în două direcții: izolarea fonică a încăperii și optimizarea sunetului în interiorul încăperii [119].

În studiu au fost luate doar posibilitățile de creștere a confortului acustic, problemele legate de izolarea fonică a unei încăperi fiind un subiect foarte vast și care trebuie studiat separat.

4.4. Recomandări desprinse din stadiul actual cu privire la confortul acustic al unei încăperi

Confortul acustic al unei încăperi trebuie realizat în funcție de două mari cerințe, și anume: destinația încăperii și cerințele receptorilor din încăpere. Din ambele direcții se pot face diferite analize pentru încăperi deja existente, care au diferite destinații. Până în prezent abordarea acestei teme s-a făcut unilateral, doar pentru soluționarea cerințelor privind destinația încăperii.

Problema acusticii încăperilor continuă să fie actuală, având în vedere atât noile materiale care apar (compozite, reciclabile etc.), cât și noile forme de proiectare a formei și interiorului unei încăperi [20, 21, 34, 59, 66, 72, 81, 91, 103, 114, 135, 185, 251].

4.5. Concluzii privind stadiul actual

Analizând studiile teoretice realizate și prezentate în literatura de specialitate, s-au elaborat anumite concluzii, de la care s-a pornit în cercetările aplicative, respectiv:

1. Există diferențe semnificative între izolarea fonică a unei încăperi și amenajarea acustică a încăperii;
2. Și în trecut și în prezent, pentru forma încăperilor, s-au folosit și se folosesc aceleași principii de bază atât pentru asigurarea confortului acustic, cât și pentru asigurarea confortului vizual;
3. În spații închise durata unui sunet este mai mare decât durata aceluiași sunet în spații deschise. Acest lucru se datorează caracteristicilor încăperii (mobiliierul și persoanele din încăpere);
4. În funcție de destinația încăperii, fenomenul de reverberație trebuie modelat cu ajutorul amenajărilor interioare și a mobilierului pentru a crește confortul acustic din încăpere;
5. Confortul acustic este diferit în funcție de destinația încăperii, fiind caracterizat de aceeași parametri, dar care trebuie să aibă valori diferite;
6. Din punct de vedere acustic, încăperile, în funcție de destinația lor, sunt caracterizate de o serie de parametri, care pot fi repartizați pe mai multe grupe, respectiv: parametri energetici, parametri temporali, parametri spațiali, parametri de inteligibilitate;
7. În funcție de modul lor de determinare, parametrii acustici care caracterizează o încăpere sunt obiectivi și subiectivi;
8. Aceeași încăpere nu poate satisface cerințe multiple (încăperea să poată fi folosită pentru mai multe destinații: audiții muzicale, conferințe etc.);
9. În aceeași sală receptorii (ascultătorii) nu pot percepe sunetul la fel pe parcursul unei zile (intervine oboseala în percepția semnalului sonor);
10. Forma sălii, structurile (dispozitivele) acustice și natura materialelor folosite pentru amenajarea încăperilor au un rol determinant în asigurarea parametrilor acustici;
11. Sunt studiate tot mai mult posibilitățile de utilizare a unor materiale acustice ecologice, realizate din reciclarea unor materiale uzate;
12. Există materiale tradiționale care pot fi folosite cu succes ca materiale acustice, dar nu au prea fost studiate pentru această destinație. Aceste materiale împreună cu diferite dispozitive acustice pot realiza amenajări interioare care să satisfacă și alte cerințe;
13. Tema tezei se referă la studiul acusticii încăperilor în funcție de destinația lor și la modul de variație a parametrilor acustici în funcție de variația performanțelor de percepție ale receptorului, folosind diferite materiale acustice și dispozitive acustice.

CAPITOLUL 5. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND PROPAGAREA SUNETULUI

5.1. Noțiuni generale

Propagarea unei perturbații sonore într-un mediu material (de orice natură ar fi el) este un fenomen deosebit de dificil de analizat având în vedere "complexitatea" aspectelor care „susțin” un astfel de fenomen de propagare. „Complexitatea” de care discutăm trebuie să țină cont de următoarele:

- dualitatea funcționalitate-structuralitate câmp sonor;
- dualitatea funcționalitate-structuralitate mediu material;
- dualitatea funcționalitate-structuralitate câmp sonor-mediul material.

Dintr-o asemenea perspectivă sistemul perturbație sonoră-mediul material poate fi mai întâi asimilat și apoi analizat, din punct de vedere dinamic, ca un sistem complex [51, 105].

Pentru structurile geometrice care implică varietăți de tip spațiu nediferențiable, în particular fractal avem noi modele fizice de analiză a dinamicelor sistemelor complexe acustice. Printre aceste noi modele fizice amintim Teoria Relativității de Scală [116, 117] și Modelul Extins al Relativității de Scală, adică Teoria Relativității de Scală în dimensiune fractală constantă dar arbitrară [1, 2, 3, 4, 31].

5.2. Consecințe ale nediferențiability pe o subvarietate spațială tridimensională fractală

Să admitem că pe o varietate spațială tridimensională unitățile structurale acustice ale unui sistem complex acustic se deplasează atât pe curbe nefractale, adică curbe continue dar diferențiable, cât și pe curbe fractale, adică pe curbe continue dar nediferențiable. Într-o asemenea conjunctură, dacă selectăm, din totalitatea curbelor spațiale tridimensionale, doar pe cele fractale, vom obține o subvarietate spațială tridimensională fractală. Vom numi aceste „traectorii” curbe fractale acustice, iar subvarietatea spațială tridimensională fractală asociată spațiului fractal acustic. Pe o asemenea subvarietate singurele „mișcări” ale unităților structurale acustice ale unui sistem complex acustic compatibil cu structura subvarietății sunt cele fractale. Atunci nediferențiabilitya devine o proprietate universală a dinamicii sistemelor complexe acustice având următoarele implicații [116, 117]:

1. Orice curbă fractală acustică a unui spațiu fractal acustic este explicit dependentă de scala de rezoluție δt (scală de rezoluție acustică). În aceste condiții lungimea curbei fractale acustice devine infinită atunci când intervalul temporal Δt este zero. Așadar însuși spațiul tridimensional asociat devine un fractal în sensul cel mai general dat acestui concept de Mandelbrot [100, 101, 102]. Să notăm că acest spațiu noi l-am numit mai sus spațiu fractal acustic;

2. Timpul nu este un fractal. Atunci timpul capătă statutul de parametru afin al curbei fractale acustice;

3. Admitem funcționalitatea unui principiu al substituției (îl vom numi principiu substituției acustice) în acord cu care scala de rezoluție δt se identifică cu diferențiala temporală dt , adică $\delta t \equiv dt$. În acest caz dt devine o variabilă independentă de mișcare. Să observăm că notația dt este utilizată și ca diferențială temporală în cazul dinamicii sistemelor hamiltoniene;

4. Admitem ruperea spontană a invarianței infinitezimale temporale (o vom numi ruperea spontană a invarianței infinitezimale temporale acustice) a oricărui câmp acustic Φ . Ușual derivata în raport cu timpul a câmpului acustic Φ se definește prin relațiile:

$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right]_+ = \lim_{\Delta t \rightarrow 0_+} \frac{\Phi(t+\Delta t) - \Phi(t)}{\Delta t} \quad (5.1)$$

$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right]_- = \lim_{\Delta t \rightarrow 0_-} \frac{\Phi(t) - \Phi(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Relațiile (5.1) și (5.2) sunt echivalente în cazul diferențiable, rămânând invariante la transformarea $\Delta t \rightarrow -\Delta t$. În cazul fractal relațiile (5.1) și (5.2) își pierd valabilitatea întrucât pentru $\Delta t \rightarrow 0_{\pm}$ acestea nu sunt definite. Funcționalitatea relațiilor de mai sus se recâștigă prin înlocuirea câmpului acustic clasic $\Phi = \Phi(X^i, t)$ cu câmpul acustic fractal $\Phi = \Phi(X^i, t, dt)$ situație ce implică dependența câmpului acustic Φ atât de coordonatele spațiale X^i și de coordonata temporală t , cât și de scala de rezoluție dt . Așadar

relațiile (5.1) și (5.2) trebuie substituite cu următoarele relații:

$$\frac{d_+ \Phi}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0_+} \frac{\Phi(t+\Delta t, \Delta t) - \Phi(t, \Delta t)}{\Delta t} \quad (5.3)$$

$$\frac{d_- \Phi}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0_-} \frac{\Phi(t, \Delta t) - \Phi(t-\Delta t, \Delta t)}{\Delta t} \quad (5.4)$$

unde semnul ”+” definește procesele acustice ”înainte”, iar semnul ”-” procesele acustice ”înapoi”;

5. Diferențiala câmpului acustic de coordonate $X^i(t, dt)$, cu $i = 1, 2, 3$ se scrie sub forma:

$$d_{\pm} X^i(t, \Delta t) = d_{\pm} x^i(t) + d_{\pm} \xi^i(t, dt) \quad (5.5)$$

unde $d_{\pm} x^i$ definește componenta diferențiabilă și independentă de scala de rezoluție acustică a câmpului de coordonate acustic, iar $d_{\pm} \xi^i$ definește componenta fractală și dependentă de scala de rezoluție acustică a aceluiași câmp de coordonate acustic;

6. Ecuația fractală se scrie sub forma [116, 117]:

$$d_{\pm} \xi^i(t, dt) = X \mu_{\pm}^i (dt)^{1/D_F} \quad (5.6)$$

unde μ_{\pm}^i sunt niște coeficienți constanți cu semnificații statistice directe (așa cum vom arăta mai târziu), iar D_F este dimensiunea fractală a curbei fractale acustice (ceea ce ar corespunde unui principiu de fractalizare prin stohasticizare). Pentru dimensiunea fractală se poate utiliza orice definiție (dimensiune fractală în sens Kolmogorov, dimensiune fractală în sens Hausdorff-Besikovici etc. [100, 101, 102], însă odată ce acceptăm una din definițiile mai sus menționate, aceasta va rămâne constantă ca valoare pe parcursul întregii analize dinamice. Ecuația (5.6) o vom numi ecuația fractală acustică;

7. Recuperarea invarianței infimezimate temporale pentru orice variabilă dinamică se obține prin aplicarea procedurii lui Cresson [38, 39] de ”extindere a diferențiabilității” la o varietate complexă. Aceasta implică considerarea simultană a proceselor acustice ”înainte” și a celor ”înapoi” sub forma operatorului fractal (îl vom numi operator fractal acustic [116, 117]:

$$\frac{\hat{d}}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_+ + d_-}{dt} \right) - \frac{i}{2} \left(\frac{d_+ - d_-}{dt} \right) \quad (5.7)$$

În particular, aplicând operatorul fractal (5.7) câmpului de coordonate acustic X^i se obține câmpul vitezelor complexe acustice sub forma:

$$\hat{v}^i = \frac{\hat{d} X^i}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_+ X^i + d_- X^i}{dt} \right) - \frac{i}{2} \left(\frac{d_+ X^i - d_- X^i}{dt} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{d_+ x^i + d_- x^i}{dt} + \frac{d_+ \xi^i + d_- \xi^i}{dt} \right) - \frac{i}{2} \left(\frac{d_+ x^i - d_- x^i}{dt} + \frac{d_+ \xi^i - d_- \xi^i}{dt} \right) \equiv V^i - iU^i \quad (5.8)$$

unde:

$$V^i = \frac{1}{2} (v_+^i + v_-^i), \quad U^i = \frac{1}{2} (v_+^i - v_-^i) \quad (5.9)$$

$$v_+^i = \frac{d_+ x^i + d_+ \xi^i}{dt}, \quad v_-^i = \frac{d_- x^i + d_- \xi^i}{dt} \quad (5.10)$$

În relațiile (5.9) și (5.10) componenta reală a câmpului vitezelor complexe acustice, V^i este diferențiabilă și independentă de rezoluția de scală acustică, în timp ce componenta imaginară a câmpului vitezelor complexe acustice, U^i , este fractală și dependentă de rezoluția de scală acustică.

Așadar, dacă varietatea spațială este fractală, în analiza dinamicii sistemului complex acustic vom opera, fie cu un singur câmp acustic și anume cel al vitezelor complexe acustice, fie cu două câmpuri reale de viteze acustice, câmpuri corespunzătoare componentei reale și imaginare a aceluiași câmp al vitezelor complexe acustice;

8. Între oricare două puncte ale unui spațiu fractal acustic există o infinitate de traiectorii (geodezice acustice). Atunci orice unitate structurală acustică a sistemului complex acustic este înlocuită prin propriile sale geodezice acustice așa încât orice măsurătoare va fi interpretată ca un proces de selecție a acestor geodezice pe baza ”instrumentației” compatibile cu spațiu fractal acustic. Infinitatea geodezicilor acustice pe spațiu fractal acustic, dublarea câmpului de viteze acustice, fractalitatea acustică a lor etc., sunt argumente suficiente de a substitui descrierea clasică a dinamicilor sistemelor complexe acustice

[105] cu cea de fluid statistic generalizat [116, 117] liber de orice interacții (fluid fractal acustic). Atunci media diferențialei câmpului de coordonate acustic X^i devine:

$$\langle d_{\pm} X^i \rangle = d_{\pm} x^i \quad (5.11)$$

De aici, prin medierea relației (5.5), se obține:

$$\langle d_{\pm} \xi^i \rangle = 0 \quad (5.12)$$

Prin urmare media diferențialei coordonatei fractale acustice este nulă.

5.3. Derivata covariantă fractală

Fie o curbă fractală acustică pe un spațiu fractal acustic și fie X^i componentele vectorului de poziție acustic al unui punct de pe curba fractală acustică. Fie de asemenea o funcție de câmp acustic $Q(X^i, t)$ de clasă necesară (derivabilă și continuă) și dezvoltarea în serie Taylor de ordin doi a ei sub forma:

$$dQ = Q(X^i + dX^i, t + dt) - Q(X^i, t) = (\partial_t dt + \partial_i dX^i)Q(X^i, t) + \frac{1}{2}(\partial_t dt + \partial_i dX^i)^2 Q(X^i, t) \quad (5.13)$$

unde sumarea se face după indicii repetabili.

Dezvoltarea (5.13) este valabilă, în general, în orice punct al spațiului varietății tridimensionale deci și pentru toate punctele curbei fractale acustice. Selectând doar punctele de pe curbele fractale acustice, ceea ce implica scufundarea pe varietatea spațială tridimensională fractală acustică (spațiu fractal acustic), relația (5.13) ia forma.

$$d_{\pm} Q = \partial_t Q dt + \partial_i Q d_{\pm} X^i + \frac{1}{2} \partial_{tt}^2 Q dt^2 + \partial_i \partial_t Q d_{\pm} X^i dt + \frac{1}{2} \partial_i \partial_t Q d_{\pm} X^i d_{\pm} X^l \quad (5.14)$$

De aici, prin mediere obținem:

$$\begin{aligned} \langle d_{\pm} Q \rangle = & \langle \partial_t Q dt \rangle + \langle \partial_i Q d_{\pm} X^i \rangle + \frac{1}{2} \langle \partial_{tt}^2 Q dt^2 \rangle + \langle \partial_i \partial_t Q d_{\pm} X^i dt \rangle + \\ & + \frac{1}{2} \langle \partial_i \partial_t Q d_{\pm} X^i d_{\pm} X^l \rangle \end{aligned} \quad (5.15)$$

În continuare vom admite că valorile medii ale funcției acustice Q și ale derivatelor sale coincid cu ele însele, iar diferențialele $d_{\pm} X^i$ și dt sunt independente. În consecință media produsului lor coincide cu produsul mediilor. Prin urmare relația (5.15) ia forma:

$$\begin{aligned} d_{\pm} Q = & \partial_t Q dt + \partial_i Q \langle d_{\pm} X^i \rangle + \frac{1}{2} \partial_{tt}^2 Q \langle dt^2 \rangle + \partial_i \partial_t Q \langle d_{\pm} X^i dt \rangle + \\ & + \frac{1}{2} \partial_i \partial_t Q \langle d_{\pm} X^i d_{\pm} X^l \rangle \end{aligned} \quad (5.16)$$

Folosind mai departe relația (5.5) cu proprietățile (5.12) rezultă:

$$\begin{aligned} d_{\pm} Q = & \partial_t Q dt + \partial_i Q d_{\pm} x^i + \frac{1}{2} \partial_{tt}^2 Q (dt)^2 + \partial_i \partial_t Q d_{\pm} x^i dt + \\ & + \frac{1}{2} \partial_i \partial_t Q \langle d_{\pm} x^i d_{\pm} x^l + d_{\pm} \xi^i d_{\pm} \xi^l \rangle \end{aligned} \quad (5.17)$$

Deoarece prin intermediul ecuației fractale acustice (5.6) se obține relația:

$$\langle d_{\pm} \xi^i d_{\pm} \xi^l \rangle = \pm \mu_{\pm}^i \mu_{\pm}^l (dt)^{(2/D_F)-1} dt, \quad (5.18)$$

cu convenția că semnul "+" corespunde lui $dt > 0$ iar semnul "-" corespunde lui $dt < 0$, relația (5.17) devine:

$$\begin{aligned} d_{\pm} Q = & \partial_t Q dt + \partial_i Q d_{\pm} x^i + \frac{1}{2} \partial_{tt}^2 Q (dt)^2 + \partial_i \partial_t Q d_{\pm} x^i dt + \\ & + \frac{1}{2} \partial_i \partial_t Q d_{\pm} x^i d_{\pm} x^l \pm \frac{1}{2} \mu_{\pm}^i \mu_{\pm}^l (dt)^{(2/D_F)-1} \partial_i \partial_t Q \rangle \end{aligned} \quad (5.19)$$

Această relație multiplicată cu $(dt)^{-1}$ și omițând termenii care conțin factori diferențiali, conform metodologiei [1, 2, 3, 4, 31] devine:

$$\frac{d_{\pm} Q}{dt} = \partial_t Q + v_{\pm}^i \partial_i Q + \frac{1}{2} \mu_{\pm}^i \mu_{\pm}^l (dt)^{(2/D_F)-1} \partial_i \partial_t Q \quad (5.20)$$

De aici rezultă operatorii:

$$\frac{d_{\pm}}{dt} = \partial_t + v_{\pm}^i \partial_i + \frac{1}{2} \mu_{\pm}^i \mu_{\pm}^l (dt)^{(2/D_F)-1} \partial_i \partial_l \quad (5.21)$$

Acum putem explicita operatorul fractal acustic \hat{d}/dt pe baza relațiilor (5.7), (5.9), (5.10), (5.11), (5.21) și se obține:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{d}}{dt} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{d_+}{dt} \right) - i \left(\frac{d_-}{dt} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \left[\partial_t + v_+^i \partial_i + \frac{1}{2} \mu_+^i \mu_+^l (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \partial_i \partial_l \right] + \left[\partial_t + v_-^i \partial_i - \frac{1}{2} \mu_-^i \mu_-^l (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \partial_i \partial_l \right] \right\} - \\ &- \frac{i}{2} \left\{ \left[\partial_t + v_+^i \partial_i + \frac{1}{2} \mu_+^i \mu_+^l (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \partial_i \partial_l \right] - \left[\partial_t + v_-^i \partial_i - \frac{1}{2} \mu_-^i \mu_-^l (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \partial_i \partial_l \right] \right\} = \partial_t + \\ &+ \left(\frac{v_+^i + v_-^i}{2} - i \frac{v_+^i - v_-^i}{2} \right) \partial_i + \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} [(\mu_+^i \mu_+^l - \mu_-^i \mu_-^l) - (\mu_+^i \mu_+^l + \mu_-^i \mu_-^l)] \partial_i \partial_l = \partial_t + + \hat{V}^i \partial_i + \\ &\quad \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} D^{il} \partial_i \partial_l \quad (5.22) \end{aligned}$$

unde s-au făcut notațiile:

$$D^{il} = d^{il} - i \bar{d}^{il}, \quad d^{il} = \mu_+^i \mu_+^l - \mu_-^i \mu_-^l, \quad \bar{d}^{il} = \mu_+^i \mu_+^l + \mu_-^i \mu_-^l \quad (5.23)$$

În final găsim operatorul fractal acustic (care va fi numită derivata covariantă acustică) sub forma:

$$\frac{\hat{d}}{dt} = \partial_t + \hat{V}^i \partial_i + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{il} \partial_i \partial_l \quad (5.24)$$

5.4. Principiul covarianței de scală și legile de conservare

Putem implementa principiul covarianței acustice de scală (legile acusticii rămân invariante la transformările scalelor de rezoluție acustice) postulând că tranziția de la acustica clasică, adică cea compatibilă cu mișcările acustice pe curbe continue și diferențiabile, la acustica fractală, adică cea compatibilă cu mișcările pe curbe continue și nediferențiabile (curbe fractale acustice) și pe care o considerăm aici, se obține prin substituirea operatorului standard d/dt cu cel fractal \hat{d}/dt . Astfel, aplicând derivata covariantă acustică (5.24) câmpului vitezelor complexe acustice (5.8) rezultă legea de conservare a impulsului acustic specific generalizat, adică impulsul acustic generalizat al unității de masă, sub forma:

$$\frac{\hat{d}\hat{V}^i}{dt} = \partial_t \hat{V}^i + \hat{V}^l \partial_l \hat{V}^i + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_k \partial_l \hat{V}^i = 0 \quad (5.25)$$

Relația (5.25) corespunde ecuației geodezicelor acustice. Așadar, „acelerația acustică locală” $\partial_t \hat{V}^i$, „convecția acustică” $\hat{V}^l \partial_l \hat{V}^i$ și „dipația acustică” $4^{-1} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_k \partial_l \hat{V}^i$ își fac echilibru în orice punct al traiectoriei de mișcare al unităților structurale acustice. Prezența „acelerațiilor complexe acustice” $\hat{d}\hat{V}^i/dt$, $\partial_t \hat{V}^i$, vitezei complexe acustice \hat{V}^i și a coeficientului de tip viscozitate complexă acustică $4^{-1} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk}$ specifică faptul că fluidul fractal acustic are proprietăți reologice, adică are memorie. Din relația (5.25) prin separarea mișcărilor unităților structurale acustice pe scale de rezoluție acustice rezultă legea de conservare a impulsului acustic specific generalizat pentru scala de rezoluție acustică diferențială:

$$\frac{\hat{d}U^i}{dt} = \partial_t U^i + V^l \partial_l U^i - U^l \partial_l U^i + \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} d^{kl} \partial_k \partial_l U^i - \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \bar{d}^{kl} \partial_k \partial_l U^i = 0 \quad (5.26)$$

respectiv, legea de conservare a impulsului acustic specific generalizat pentru scala de rezoluție acustică fractală:

$$\frac{\hat{d}U^i}{dt} = \partial_t U^i + V^l \partial_l U^i + U^l \partial_l U^i + \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} d^{kl} \partial_k \partial_l U^i + \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \bar{d}^{kl} \partial_k \partial_l U^i = 0 \quad (5.27)$$

Aplicând derivata covariantă acustică (5.24) densității acustice de stări ρ se obține legea de conservare

a densității de stări acustice, sub forma:

$$\frac{\hat{\rho}}{dt} = \partial_t \rho + \hat{V}^l \partial_l \rho + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_l \partial_k \rho = 0 \quad (5.28)$$

În relația (5.28) prin separarea mișcărilor pe scale de rezoluție rezultă legea de conservare a densității acustice de stări pentru scala de rezoluție acustică diferențială:

$$\partial_t \rho + V^l \partial_l \rho + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} d^{lk} \partial_l \partial_k \rho = 0, \quad (5.29)$$

respectiv, legea de conservare a densității acustice de stări pentru scala de rezoluție acustică fractală:

$$U^l \partial_l \rho + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} \bar{d}^{lk} \partial_l \partial_k \rho = 0 \quad (5.30)$$

Relațiile (5.25) și (5.28) definesc ecuațiile hidrodinamicii fractale acustice pentru câmpuri de viteze complexe acustice, în timp ce relațiile (5.26), (5.27), (5.29) și (5.30) definesc ecuațiile hidrodinamicii fractale acustice pentru câmpuri de viteze reale (adică pentru mișcări ale unității structurale acustice ale sistemelor complexe acustice, separate pe scale de rezoluție acustice).

5.5. Ecuația de mișcare a unui „mediu” fractal

Pentru un mediu fractal de volum fractal \hat{V} și suprafață fractală $\hat{\Sigma}$, câmpurile de deplasări nediferențiabile și viteze nediferențiabile ale „elementului nediferențiabil”, $d\hat{V} = dx dy dz$, sunt date prin \hat{R}_l , respectiv \hat{V}_l . Să notăm că atât suprafețele, cât și volumele mediilor fractale sunt caracterizate de o mărime D_T numită dimensiune topologică [100, 101, 102] și care devine explicit dependentă de rezoluția de scală atunci când sunt analizate dinamicele acestora. Atunci coordonatele spațiale sunt funcții continue și nediferențiabile (funcții fractale). Dacă asupra mediului fractal se exercită atât forțe de suprafață fractale / forțe de tracțiune fractale \hat{T}_l ,

$$\int_{\hat{\Sigma}} \hat{T}_l d\hat{\Sigma} \quad (5.31)$$

cât și forțe volumice fractale \hat{f}_i ,

$$\int_{\hat{V}} \rho \hat{f}_i d\hat{V} \quad (5.32)$$

atunci derivata în timp (derivata covariantă acustică) a impulsului acustic specific generalizat implică:

$$\frac{\hat{d}}{dt} \int \rho \hat{V}_i d\hat{V} = \int_{\hat{\Sigma}} \hat{T}_l d\hat{\Sigma} + \int_{\hat{V}} \rho \hat{f}_i d\hat{V} \quad (5.33)$$

Întrucât forța de tracțiune fractală poate fi legată de tensorul de ordinul doi al tensiunilor fractale $\hat{\sigma}_{il}$ prin relația:

$$\hat{T}_l \hat{\Sigma}_i = \hat{\sigma}_{il} \hat{n}_l \quad (5.34)$$

unde \hat{n}_l este versorul normal fractal în raport cu suprafața $d\hat{\Sigma}$, atunci substituind relația (5.34) în (5.33) se găsește:

$$\frac{\hat{d}}{dt} \int \rho \hat{V}_i d\hat{V} = \int_{\hat{\Sigma}} \hat{\sigma}_{il} \hat{n}_l d\hat{\Sigma} + \int_{\hat{V}} \rho \hat{f}_i d\hat{V} \quad (5.35)$$

Ecuația (5.35) mai poate fi presupusă având în vedere teorema lui Green aplicată integralei fractale de suprafață [37, 38, 39, 52] și presupunând că sub acțiunea câmpului forțelor fractale volumul mediului fractal nu se modifică. Rezultă:

$$\int \frac{\hat{d}}{dt} (\rho \hat{V}_i) d\hat{V} = \int \partial_l \hat{\sigma}_{il} d\hat{V} + \int \rho \hat{f}_i d\hat{V} \quad (5.36)$$

sau încă, ținând seama de forma explicită a lui \hat{d}/dt (vezi relația (5.24)) și aplicând condiția de incompresibilitate:

$$\partial_l \hat{V}_i = 0, \quad (5.37)$$

$$\int \left[\partial_l (\rho \hat{V}_i) + \partial_l (\rho \hat{V}_i \hat{V}_l) + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_l \partial_k (\rho \hat{V}_i) - \partial_l \hat{\sigma}_{il} - \rho \hat{f}_i \right] d\hat{V} = 0 \quad (5.38)$$

Relația de mai sus este satisfăcută dacă și numai dacă este îndeplinită condiția:

$$\partial_l (\rho \hat{V}_i) + \partial_l (\rho \hat{V}_i \hat{V}_l) + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_l \partial_k (\rho \hat{V}_i) - \partial_l \hat{\sigma}_{il} - \rho \hat{f}_i = 0 \quad (5.39)$$

Întrucât relația (5.39) se mai scrie și sub forma:

$$\rho \partial_t \hat{V}_i + \rho \hat{V}_i \partial_t \hat{V}_i + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} \rho D^{lk} \partial_l \partial_k \hat{V}_i - \partial_l \hat{\sigma}_{il} - \rho \hat{f}_i + \hat{V}_i \left[\partial_t \rho + \partial_l \rho \hat{V}_l + \frac{1}{4} (dt)^{(2/D_F)-1} D^{lk} \partial_l \partial_k \rho \right] = 0 \quad (5.40)$$

și știind că suma termenilor din paranteza pătrată este nulă în virtutea legii de conservare a densității acustice de stări (vezi relația (5.28)), relația de mai sus se reduce la expresia:

$$\partial_t \hat{V}_i + \hat{V}_i \partial_t \hat{V}_i + \frac{1}{4} (dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} D^{lk} \partial_l \partial_k \hat{V}_i = \rho^{-1} \partial_l \hat{\sigma}_{il} + \hat{f}_i \quad (5.41)$$

Relația (5.41) reprezintă ecuația de mișcare a unui „element nediferențabil” și se poate constitui ca o ecuație de tip Navier-Stokes generalizată.

5.6. Modele de mediu fractal. Mediul elastic fractal. Legea fractală de tip Hook generalizată

Dacă mediul elastic fractal este liniar și izotrop deformațiile sunt mici comparativ cu o dimensiune minimă relevantă a acestuia (de regulă aceasta este specificată prin experiment), tensorul deformațiilor fractale $\hat{\varphi}_{il}$ se raportează la câmpul de deplasări nediferențabile R_i prin intermediul mediei lui $R_{i,l} = \partial_l R_i$,

$$\hat{\varphi}_{il} = \frac{1}{2} (R_{i,l} + R_{l,i}) = \frac{1}{2} (\partial_l R_i + \partial_i R_l) \quad (5.42)$$

Într-o asemenea conjunctură tensorul tensiunilor fractale $\hat{\sigma}_{il}$ poate fi corelat cu tensorul deformațiilor fractale $\hat{\varphi}_{il}$ prin intermediul unei legi fractale de tip Hook generalizată:

$$\hat{\sigma}_{il} = \hat{\lambda} \hat{\theta} \delta_{il} + 2\hat{\mu} \hat{\varphi}_{il} \quad (5.43)$$

unde:

$$\hat{\theta} = \hat{\varphi}_{kk} = \hat{\varphi}_{11} + \hat{\varphi}_{22} + \hat{\varphi}_{33} \quad (5.44)$$

δ_{il} este pseudotensorul lui Kronecker:

$$\delta_{il} = \begin{cases} 1 & \text{pentru } i = l \\ 0 & \text{pentru } i \neq l, \end{cases} \quad (5.45)$$

iar $\hat{\lambda}$ și $\hat{\mu}$ sunt coeficienți fractali de tip Lamée ($\hat{\lambda}$ primul parametru fractal de tip Lamée și $\hat{\mu}$ al doilea parametru fractal de tip Lamée). Pentru mediul elastic clasic se poate consulta referința [137].

Pentru a obține legea fractală de tip Hook unidimensională din legea fractală de tip Hook generalizată vom parcurge următoarele etape:

1. Vom calcula suma elementelor de pe diagonala principală a tensorului $\hat{\sigma}_{il}$ (de regulă ea este numită trasa tensorului). Se obține:

$$\hat{s} = \hat{\sigma}_{kk} = \hat{\sigma}_{11} + \hat{\sigma}_{22} + \hat{\sigma}_{33} = \hat{\lambda} \hat{\theta} \delta_{kk} + 2\hat{\mu} \hat{\varphi}_{kk} = (3\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}) \hat{\theta} \quad (5.46)$$

2. Vom calcula dependența funcțională:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_{il} &= \hat{\varphi}_{il}(\hat{\sigma}_{il}), \\ \text{Explicit, prin relațiile (5.43) și (5.46), se obține:} \\ \hat{\varphi}_{il} &= \frac{\hat{\sigma}_{il}}{2\hat{\mu}} - \frac{\hat{\lambda} s \delta_{il}}{2\hat{\mu}(3\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})} \end{aligned} \quad (5.47)$$

3. Existența unei stări de tensiuni unidimensionale fractale,

$$\hat{\sigma}_{11} \neq 0, \hat{\sigma}_{12} = \hat{\sigma}_{21} = \hat{\sigma}_{13} = \hat{\sigma}_{31} = \hat{\sigma}_{23} = \hat{\sigma}_{32} = \hat{\sigma}_{33} = 0 \quad (5.48)$$

transformă relația (5.47) sub forma:

$$\hat{\varphi}_{11} = \frac{\hat{\lambda} + \hat{\mu}}{\hat{\mu}(3\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})} \hat{\sigma}_{11} \quad (5.49)$$

4. Vom calcula din relația (5.49) dependența:

$$\hat{\sigma}_{11} = \hat{\sigma}_{11}(\hat{\varphi}_{11})$$

Se găsește:

$$\hat{\sigma}_{11} = \frac{\hat{\mu}(3\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})}{\hat{\lambda} + \hat{\mu}} \hat{\varphi}_{11} \quad (5.50)$$

În aceste condiții făcând substituțiile:

$$\hat{E} = \frac{\hat{\mu}(3\hat{\lambda}+2\hat{\mu})}{\hat{\lambda}+\hat{\mu}}, \hat{\sigma} = \hat{\sigma}_{11}, \hat{\varphi} = \hat{\varphi}_{11} \quad (5.51)$$

se găsește legea fractală de tip Hook unidimensională:

$$\hat{\sigma} = \hat{E}\hat{\varphi} \quad (5.52)$$

unde $\hat{\sigma}$ este tensiunea fractală unidimensională, $\hat{\varphi}$ este ”deformația” fractală și \hat{E} modulul fractal de tip Young.

5.7. Ecuații de propagare în medii elastice fractale

Dacă deformațiile unui mediu elastic fractal sunt mici comparativ cu o dimensiune minimă relevantă a unui astfel de mediu, atunci în ecuația (5.41) putem neglija termenii de ordinul doi așa încât aceasta ia forma simplă:

$$\partial_t \hat{V}_i = \rho^{-1} \partial_l \hat{\sigma}_{il} + \hat{f}_i \quad (5.53)$$

unde am admis faptul că în aceeași aproximație ca mai sus funcționează și relația:

$$\partial_t \hat{V}_i = \partial_t \partial_l R_l \quad (5.54)$$

Substituind acum relația (5.43) în relația (5.53) se obține ecuația fractală de tip Navier-Stokes:

$$\rho^{-1}(\hat{\lambda} + \hat{\mu})\partial_i \partial_l R_l + \rho^{-1}\hat{\mu}\partial_l \partial_l R_l + \hat{f}_i = \partial_t \partial_t R_l \quad (5.55)$$

Mai mult, în absența forțelor volumicefractale $\hat{f}_i \equiv 0$, ecuația (5.55) se reduce la forma:

$$\rho^{-1}(\hat{\lambda} + \hat{\mu})\partial_i \partial_l R_l + \rho^{-1}\hat{\mu}\partial_l \partial_l R_l = \partial_t \partial_t R_l \quad (5.56)$$

sau în notații vectoriale, utilizând operatorii gradient (∇), divergență ($\nabla \cdot$) și Laplacian ($\nabla^2 \equiv \Delta$),

$$(\hat{\lambda} + \hat{\mu})\nabla(\nabla \mathbf{R}) + \hat{\mu}\Delta \mathbf{R} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{R}}{\partial t^2} \quad (5.57)$$

Acum, prin extinderea teoremei lui Helmholtz de descompunere a unui vector clasic [9] la cea de descompunere a unui vector fractal, fie acesta \mathbf{R} , vom avea:

$$\mathbf{R} = \nabla \varphi + \nabla \times \Psi \quad (5.58)$$

unde:

$$\nabla \Psi = 0 \quad (5.59)$$

În relațiile (5.58) și (5.59) φ este o funcție scalară complexă, iar Ψ este o funcție vectorială complexă. Substituind relația (5.58) în ecuația (5.57) se obține:

$$(\hat{\lambda} + \hat{\mu})\nabla[\nabla(\nabla \varphi + \nabla \times \Psi)] + \hat{\mu}\Delta(\nabla \varphi + \nabla \times \Psi) = \xi \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\nabla \varphi + \nabla \times \Psi) \quad (5.60)$$

sau încă, printr-o rearanjare adecvată a termenilor,

$$\nabla \left[(\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})\Delta \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right] + \nabla \times \left(\hat{\mu}\Delta \Psi - \xi \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (5.61)$$

Ecuația (5.61) este satisfăcută dacă și numai dacă fiecare din expresiile din paranteze se anulează, adică:

$$(\hat{\lambda} + 2\hat{\mu})\Delta \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.62)$$

$$\hat{\mu}\Delta \Psi - \xi \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.63)$$

sau încă, introducând vitezele fractale specifice c_p și c_s prin relațiile:

$$\hat{c}_p^2 = \left(\frac{\hat{\lambda} + 2\hat{\mu}}{\rho} \right) \quad (5.64)$$

$$\hat{c}_s^2 = \left(\frac{\hat{\mu}}{\rho} \right) \quad (5.65)$$

$$\Delta \varphi - \frac{1}{\hat{c}_p^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.66)$$

$$\Delta \Psi - \frac{1}{\hat{c}_s^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (5.67)$$

Relația (5.66) corespunde ecuației de propagare a undelor fractale de tip primar (unde fractale de tip longitudinal) cu \hat{c}_p viteza undelor fractale de tip primar, iar relația (5.67) corespunde ecuației de propagare

a undelor fractale de tip secundar (unde fractale de tip transversal) cu \hat{c}_s viteza undelor fractale de tip secundar.

Câteva concluzii sunt evidente:

1. În aproximația micilor deformații ale unui mediu elastic fractal, câmpul scalar complex φ și câmpul vectorial complex Ψ , componente ale aceluiași câmp fractal de deformații, se decuplează – vezi ecuațiile (5.66) și (5.67);

2. Întrucât parametrii fractali de tip Lamée $\hat{\lambda}$ și $\hat{\mu}$ sunt niște constante complexe, rezultă că și vitezele specifice, adică \hat{c}_p și \hat{c}_s respectă aceeași proprietate. Se ”statuează” astfel faptul că un mediu elastic fractal prezintă proprietăți reologice, adică se comportă ca un mediu cu memorie. Atunci expresii ale ”coeficienților de structură” de forma:

$$\hat{\lambda} = \lambda_0 \varphi^{i\varphi\lambda}, \quad \hat{\mu} = \mu_0 \varphi^{i\varphi\mu}, \quad \hat{c}_p = c_{p0} \varphi^{i\varphi p}, \quad \hat{c}_s = c_{s0} \varphi^{i\varphi s},$$

reflectă prin partea reală a lor, $R_e \hat{\lambda}$, $R_e \hat{\mu}$, $R_e \hat{c}_p$, $R_e \hat{c}_s$, proprietăți de tip ”transparentă”, în timp ce prin partea lor imaginară, $l_m \hat{\lambda}$, $l_m \hat{\mu}$, $l_m \hat{c}_p$, $l_m \hat{c}_s$, reflectă proprietăți de tip ”absorbție”. De aceea o ”perturbație sonoră” care se propagă într-un mediu fractal are un comportament atât de complex (de exemplu este absorbită, prezintă o ”sensibilitate” crescută a coeficientului de absorbție cu pulsația undei sonore etc.).

5.8. Legi de conservare prin fractalitate de tip Markov

Dacă fractalitatea curbei de mișcare se realizează prin procese stohastice de tip Markov [116, 117], adică:

$$\mu_+^l \mu_+^l = \mu_-^l \mu_-^l = \mu \delta^{ll}, \quad (5.68)$$

Derivata covariantă acustică (5.24) ia forma:

$$\frac{\hat{a}}{dt} = \partial_t + \hat{V}^l \partial_l - i \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \partial_l \quad (5.69)$$

Atunci legea de conservare a impulsului acustic specific generalizat (5.25), devine:

$$\frac{\hat{a} \hat{V}^i}{dt} = \partial_t \hat{V}^i + \hat{V}^l \partial_l \hat{V}^i - i \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \partial_l \hat{V}^i = 0 \quad (5.70)$$

sau încă, prin separarea scalelor de rezoluție acustice (cea diferențială și cea fractală):

$$\frac{\hat{a} V^i}{dt} = \partial_t V^i + V^l \partial_l V^i - \left[U^l + \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \right] \partial_l U^i = 0 \quad (5.71)$$

$$\frac{\hat{a} U^i}{dt} = \partial_t U^i + V^l \partial_l U^i + \left[U^l + \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \right] \partial_l V^i = 0 \quad (5.72)$$

Dacă câmpul vitezelor complexe acustice este irotațional (fără vârtejuri) atunci acesta se exprimă prin gradientul unei funcții scalare complexe numit potențialul scalar acustic al câmpului de viteze complexe acustice și este de forma:

$$\hat{V}^i = i\mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial_i \ln \Psi \quad (5.73)$$

Pe baza relației (5.73) ecuația geodezicilor acustice (5.70) devine:

$$\begin{aligned} \frac{\hat{a} V^i}{dt} &= i\mu(dt)^{\left(\frac{2}{D_F}\right)-1} \partial_t \partial_i \ln \Psi + \\ &+ \left[i\mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \ln \Psi - i \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^l \right] i\mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial_i \partial_l \ln \Psi = 0 \end{aligned} \quad (5.74)$$

sau încă, utilizând relațiile:

$$\partial_i (\partial_l \ln \Psi \partial^l \ln \Psi) = 2 \partial^l \ln \Psi \partial_i \partial_l \ln \Psi \quad (5.75)$$

$$\partial_i \partial_l \partial^l \ln \Psi = \partial^l \partial_i \partial_l \ln \Psi \quad (5.76)$$

$$\partial_i (\partial_l \ln \Psi \partial^l \ln \Psi + \partial_l \partial^l \ln \Psi) = \partial_i \left(\frac{\partial_l \partial^l \Psi}{\Psi} \right), \quad (5.77)$$

se obține ecuația geodezicilor acustice sub forma:

$$i\mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial_t \partial_i \ln \Psi + \mu^2 (dt)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \partial_i \left(\frac{\partial_l \partial^l \Psi}{\Psi} \right) = 0 \quad (5.78)$$

Integrând relația (5.78), abstracție făcând de un factor de fază nul printr-o alegere convenabilă a fazei lui Ψ , obținem ecuația de tip Schrödinger:

$$\mu^2 (dt)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \partial_i \partial^i \Psi + i\mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial_t \Psi = 0 \quad (5.79)$$

Pentru $\Psi = \sqrt{\rho} \exp(iS)$, unde $\sqrt{\rho}$ este o amplitudine iar S este o fază, relația (5.73) permite definirea vitezei diferențiale acustice:

$$V^i = \mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial^i S \quad (5.80)$$

și a vitezei fractale acustice:

$$U^i = \mu(dt)^{(2/D_F)-1} \partial^i \ln \sqrt{\rho} \quad (5.81)$$

Întrucât identitățile (5.75), (5.76) și (5.77) funcționează și în variabila $\ln \sqrt{\rho}$ vom avea relația:

$$\left[U^i + \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^i \right] \partial_i U^i = \frac{\mu^2}{2} (dt)^{(4/D_F)-2} \partial^i \left(\frac{\partial_i \partial^i \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right)$$

ceea ce induce potențialul fractal acustic specific:

$$Q = -\frac{\mu^2}{2} (dt)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \left(\frac{\partial^i \partial_i \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right) \quad (5.82)$$

respectiv forța fractală specifică:

$$F^i = \frac{\mu^2}{2} (dt)^{(4/D_F)-2} \partial^i \left(\frac{\partial^i \partial_i \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right) = \left[U^i + \frac{\mu}{2} (dt)^{(2/D_F)-1} \partial^i \right] \partial_i U^i \quad (5.83)$$

În aceste condiții legea de conservare a impulsului acustic specific, ecuația (5.71), ia forma:

$$\partial_t V^i + (V^j \partial_j) V^i = F^i = -\partial^i Q \quad (5.84)$$

Legea de conservare a impulsului acustic specific la scală fractală, ecuația (5.72), având în vedere relația (5.81) devine:

$$\partial^i [\partial_t \ln \rho + V^j \partial_j \ln \rho + \partial_t V^i] = 0 \quad (5.85)$$

Integrând relația de mai sus, abstracție făcând de un factor arbitrar care poate fi ales zero printr-o alegere convenabilă a fazei lui Ψ , se obține legea de conservare a densității acustice de stări:

$$\partial_t \rho + \partial_t (\rho V^i) = 0 \quad (5.86)$$

Ecuațiile (5.84) și (5.86) cu potențialul fractal acustic specific (5.82) definesc setul de ecuații al hidrodinamicii acustice fractale în dimensiune fractală constantă dar arbitrară.

5.9. Propagarea unei "perturbații" sonore într-un mediu fractal

Să considerăm legea de conservare a impulsului acustic specific, ecuația (5.84), legea de conservare a densității acustice de stări, ecuația (5.86) și expresia potențialului fractal acustic specific, ecuația (5.82), pentru cazul unidimensional:

$$\partial_t V + V \partial_x V = -\partial_x \left[-\frac{\mu^2}{2} (dt)^{(4/D_F)-2} \left(\frac{\partial_x^2 \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right) \right] \quad (5.87)$$

$$\partial_t \rho + \partial_x (\rho V) = 0 \quad (5.88)$$

În cele ce urmează ne propunem să obținem soluția sistemului de ecuații (5.87) și (5.88) pentru condițiile inițiale:

$$V(x, t = 0) \equiv V_0 (\text{viteza sunetului}) \quad (5.89)$$

$$\rho(x, t = 0) = (1/\pi^{1/2} \alpha) \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^2 \right] = \rho_0(x) \quad (5.90)$$

și cele pe frontieră:

$$\rho(x \rightarrow +\infty, t) \equiv 0, \quad \rho(x \rightarrow -\infty, t) \equiv 0 \quad (5.91)$$

$$V(x = V_0 t, t) = 0 \quad (5.92)$$

În acest scop vom urma procedura din [106]. Pentru orice $t \geq 0$ sau $t \leq 0$ în conformitate cu [106] vom avea $\langle (-\partial_x Q) \rangle \equiv \langle F_i \rangle$. Acest fapt sugerează că ecuația (5.87) poate fi separată sub forma:

$$\partial_x \left(\frac{\partial_x^2 \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} \right) = \frac{2}{\lambda(t)} (x - V_0 t) \quad (5.93)$$

respectiv:

$$\partial_t V + V \partial_x V = \frac{\mu^2(dt)^{(4/D_F)-2}}{\lambda(t)} (x - V_0 t) \quad (5.94)$$

Integrarea ecuației (5.93), luând în considerare condițiile pe frontieră (5.91), induce soluția:

$$\rho = [\pi \lambda(t)]^{-1/2} \exp \left[-\frac{(x-V_0 t)^2}{\lambda(t)} \right] \quad (5.95)$$

Funcția (5.95) satisface condiția (5.90) dacă și numai dacă valoarea inițială a lui $\lambda(t)$ are forma:

$$\lambda(t=0) = \alpha^2 \quad (5.96)$$

”Inserția” lui (5.95) în ecuația (5.88) specifică faptul că pentru $x = V_0 t$ este realizată condiția:

$$(2\lambda)^{-1} \partial_t \lambda = (\partial_x V)_{x=V_0 t} \quad (5.97)$$

Luând în considerare relația de mai sus, ecuația diferențială pentru $\lambda(t)$ se obține ”performând” operația $(\partial_x)_{x=V_0 t}$ în (5.94). Se găsește:

$$\lambda \partial_{tt} \lambda - \frac{1}{2} (\partial_t \lambda)^2 = 2\mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} \quad (5.98)$$

Soluția ecuației (5.98) cu condiția inițială (5.96) satisfăcând proprietatea că $\rho(x)$ este real, este dată prin relația:

$$\lambda(t) = \alpha^2 + \mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} (t/\alpha)^2 \quad (5.99)$$

În acord cu relațiile (5.95) și (5.99) densitatea acustică de stări este o Gaussiană cu o dependență de timp a parametrului $\lambda(t)$ de forma (5.99) și ”împrăștiere” cu viteza V_0 , adică expresia:

$$\rho(x, t) = \frac{\pi^{-1/2}}{[\alpha^2 + \mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} (t/\alpha)^2]^{1/2}} \exp \left[-\frac{(x-V_0 t)^2}{\alpha^2 + \mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} (t/\alpha)^2} \right] \quad (5.100)$$

Similar, integrarea ecuației (5.94), cu condiția inițială (5.89) și cea pe frontieră (5.92), dă pentru câmpul de viteze acustice expresia:

$$V = \frac{V_0 \alpha^2 + \mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} (tx/\alpha^2)}{\alpha^2 + \mu^2 (dt)^{(4/D_F)-2} (t/\alpha)^2} \quad (5.101)$$

Relațiile (5.100) și (5.101) reprezintă soluția hidrodinamicii fractale acustice cu dimensiune fractală constantă dar arbitrară pentru o ”perturbație” acustică liberă de orice constrângere. În timp ce mișcarea ”observabilă” a perturbației acustice este uniformă, $\langle V \rangle = V_0$ mișcările asociate fractale (deci ”neobservabile”) sunt neomogene în x și t .

Pe baza soluției date prin relațiile (5.100) și (5.101) se pot construi următoarele variabile dinamice:

1. Densitatea de curent acustică:

$$j(x, t) = \rho(x, t) V(x, t) = \frac{V_0 \alpha^2 + \left(\frac{\mu(dt)^{(2/D_F)-1}}{\alpha} \right)^2 tx}{\left\{ \alpha^2 + \left[\frac{\mu(dt)^{(2/D_F)-1}}{\alpha} t \right]^2 \right\}^{3/2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x-V_0 t)^2}{\alpha^2 + \left[\frac{\mu(dt)^{(2/D_F)-1}}{\alpha} t \right]^2} \right\} \quad (5.102)$$

2. Potențialul fractal acustic specific:

$$Q = -\frac{\mu^2}{2} (dt)^{(4/D_F)-2} \left\{ \frac{(x-V_0 t)}{\alpha^2 + \left[\frac{\mu(dt)^{(2/D_F)-1}}{\alpha} t \right]^2} \right\}^2 \quad (5.103)$$

3. Forța fractală acustică specifică:

$$F(x, t) = -\partial_x Q = \frac{\mu^2}{2} (dt)^{(4/D_F)-2} \frac{(x-V_0 t)}{\left\{ \alpha^2 + \left[\frac{2\mu(dt)^{(2/D_F)-1}}{\alpha} t \right]^2 \right\}^2} \quad (5.104)$$

Pentru $\langle x \rangle = V_0 t$ relațiile (5.100)÷(5.104) iau formele succesive:

$$V(x = V_0 t) \rightarrow V_0, \quad (5.105)$$

$$\rho(x = V_0 t) \rightarrow \frac{\pi^{-1/2}}{\left\{ \alpha^2 + \left[\frac{\mu(dt)(2/D_F)-1}{\alpha} t \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5.106)$$

$$j(x = V_0 t) \rightarrow \frac{\pi^{-1/2} V_0}{\left\{ \alpha^2 + \left[\frac{\mu(dt)(2/D_F)-1}{\alpha} t \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5.107)$$

$$Q(x = V_0 t) \rightarrow 0 \quad (5.108)$$

$$F(x = V_0 t) \rightarrow 0 \quad (5.109)$$

Relațiile de mai sus pot fi încă simplificate prin introducerea coordonatelor adimensionale:

$$\xi = \frac{x}{\alpha}, \tau = \frac{tV_0}{\alpha}, 2\mu = \alpha V_0 \quad (5.110)$$

Astfel noile mărimi adimensionale care descriu dinamicele unei „perturbații” acustice devin dependente atât de ”constrângerile” externe, fie prin intermediul ”perturbației” Gaussiene de poziție, fie prin viteza inițială V_0 a aceleiași ”perturbații”, cât și de caracteristicile fractale ale mediului în care se propagă ”perturbația” (scala de rezoluție acustică, dimensiunea fractală D_F a curbei acustice nediferențiabile etc.).

Într-un asemenea cadru următoarele variabile dinamice adimensionabile pot fi definite:

1. Câmpul de viteze acustice (vezi figurile 5.1, 5.2, 5.3):

$$V(\xi, \tau) = \frac{V(\xi, \tau)}{V_0} = \frac{1+(dt)^{(4/D_F)-1}\xi\tau}{1+(dt)^{(4/D_F)-1}\tau^2} \quad (5.111)$$

2. Câmpul densității acustice de stări (vezi figurile 5.4, 5.5, 5.6):

$$N(\xi, \tau) = \pi^{1/2} \alpha \rho(\xi, \tau) = \left[1 + (dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2 \right]^{-1/2} \exp \left[-\frac{(\xi-\tau)^2}{1+(dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2} \right] \quad (5.112)$$

3. Câmpul densității de curent acustice (vezi figurile 5.7, 5.8, 5.9):

$$J(\xi, \tau) = \frac{\pi^{1/2}}{V_0} \rho(\xi, \tau) V(\xi, \tau) = \frac{1+(dt)^{(4/D_F)-2}\xi\tau}{\left[1+(dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2 \right]^{3/2}} \exp \left[-\frac{(\xi-\tau)^2}{1+(dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2} \right] \quad (5.113)$$

4. Potențialul fractal acustic specific:

$$q(\xi, \tau) = \frac{\alpha^2 Q(\xi, \tau)}{2\mu^2} = (dt)^{(4/D_F)-2} \left[\frac{(\xi-\tau)}{1+(dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2} \right]^2 \quad (5.114)$$

5. Câmpul de forțe fractale acustic:

$$f(\xi, \tau) = \frac{\alpha^3 F(\xi, \tau)}{2\mu^2} = (dt)^{(4/D_F)-2} \frac{(\xi-\tau)}{\left[1+(dt)^{(4/D_F)-2} \tau^2 \right]^2} \quad (5.115)$$

În cazul particular $\xi = \tau$ relațiile (5.111)÷(5.115) se reduc la expresiile:

$$V(\xi = \tau, \tau) \rightarrow 1 \quad (5.116)$$

$$N(\xi = \tau, \tau) \rightarrow \left[1 + (dt)^{(4/D_F)-2} \right]^{-1/2} \quad (5.117)$$

$$J(\xi = \tau, \tau) \rightarrow \left[1 + (dt)^{(4/D_F)-2} \right]^{-1/2} \quad (5.118)$$

$$q(\xi = \tau, \tau) \rightarrow 0 \quad (5.119)$$

$$f(\xi = \tau, \tau) \rightarrow 0 \quad (5.120)$$

5.10. Posibile corelații ale modelului teoretic cu experimentul

Acceptând modelele fractale în studiul dinamicilor ansamblului câmp sonor-mediul material asimilat cu un sistem complex (sistem complex acustic), întregul „arsenal” al acusticii clasice utilizat în analiza de dinamici (variabile, parametri, semnificații etc.) trebuie abandonat. Deci nu are sens să operăm cu principii, concepte, noțiuni etc. care implică spre exemplu drum liber mediu, secțiune de ciocnire, integrale de ciocnire etc., adică „elemente” specifice mișcărilor pe curbe continue și diferențiabile. Ele trebuie substituite cu principii, concepte, noțiuni etc. care implică „elemente” specifice mișcărilor pe curbe continue și nediferențiabile.

Să explicităm o asemenea situație considerând că „pseudo-ciocnirile” dintre unitățile structurale acustice ale unui sistem complex acustic sunt esențiale pentru dinamica la care ne referim. Într-adevăr, între oricare două „pseudo-ciocniri” succesive, traiectoria unității structurale acustice este o linie dreaptă (deci o curbă continuă și diferențiabilă), în timp ce în punctul de impact corespunzător „pseudo-ciocnirii” ea devine nediferențiabilă. Considerând că toate punctele de impact asociate „pseudo-ciocnirilor” formează o mulțime nenumerabilă de puncte, rezultăm că traiectoria devine un fractal. Într-o asemenea conjunctură, numai prin „manipularea” densității acustice de stări și a câmpului de viteze acustic (vezi relațiile (5.100) și (5.101)) ca variabile dinamice, atât în spațiul uzual cât și în cel de scală, pot fi definite noi mărimi acustice care să le substituie pe cele standard din acustica clasică.

Pentru moment „fluctuațiile” densității acustice de stări:

$$\Delta N(\xi, \bar{\tau}, \bar{\mu}) = N(0, 0, \bar{\mu}) - N(\xi, \tau, \bar{\mu})$$

$$\bar{\mu} = (dt)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \quad (5.121)$$

conform figurii 5.10, poate fi considerată „sursa” de la care „plecând” se poate „mima” în spațiul scalelor dependența „coeficientului de absorbție” $\bar{\alpha}$ de „frecvența” câmpului acustic, $\bar{f} = \xi$, pentru diverse „clase de turbulentă”, $F_c \equiv \bar{\tau}$ și variate „clase de materiale”, $M_c \equiv \bar{\mu}$, adică:

$$\bar{\alpha} = \Delta N(\xi \equiv \bar{f}, \tau = F_c, \bar{\mu} = M_c) \quad (5.122)$$

Conform figurii 5.11 o asemenea perspectivă impune însă următoarele explicitări:

1. Spațiul scalelor poate fi identificat cu spațiul frecvențelor postulând prin (5.110) funcționalitatea relației:

$$\xi = \frac{x}{\alpha} \equiv \frac{xV_0}{\alpha V_0} = \frac{D^2 f}{D^2 f_0} = \bar{f} \quad (5.123)$$

unde:

D este o „lungime proprie” a sistemului complex acustic;

f_0 - o „frecvență proprie” a sistemului complex acustic;

f - o frecvență impusă de o „constrângere externă” (de exemplu sursa acustică) asupra sistemului complex acustic;

2. „Gradul de turbulentă” este introdus în dinamica sistemului complex acustic acceptând funcționalitatea „numărului critic de curgere”:

$$\tau = \frac{tV_0}{\alpha} \equiv \frac{\bar{d}}{d} \equiv F_c \quad (5.124)$$

unde:

$d = tV_0$ poate fi o „lungime critică” impusă de câmpul acustic;

$\alpha \equiv d$ poate fi o „dimensiune critică” impusă prin autostructurarea unităților structurale acustice ale sistemului complex acustic sub acțiunea câmpului acustic;

3. Gradul de fractalizare:

$$\bar{\mu} = (dt)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \equiv M_c \quad (5.125)$$

poate fi corelat cu „structura intrinsecă” a sistemului complex acustic.

În aceste condiții, așa cum rezultă din figurile 5.10 și 5.11, interacția câmp sonor-mediu de propagare impune o frecvență critică la care coeficientul de absorbție prezintă un minim pronunțat. Acest rezultat teoretic se confirmă experimental așa cum se va demonstra în capitolul 7.

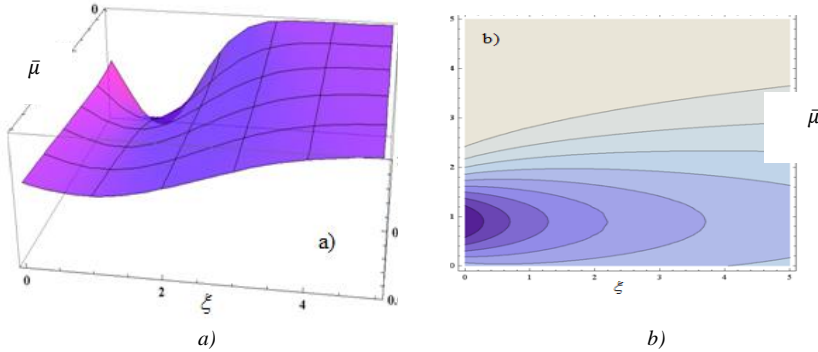


Fig. 5.10. Dependentele „fluctuațiilor” densității acustice de stări DN de variabilele ξ și $\bar{\mu}$: a) dependențe tridimensionale, b) curbe de contur. Se observă existența unui minim pe măsură ce ξ crește, minim mai puțin pronunțat pe măsură ce $\bar{\mu}$ crește [28].

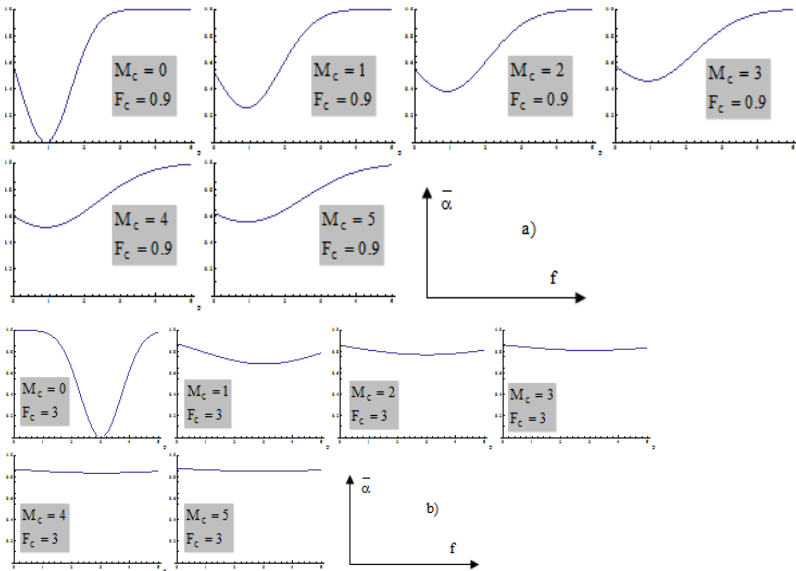


Fig. 5.11. Dependența coeficientului de absorbție $\bar{\alpha}$ în funcție de frecvența sursei sonore \bar{f} , pentru diverse materiale M_c și diverse „grade de curgere” F_c . Pe măsură ce M_c crește minimul lui \bar{f} devine mai puțin pronunțat și se deplasează spre \bar{f} mai mare pe măsură ce F_c crește [28].

5.11. Concluzii privind contribuțiile teoretice

Prezentul model nu face referire nici la structura sursei acustice, nici la structura mediului de propagare a perturbației acustice, nici la „interacțiile” perturbației acustice-mediu de propagare etc.

Singura ipoteză la care facem referire este că în condițiile în care ansamblul sursei sonore (prin perturbația acustică)-mediu de propagare este asimilat unui sistem complex (sistem complex acustic), „pseudoparticulele” acestuia (unitățile structurale acustice) se deplasează pe curbe continue și nediferențiabile (curbe fractale acustice). Atunci dinamici supuse restricțiilor „de tot felul” (structurale, funcționale etc.) într-un spațiu Euclidian sunt substituite cu dinamici libere de orice constrângere într-un spațiu fractal. Procedura matematică implică operarea cu funcții fractale dependente atât de coordonatele spațio-temporale, cât și de rezoluția de scală. Atunci următoarele consecințe rezultă:

1. Se construiește un operator fractal de mișcare (operator fractal acustic) cu statut de derivată covariantă (derivată covariantă acustică) (relația 5.24);
2. Acceptarea unui principiu de covarianță (principiul covarianței acustice) permite obținerea legilor de conservare, în caz particular legea de conservare a impulsului (relația 5.25) (legea de conservare a impulsului acustic specific fie generalizat, fie pentru scale de rezoluție) și legea de conservare a densității de stări (relația 5.29) (legea de conservare a densității acustice de stări);
3. Se obține ecuația de mișcare a unui mediu fractal (relația 5.41), se studiază comportamentul unui mediu fractal elastic sub forma legii fractale de tip Hooke generalizate (relația 5.43) și de aici a legii fractale de tip Hooke unidimensionale (relația 5.52);
4. Se obțin ecuațiile fractale de propagare ale unei perturbații printr-un mediu fractal elastic (specific) (relațiile 5.62 și 5.63), sub forma undelor fractale de tip primar (unde fractale de tip longitudinal) și undelor fractale de tip secundar (unde fractale de tip transversal). Acestea sunt cele mai generale tipuri de unde fractale, vitezele lor fiind definite cu ajutorul coeficienților fractali de structură ai mediului fractal de propagare (relațiile 5.64 și 5.65);
5. Pentru un caz particular de fractalizare prin procese stohastice de tip Markov sub forma mișcărilor de tip Levy, se reformulează legile de conservare ale impulsului și densității. Ca aplicație a acestui tip de fractalizare se analizează propagarea unei perturbații acustice într-un mediu fractal. De aici, printr-o „scufundare” în spațiu scalelor și reinterpretare a mărimilor ce descriu asemenea dinamic, se studiază dependența coeficientului de absorbție a unui mediu fractal de propagare de frecvența undei acustice (relațiile 5.122 și 5.123). Rezultă apariția unui minim în această dependență ce depinde de caracteristicile sistemului sursă-mediu, rezultat teoretic verificat prin experiment în capitolul 7.
6. Să notăm că spațiul închis nu oferă un mediu continuu pentru propagarea undelor acustice. În general acest spațiu puternic restricționat prin: materialele din care este realizat/amenajat, mobilat, persoanele fizice prezente în respectivul spațiu închis etc., este întotdeauna asimilat unui sistem complex acustic.

CAPITOLUL 6.

APARATE DE MĂSURARE ȘI PROGRAME SOFTWARE DE INTERPRETARE A DATELOR OBȚINUTE

În vederea determinării nivelului de zgomot și a gradului de transmisie al sunetului se utilizează următoarele echipamente și programe software:

- Aparat de măsură: sonometru Quest 210, analizor portabil de zgomot cu modul intern de înregistrare SINUS SOUNDBOOK, stație portabilă de monitorizare;
- Sursă de sunet OmniPowerType 4292-L;
- Software: software de hărți de zgomot și calcul al zgomotului ambiental – Lima tip 7812 A/B/C, software Predictor tip 7810, software Acoustic Determinator tip 7816, software Cadna de predicție a nivelului de zgomot ambiental, software de monitorizare a zgomotului 7843, software monitorizare zgomot și cartografiere IMMI Plus.

CAPITOLUL 7.

MATERIALELE UTILIZATE ȘI METODOLOGIA DE CERCETARE APLICATE ÎN CAMERA ANECOICĂ

7.1. Materiale utilizate

Determinarea coeficientului de absorbție acustică pentru materialele alese pentru studiu s-a realizat în camera anecoică de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași [264].

Materiale folosite ca suport sunt [205]:

- Plăci din OSB/3 (plăci rigide stratificate presate, din așchii de lemn orientate);
- Plăci din Polistiren expandat, EPS 50;
- Plăci din Gips-Carton normale, marca Rigips.

Materiale folosite ca strat aplicate pe suport sunt materiale reciclate sau tradiționale:

1. Materiale naturale:

- pânza de iută;

2. Materiale sintetice:

- granulele din cauciuc reciclat;
- plastic reciclat mărunțit;
- granulele din polipropilenă reciclată;

3 Materiale mixte:

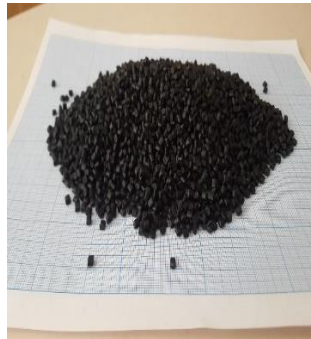
- granulele din făină de lemn, care au un liant sintetic necesar formării granulelor;
- țesătura de cordele, cordele care sunt realizate atât din materiale naturale reciclate, cât și din materiale sintetice reciclate.

În colaborare cu S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău, pentru materialul granular s-a căutat un liant ecologic. S-a folosit un liant ecologic, biodegradabil în timp, în a cărui compoziție se află rășini acrilice pe bază de apă, materiale de umplutură (carbonat de calciu de diverse granulații), aditivi, îngroșător celulozic, produs de S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău, *rețetă proprie*. Pentru pânza de iută și țesătura de cordele textile nu s-a folosit adeziv (prinderea a fost mecanică).

În figura 7.1 sunt prezentate imaginile cu produsele granulometrice în vrac.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fig. 7.1. Aspectul materialelor granulare în vrac și țesute: a - granule din făină de lemn, b - granule din polipropilenă reciclată, c - particule din plastic reciclat mărunțit, d - granule din cauciuc reciclat, e - pânză de iută, f - țesătură de cordele.

Cele 28 de probe testate în camera anecoică, cu dimensiunile lor și codurile aplicate sunt prezentate în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3.

Caracteristicile geometrice ale probelor testate în camera anecoică.

Nr. Crt.	Cod probă	Materialul probei	Diametrul probei, D (mm)	Grosimea medie a probei, d (mm)
1	O ₁	OSB simplu;	100	6,0
2	P ₁	Polistiren simplu;	100	38,0
3	R ₁	Rigips simplu;	100	12,4
4	O ₂	OSB vopsit;	100	6,2
5	P ₂	Polistiren cu plasă aplicată și tencuit (cu mortar de finisare);	100	42,8
6	R ₂	Rigips văruit, 2 straturi;	100	12,6
7	P ₂₋₂	Polistiren cu plasă aplicată, tencuit și văruit 2 straturi;	100	43,1
8	O ₃	OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule din făină de lemn;	100	11,5
9	P ₃	Polistiren finisat pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule din făină de lemn;	100	43,2
10	R ₃	Rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule din făină de lemn;	100	17,7

11	O ₄	OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu particule din plastic mărunțit reciclat;	100	12,1
12	P ₄	Polistiren finisat pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu particule din plastic mărunțit reciclat;	100	44,3
13	R ₄	Rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu particule din plastic mărunțit reciclat;	100	18,6
14	O ₅	OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de polipropilenă reciclată;	100	11,7
15	P ₅	Polistiren finisat pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de polipropilenă reciclată;	100	44,0
16	R ₅	Rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de polipropilenă reciclată;	100	18,1
17	O ₆	OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de cauciuc reciclat;	100	12,1
18	P ₆	Polistiren finisat pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de cauciuc reciclat;	100	44,3
19	R ₆	Rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic cu granule de cauciuc reciclat;	100	18,3
20	O ₇	OSB pe care s-a aplicat pânză de iută;	100	6,6
21	P ₇	Polistiren finisat pe care s-a aplicat pânză de iută;	100	38,7
22	R ₇	Rigips pe care s-a aplicat pânză de iută;	100	13,1
23	O ₈	OSB pe care s-a aplicat țesătură de cordele textile;	100	40,0
24	P ₈	Polistiren finisat pe care s-a aplicat țesătură de cordele textile;	100	14,3
25	R ₈	Rigips pe care s-a aplicat țesătură de cordele textile.	100	1,8
26	O ₉	OSB pe care s-a aplicat pânză de iută pe ambele fețe;	100	13,3
27	P ₉	Polistiren finisat pe care s-a aplicat pânză de iută pe ambele fețe;	100	39,4
28	R ₉	Rigips pe care s-a aplicat pânză de iută pe ambele fețe;	100	13,8

În figura 7.3 sunt prezentate imagini cu probele simple referitoare la materialele suport, în figura 7.4 sunt prezentate imagini cu probele cu materialele suport finite simplu, în figura 7.5 sunt prezentate imagini cu probele referitoare la amestecul din liant ecologic cu granule din făină de lemn, în figura 7.6 sunt prezentate imagini cu probele referitoare la amestecul din liant ecologic cu particule din plastic reciclat mărunțit, în figura 7.7 sunt prezentate imagini referitoare la amestecul din liant ecologic cu

granule din polipropilenă reciclată, în figura 7.8 sunt prezentate imagini cu amestecul din liant ecologic cu granule din cauciuc reciclat, iar în figurile 7.9 și 7.10 sunt prezentate imagini cu probele referitoare la pânza de iută și țesătura de cordele.



Fig. 7.3. Probele simple, de la stânga la dreapta: OSB (O_1), polistiren (P_1), rigips (R_1) [28].



Fig. 7.4. Probele finisate, de la stânga la dreapta: polistiren cu mortar aplicat (P_2), polistiren cu mortar și 2 straturi de var ($P_{2.2}$), OSB vopsit (O_2), rigips cu două straturi de var (R_2) [28].



Fig. 7.5. Probele de la stânga la dreapta: polistiren cu mortar aplicat peste care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din făină de lemn (P_3), OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din făină de lemn (O_3), rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din făină de lemn (R_3) [28].



Fig. 7.6. Probele de la stânga la dreapta: rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și particule din plastic reciclat mărunțit (R_4), OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și particule din plastic reciclat mărunțit (O_4), polistiren cu mortar aplicat peste care s-a aplicat amestec din liant ecologic și particule din plastic reciclat mărunțit (P_4) [28]



Fig. 7.7. Probele de la stânga la dreapta: polistiren cu mortar aplicat peste care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din polipropilenă reciclată (P_5), OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din polipropilenă reciclată (O_5), rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din polipropilenă reciclată (R_5) [28].



Fig. 7.8. Probele de la stânga la dreapta: polistiren cu mortar aplicat peste care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din cauciuc reciclat (P_6), OSB pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din cauciuc reciclat (O_6), rigips pe care s-a aplicat amestec din liant ecologic și granule din cauciuc reciclat (R_6) [28].



Fig. 7.9. Probele cu pânză de iută, de la stânga la dreapta: pânză de iută pe rigips (R_7), pânză de iută pe OSB (O_7), pânză de iută pe polistiren (P_7). La fel pentru probele cu pânză de iută aplicată pe ambele fețe: R_9 , O_9 , și P_9 [28].



Fig. 7.10. Probele cu țesătură de cordele, de la stânga la dreapta: cordele pe OSB (O_8), cordele pe polistiren (P_8), cordele pe rigips (R_8) [28].

7.2. Coeficientul de absorbție al materialelor studiate

Diferența între unda incidentă și unda reflectată reprezintă undele absorbite și transmise. Viteza de propagare, fiind constantă pentru toate undele sonore, nu este afectată. Coeficientul de absorbție poate fi definit și conform relației [28, 180, 256]:

$$\alpha = \frac{|L_p|^2 - |L_{pr}|^2}{|L_p|^2} \quad (7.1)$$

unde:

L_p – nivelul presiunii acustice (sonore) pentru unda incidentă (transmisă de sursă), (dB);

L_{pr} – nivelul presiunii acustice (sonore) pentru unda reflectată (dB).

7.3. Metodologia de cercetare

La determinarea coeficientului de absorbție a celor 28 probe prezentate anterior s-a respectat metodologia de determinare recomandată de literatura de specialitate [265, 266, 267], iar ca sursă de zgomot s-a utilizat un generator de semnal sinusoidal. S-a realizat următorul lanț de măsurare (fig. 7.11) [256]:

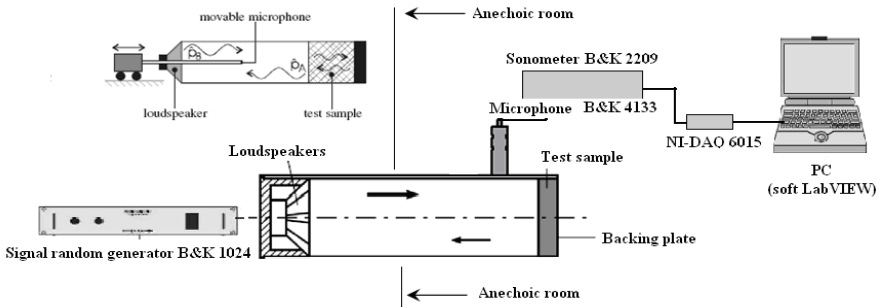


Fig. 7.11. Lanțul de măsurare [28, 256].

Pentru măsurători s-a folosit aparatură analogică Bruel&Kjaer și aparatură digitală National Instruments, astfel [256]:

- generator de semnal sinusoidal Bruel&Kjaer, tip 1024;
- microfon omnidirecțional Bruel&Kjaer, tip 4133 (sensibilitate $4-16 \text{ mV la } N/m^2$; $0,4-1,6 \text{ mV pe } \mu\text{bar}$; $36-150 \text{ dB(A)}$);

- sonometru Bruel&Kjaer, tip 2209 (amplificare: 2 Hz ori 10 Hz la 70 kHz; filtrare standard conform IEC R179, IEC R179A și ANSI, tip 1;
- placa externă de achiziție tip-NI DAQPad-6015 pe USB, 16 intrări analogice, 2 ieșiri analogice;
- laptop Acer cu soft LabVIEW de procesare a datelor experimentale.

7.3.1. Camera anecoică de la Facultatea de Mecanică - Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Camera anecoică (anechoic room) reprezintă o încăpere, izolată cu material fonoabsorbant împotriva zgomotelor externe și izolată antivibratoriu, în care sunetele sunt absorbite aproape integral (99%) la incidența pe suprafețele limitrofe [255].

7.4. Rezultate obținute

S-a realizat achiziția semnalului incident, reflectat și analiza în 1/3 octavă cu specificarea nivelului de presiune sonoră ponderată în A, dB(A) (decibeli ponderați) și în benzi de octavă.

Valorile obținute prin măsurători pentru coeficienții de absorbție, la materialele propuse pentru a amenaja o încăpere destinată unor activități publice, nu sunt mari, dar se referă la materiale tradiționale, ecologice, reciclate. Acesta a fost motivul principal pentru a lua în studiu aceste materiale, respectiv utilizarea unor surse accesibile de materiale care să respecte mai multe criterii privind utilizarea sustenabilă a resurselor naturale. Pentru materialele simple s-au obținut coeficienții medii de absorbție mici, respectiv $\alpha_{med}OI=0,08$; $\alpha_{med}P1=0,075$; $\alpha_{med}R1=0,106$. În aceste valori medii, cele mai mici valori s-au înregistrat la frecvența de 500 Hz, iar cele mai mari valori s-au obținut la frecvența de 2.000 Hz.

Acoperirea materialelor simple cu var, mortar sau vopsea alchidică a dus la realizarea unor coeficienți medii de absorbție mai mari ca în primul caz, respectiv $\alpha_{med}O2=0,105$; $\alpha_{med}P2=0,099$; $\alpha_{med}R2=0,125$. Și în acest caz alura curbelor păstrează modul de variație pe frecvențe.

La făina din lemn studiată sub formă de granule formând un amestec cu adezivul prezentat anterior, s-au înregistrat valori mai mari ca în variantele precedente și cu aceeași alură a curbelor de variație pe frecvențele la care s-au făcut măsurătorile în funcție de materialul suport, respectiv: $\alpha_{med}O3=0,106$; $\alpha_{med}P3=0,100$; $\alpha_{med}R3=0,130$.

În cazul plasticului mărunțic reciclat și aplicat cu ajutorul adezivului prezentat anterior pe cele trei materiale suport, s-au înregistrat coeficienți medii de absorbție mai mari, respectiv: $\alpha_{med}O4=0,110$; $\alpha_{med}P4=0,120$; $\alpha_{med}R4=0,140$.

La acest material (granule de polipropilenă) aplicat pe cele trei materiale suport, în camera anecoică, s-au măsurat următorii coeficienți medii de absorbție: $\alpha_{med}O5=0,116$; $\alpha_{med}P5=0,121$; $\alpha_{med}R5=0,147$.

La schimbarea materialului de adaus, respectiv amestec de granule din cauciuc reciclat deus pe cele trei materiale suport s-au înregistrat următorii coeficienți medii de absorbție: $\alpha_{med}O6=0,112$; $\alpha_{med}P6=0,114$; $\alpha_{med}R6=0,140$.

Gruparea a două materiale absorbante pentru corectarea parametrilor acustici duce la creșterea coeficienților medii de absorbție pentru orice grupare de materiale, respectiv aplicarea pânzei de iută pe o parte a dispozitivului (panoului) acustic realizează următorii coeficienți medii de absorbție: $\alpha_{med}O7=0,122$; $\alpha_{med}P7=0,118$; $\alpha_{med}R7=0,160$.

Cel mai tradițional material obținut din recuperarea țesăturilor de orice fel, respectiv țesătura de cordele (în zona Moldovei este numită și țolul de cordele), care este și tradițional și ecologic și care poate fi folosit pentru a echipa dispozitivele (panourile) acustice a realizat următorii coeficienți medii de absorbție în funcție de materialul suport, respectiv: $\alpha_{med}O8=0,194$; $\alpha_{med}P8=0,117$; $\alpha_{med}R8=0,233$.

Dacă dispozitivele (panourile) acustice sunt dublate și de alte materiale, respectiv folosirea pânzei de iută pe ambele fețe ale dispozitivului acustic, se înregistrează coeficienți medii de absorbție mult mai mari ca în cazul folosirii pânzei de iută pe o față a panoului, dar mai mici ca în cazul folosirii țesăturii de cordele textile, respectiv: $\alpha_{med}O9=0,182$; $\alpha_{med}P8=0,172$; $\alpha_{med}R8=0,205$.

În figurile 7.28 sunt prezentate coeficienții de absorbție, în funcție de frecvență, pentru toate variantele de materiale aplicate pe rigips, în figura 7.29 pentru toate materialele aplicate pe polistiren, iar în figura 7.30 pentru toate materialele aplicate pe OSB.

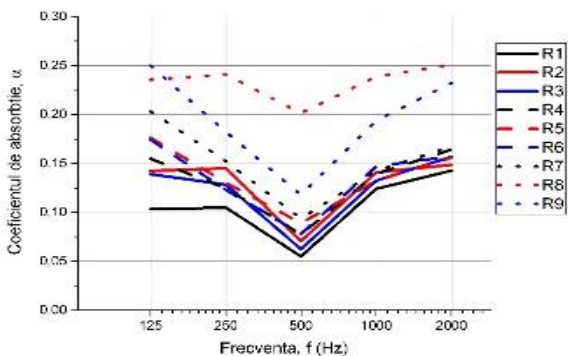


Fig. 7.28. Variația comparativă a coeficientului de absorbție pentru toate materialele acustice aplicate pe suport de rigips [28, 256].

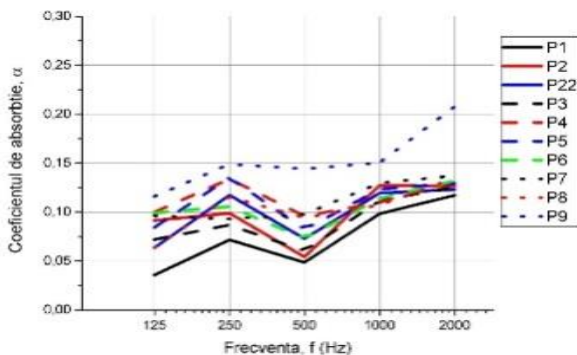


Fig. 7.29. Variația comparativă a coeficientului de absorbție pentru toate materialele acustice aplicate pe suport de polistiren [28, 256].

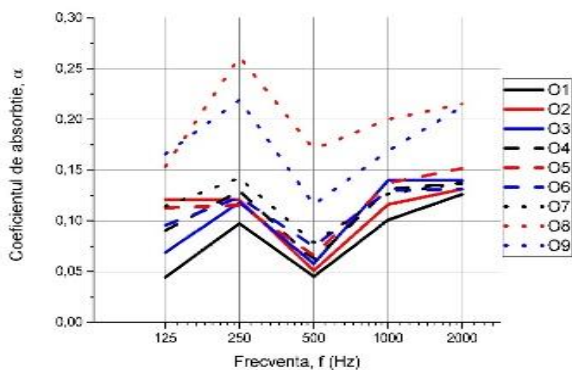


Fig. 7.30. Variația comparativă a coeficientului de absorbție pentru toate materialele acustice aplicate pe suport de OSB [28, 256].

În figura 7.31 sunt prezentate, descrescător, toate valorile coeficientului de absorbție pe variantele de materiale studiate.

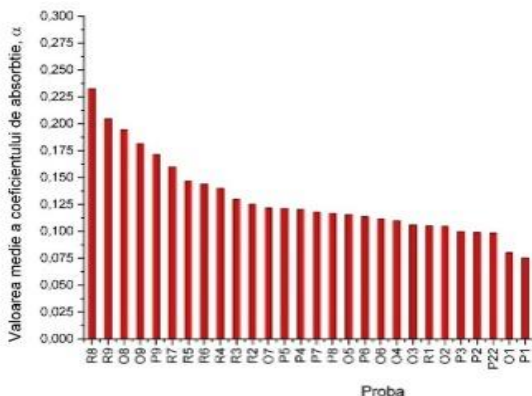


Fig. 7.31. Variația (scăderea) coeficientului de absorbtie în funcție de materialul acustic folosit [28, 256].

Se poate observa că variantele de materiale studiate realizează coeficienți medii de absorbtie a sunetului care variază într-o plajă mare de valori, respectiv de la 0,075 până la 0,233. Cele mai mari valori s-au înregistrat la materialele de bază (OSB, polistiren și rigips) acoperite cu pânză de iută sau cu țesătură de corde. Materialele reciclate mărunțite amestecate cu liantul ecologic și aplicate pe materialele suport, dau coeficienți medii de absorbtie diferiți în funcție de materialul suport, astfel:

- cei mai mici coeficienți medii de absorbtie pentru toate amestecurile s-au înregistrat la aplicarea lor pe polistiren, respectiv: valoarea de 0,1 pentru amestecul din granule din făină de lemn și liant ecologic; 0,114 pentru amestecul realizat cu granule din cauciuc reciclat; 0,12 pentru amestecul realizat cu plastic reciclat mărunțit; 0,121 pentru amestecul realizat cu granule din polipropilenă reciclată;
- valori intermediare pentru coeficientul mediu de absorbtie s-au înregistrat la amestecurile aplicate pe OSB, respectiv: 0,106 pentru amestecul cu granule din făină de lemn; 0,110 pentru amestecul cu plastic reciclat mărunțit; 0,116 pentru amestecul cu granule din polipropilenă reciclată; 0,147 pentru amestecul cu granule din cauciuc reciclat;
- cele mai mari valori ale coeficientului mediu de absorbtie s-au obținut pentru amestecurile aplicate pe rigips, respectiv: 0,130 pentru amestecul cu granule din făină de lemn; 0,140 pentru amestecul cu plastic reciclat mărunțit; 0,144 pentru amestecul cu granule din cauciuc reciclat; 0,147 pentru amestecul cu granule din polipropilenă reciclată.

7.5. Concluzii privind coeficientul de absorbtie determinat prin măsurare

1. Coeficientul de absorbtie acustică s-a determinat atât pentru materialele suport, cât și pentru materialele depuse pe materialele suport;
2. Materialele suport alese pentru studiu au fost: placă din lemn tip OSB, placă din polistiren expandat și placă din rigips;
3. Materialele pentru depunere s-au ales astfel încât să cuprindă o gamă cât mai largă de materiale reciclate sau tradiționale, respectiv: materiale naturale (pânză de iută), materiale sintetice (granulele din cauciuc reciclat, plastic reciclat mărunțit, granulele din polipropilenă reciclată) materiale mixte (granulele din făină de lemn, care au un liant sintetic necesar formării granulelor, țesătura de cordele-cordele care sunt realizate atât din materiale naturale reciclate, cât și din materiale sintetice reciclate);
4. S-a folosit un liant ecologic, biodegradabil în timp, în a cărui compoziție se află rășini acrilice pe bază de apă, materiale de umplură (carbonat de calciu de diverse granulații), aditivi, îngroșător celulozic, produs de S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău, *rețetă proprie*;
5. Determinarea coeficientului de absorbtie pentru materialele alese s-a realizat într-un tub de impedanță dintr-o cameră anecoică, utilizând standardul SR EN ISO 10534-1:1996, pentru cinci frecvențe ale sunetului;

6. Utilizarea doar a materialelor suport (placi din: OSB, polistiren, rigips) pentru amenajarea unei încăperi realizează coeficienți de absorbție acustici mai reduși ca valoare;
7. Valorile mai mari determinate pentru coeficientul de absorbție acustică arată că materialele cele mai indicate pentru absorbția sunetului sunt cele textile (pânza de iută și țesătura de cordele) depuse pe cele trei materiale suport;

CAPITOLUL 8. MATERIALELE UTILIZATE ȘI METODOLOGIA DE CERCETARE A SUNETULUI ÎNTR-O ÎNCĂPERE PUBLICĂ

Pentru a avea date cât mai exacte pentru caracterizarea acustică a unei încăperi, parametrii obiectivi trebuie determinați prin măsurare, respectiv timpul de reverberație ($T60$) și timpul de descreștere timpurie (EDT), iar ceilalți parametri subiectivi pot fi determinați prin calcul având la bază valorile măsurate ale timpului de reverberație [259, 269].

8.1. Echipamente și standarde utilizate

- Analizorul portabil 2270, generație Bruel&Kjaer.

8.1.1. Sursa de sunet OmniPowerType 4292-L

Utilizările și caracteristicile sursei de sunet omnidirecțională OmniPowerType 4292-L sunt prezentate la subcapitolul 6.1.4., capitolul 6.

8.1.2. Standardul SR EN ISO 3382-3:2012 – Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 3: Birouri deschise și Standardul SR EN ISO 3382-2:2008 – Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 2: Durata de reverberație a încăperilor obișnuite

8.2. Materiale utilizate

Materialele propuse pentru efectuarea experimentelor sunt:

- polistiren expandat sub formă de plăci cu 38 mm grosime;
- plăci OSB de 6 mm grosime;
- plăci de rigips de 12,4 mm grosime;
- pânză din iută.

În figura 8.7 este prezentat cadrul confecționat din cornier al dispozitivului acustic, pe care se vor monta materialele absorbante. Un număr de 21 de dispozitive acustice (cadre) au fost montate pe tavanul sălii, pe 2 rânduri decalate (fig. 8.13). Dispozitivele (panourile) acustice au posibilitatea de rotire (încălate la diferite unghiuri) în două plane: în plan vertical și în plan orizontal (datorită cuplei sferice cu deget).

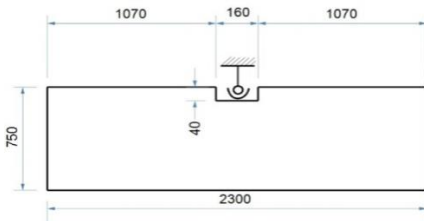


Fig. 8.7. Cadrul din cornier metalic al dispozitivului acustic [113].

8.3. Încăperea pentru studiul parametrilor acustici

Spațiul de experimentare propus este situat la etajul I al restaurantului Universității: „Vasile Alecsandri” din Bacău. Acesta are forma unui paralelipiped dreptunghic, cu dimensiunile (m) $L \times l \times h = 19,55 \times 4,65 \times 2,72$, adică un volum de $247,27 m^3$. În figura 8.8 este prezentată schema în spațiu a încăperii, iar în figura 8.9 sunt prezentate fotografiile ale acestei încăperi luată în studiu.

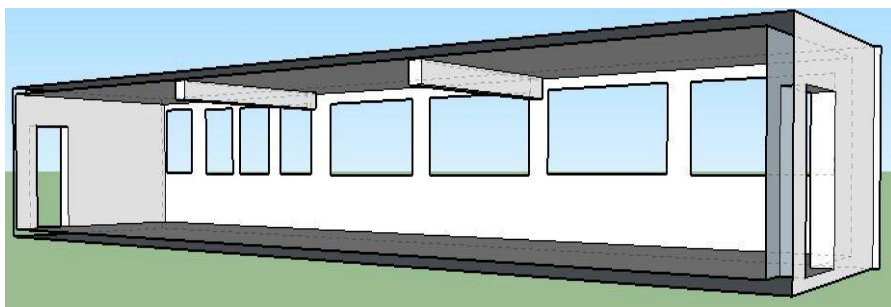


Fig. 8.8. Schema spațială a încăperii pentru studiul dispozitivelor și materialelor acustice [113].

8.4. Obiectivele de cercetare propuse

În principal, studiile și cercetările se referă la găsirea unor soluții pentru îmbunătățirea acusticii în spații publice închise având în vedere utilizarea sustenabilă a resurselor naturale [264]. În acest scop au fost identificate următoarele obiective principale, respectiv:

- Identificarea materialelor de amenajare interioară, ecologice, reciclabile sau tradiționale care pot realiza îmbunătățirea performanțelor acustice;
- Identificarea unor soluții de dispozitive acustice și materiale acustice care să poată diversifica posibilitățile de utilizare a încăperii;
- Stabilirea poziției optime a dispozitivelor (panourilor) acustice, care să pună în valoare la maximum proprietățile acustice ale materialelor propuse pentru amenajări;
- Analiza parametrilor acustici (măsurați și determinați), care dau confortul unei încăperi în funcție de destinația acesteia;
- Identificarea geometriei optime a tavanului încăperii în funcție de perioada (timpul) zilei și de percepția receptorilor (ascultătorilor).



Fig. 8.9. Imagini cu încăperea mobilată, propusă pentru montarea și studiul dispozitivelor și materialelor acustice.

S-a luat în studiu doar tavanul încăperii, deoarece, așa cum s-a arătat, pe tavan se pot realiza cele mai semnificative amenajări cu influențe relevante asupra confortului acustic al unei încăperi. La o încăpere mică (cameră) raportul optim între cele trei dimensiuni este recomandat ca fiind $2,6/1,6/1$ [270]. Pentru studiu s-a ales o încăpere cât mai atipică (raportul între dimensiuni $L/l/h$ destul de mare $7,2/1,7/1$, respectiv $19,55m/4,65m/2,72m$), cu un tavan cât mai plan pentru a putea fi amenajat cu dispozitivele și materialele acustice propuse pentru studiu. Raportul lungime / lățime este mare, respectiv $4,20$, iar raportul suprafața pardoselii / înălțime este foarte mare $33,42$.

8.5. Metoda de măsurare

S-a folosit metoda zgomotului întrerupt (SR EN ISO 3382-2:2008), *o metodă de obținere a curbelor de descreștere prin înregistrarea directă a scăderii nivelului de presiune acustică după excitarea unei încăperi cu zgomot de bandă largă sau de bandă îngustă de frecvență. Curba de descreștere e o reprezentare grafică a scăderii nivelului de presiune acustică într-o încăpere în funcție de timp, după oprirea sursei acustice* [204].

8.5.1. Condițiile de măsurare

În multe încăperi, numărul de persoane prezente poate influența semnificativ durata de reverberație. S-a măsurat astfel durata de reverberație cu încăperea fără persoane dar cu mobilierul obișnuit. Conform SR EN ISO 3382-2:2008 *în camere cu volume mari, atenuarea prin aer poate contribui semnificativ la absorbția acustică la frecvențe înalte. În principiu, pentru măsurări prin metoda exactă trebuie măsurate temperatura și umiditatea relativă a aerului din încăpere. Absorbția prin aer este neglijabilă dacă durata de reverberație este mai mică de $1,5$ s la 2.000 Hz și mai mică de $0,8$ s la 4.000 Hz, ca urmare nu este necesară măsurarea temperaturii și umidității relative a aerului în acest caz* [204].

8.5.2. Numărul pozițiilor de măsurare

Pentru tipul de sală și dotarea tehnică existentă la Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău s-a ales metoda tehnică (conform SR EN ISO 3382-2:2008) [204].

8.5.3. Excitarea încăperii

Conform SR EN ISO 3382-2:2008 *trebuie să se utilizeze o sursă cu difuzor, iar semnalul trimis la difuzor trebuie să provină de la sursa de zgomot electric aleatoriu sau pseudo-aleatoriu de bandă largă. Sursa trebuie să fie capabilă să producă un nivel de presiune acustică suficient pentru a garanta o descreștere care începe de la cel puțin 35 dB peste zgomotul de fond în banda corespunzătoare de frecvență. Dacă trebuie măsurat $T30$, este necesar să se creeze un nivel cu cel puțin 45 dB peste nivelul zgomotului de fond* [204].

8.5.4. Stabilirea volumului încăperii

Suprafața pardoselii încăperii va fi: $S = L \times l = 19,55 \text{ m} \times 4,65 \text{ m} = 90,9 \text{ m}^2$, iar volumul încăperii va fi: $V = S \times h = 90,9 \text{ m}^2 \times 2,72 \text{ m} = 247,27 \text{ m}^3$. Se va respecta standardul SR EN ISO 3382-2:2008, care se aplică și sălilor cu un volum apropiat de 300 m^3 (volum mediu ca mărime).

8.5.5. Stabilirea poziției microfonului și a sursei

În figurile 8.10 și 8.11 sunt prezentate punctele de amplasare ale sursei și receptorilor (microfoanelor), respectând specificațiile din standard și folosind metoda tehnică care presupune două poziții ale sursei și trei ale microfonului. Sursele S1 și S2 au fost amplasate la înălțimea de $1,8 \text{ m}$, iar înălțimea de amplasare a microfoanelor a fost aleasă la $1,5 \text{ m}$. Poziția sursei S1 reprezintă cazul unui vorbitor aflat la capătul unei săli de clasă, de conferințe etc., iar poziția sursei S2 reprezintă cazul unui vorbitor aflat la mijlocul sălii de clasă, salii de conferință etc.

În figura 8.12 este prezentat tavanul încăperii cu dimensiunile la scară, iar în figura 8.13 este prezentată schema tavanului încăperii având dispozitivele (panourile) acustice montate și cu distanțele între aceste panouri.

8.5.6. Poziționarea dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii

În tabelul 8.2 sunt exemplificate modalitățile de poziționare ale dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii cu notația variantelor experimentale. Variantele de lucru au fost notate astfel:

- V1 pentru încăperea cu tavanul fără panouri;
- variantele V2, V3, și V4 reprezintă variația poziției acestor dispozitive (panouri) acustice în planul tavanului (plan orizontal), respectiv unghiurile de așezare față de axa transversală a tavanului: 0° , 30° , 45° ;
- variantele V5 și V6 reprezintă variația poziției acestor panouri în planul tavanului (orizontal), pe două rânduri, în oglindă, poziționate la unghi de 30° față de axa transversală (sau 60° față de axa longitudinală), respectiv la unghi de 45° față de axa transversală;
- variantele V7, V8 și V9 reprezintă variația poziției dispozitivelor în plan vertical, la unghiuri față de axa verticală de 30° , 45° și 60° .

Alte notații pentru variantele de lucru sunt:

1. V2.O, V3.O, V4.O, V5.O, V6.O, V7.O, V8.O și V9.O pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de OSB;
2. V2.O+I, V3.O+I, V4.O+I, V5.O+I, V6.O+I, V7.O+I, V8.O+I și V9.O+I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de OSB și pânză de iută pe o singură parte a dispozitivului (panoului);
3. V2.O+2I, V3.O+2I, V4.O+2I, V5.O+2I, V6.O+2I, V7.O+2I, V8.O+2I și V9.O+2I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de OSB și pânză de iută pe ambele părți ale dispozitivului (panoului);
4. V2.P, V3.P, V4.P, V5.P, V6.P, V7.P, V8.P și V9.P pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de polistiren;
5. V2.P+I, V3.P+I, V4.P+I, V5.P+I, V6.P+I, V7.P+I, V8.P+I și V9.P+I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de polistiren și pânză de iută pe o singură parte a panoului;
6. V2.P+2I, V3.P+2I, V4.P+2I, V5.P+2I, V6.P+2I, V7.P+2I, V8.P+2I și V9.P+2I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de polistiren și pânză de iută pe ambele părți ale dispozitivului (panoului);
7. V2.R, V3.R, V4.R, V5.R, V6.R, V7.R, V8.R și V9.R pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de rigips;
8. V2.R+I, V3.R+I, V4.R+I, V5.R+I, V6.R+I, V7.R+I, V8.R+I și V9.R+I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de rigips și pânză de iută pe o singură parte a panoului;
9. V2.R+2I, V3.R+2I, V4.R+2I, V5.R+2I, V6.R+2I, V7.R+2I, V8.R+2I și V9.R+2I pentru toate pozițiile de așezare a dispozitivelor pe care s-au montat plăci de rigips și pânză de iută pe ambele părți ale dispozitivului (panoului) acustic.

În figurile 8.17 și 8.18 sunt prezentate fotografiile cu diferite moduri de așezare a panourilor în sală având materialele acustice montate pe ele.

8.6. Rezultate obținute

La încăperea aleasă pentru amenajarea cu diferite dispozitive și materiale acustice s-au determinat parametrii obiectivi prin măsurare ($T20$, $T30$, EDT) și s-au determinat prin calcule acei parametri care caracterizează o încăpere destinată vorbirii, respectiv: parametrii subiectivi ($C50$, $D50$, Ts , $RASTI$, $\%AlCons$). Acești parametri sunt grupați în trei grupe: parametrii privind reverberația ($T60$, EDT), parametri energetici ($C50$, $D50$, Ts), parametri privind inteligibilitatea vorbirii ($\%AlCons$, $RASTI$). Parametrii spațiali nu s-au măsurat sau determinat având în vedere faptul că nu s-au realizat măsurători cu încăperea populată sau cu echipament capabil să preia semnalul sonor din direcții laterale.

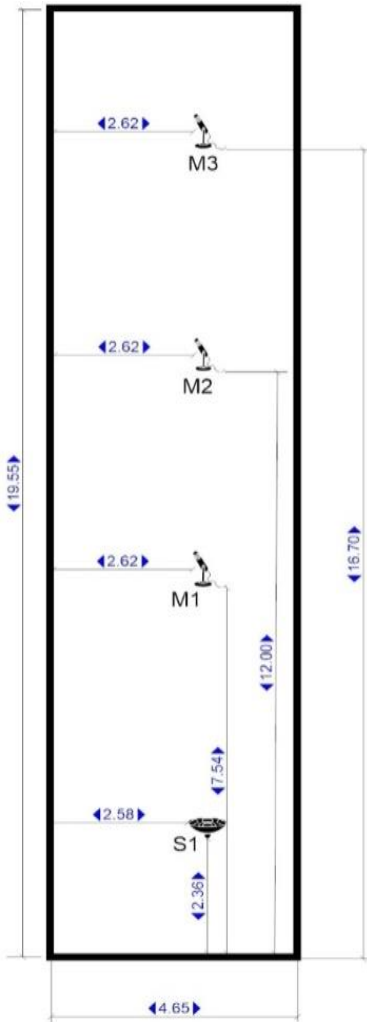


Fig. 8.10. Combinații sursă/microfon în încăperea pentru realizarea măsurătorilor, cu sursa amplasată în poziția S1.

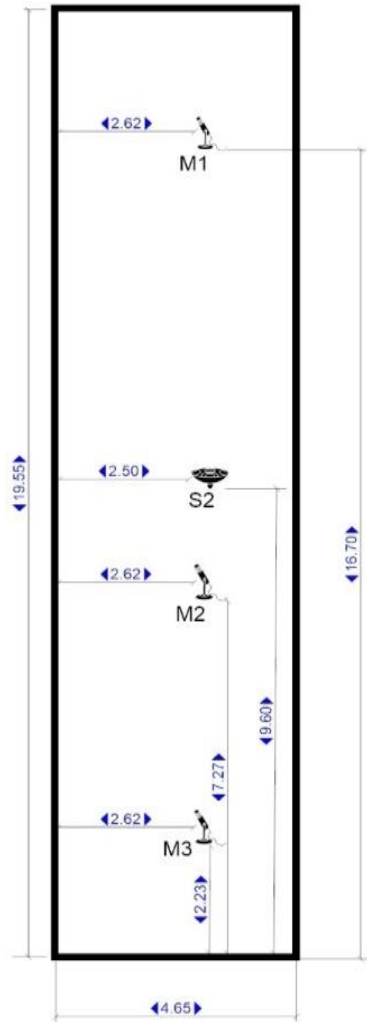


Fig. 8.11. Combinații sursă/microfon în încăperea pentru realizarea măsurătorilor cu sursa amplasată în poziția S2.

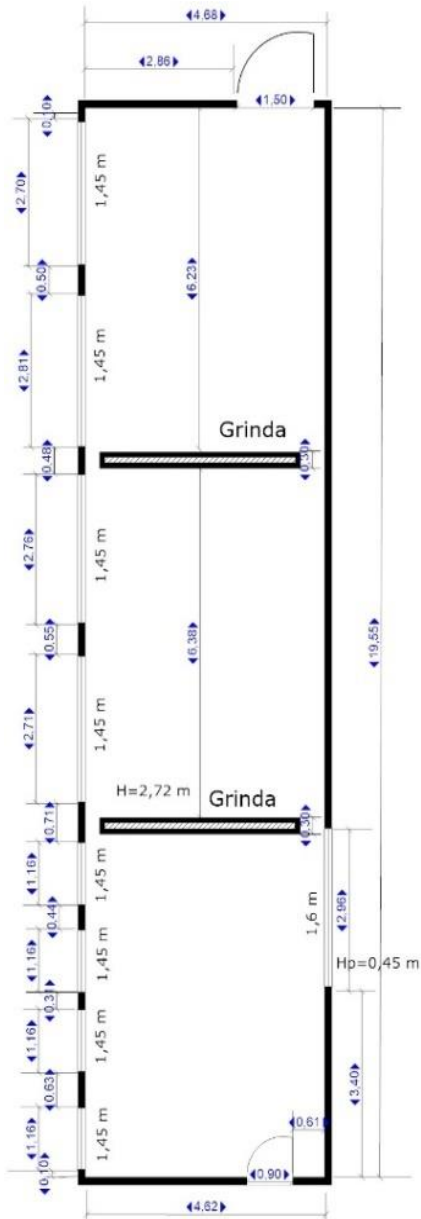


Fig. 8.12. Tavanul încăperii.

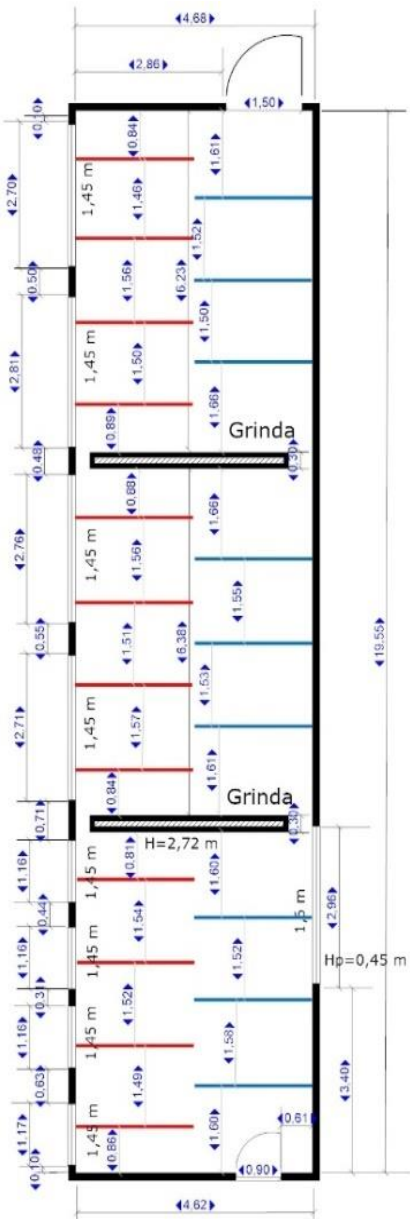


Fig. 8.13. Dispunerea dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii.

Variantele de lucru pentru pozițiile panourilor pe tavanul încăperii.

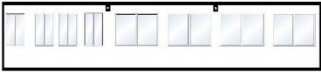
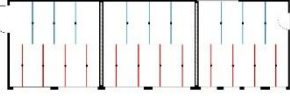
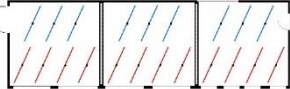
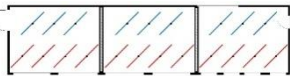
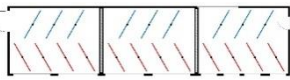
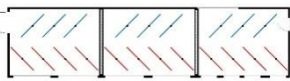
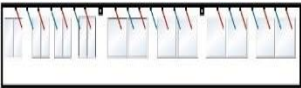
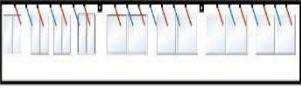
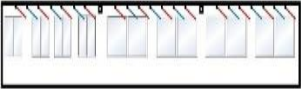
Nr. crt.	Varianta/ grupul de variante	Poziția dispozitivelor (panourilor) acustice	Descriere
1.	V1		încăperea fără dispozitive pe tavan
<i>Pozițiile dispozitivelor (panourilor) acustice în plan orizontal</i>			
2.	V2 ↑ axa transversală →	 axa longitudinală	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 0° față de axa transversală a tavanului [239]
3.	V3		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului
4.	V4		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa transversală a tavanului
5.	V5		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului, cele două rânduri sunt așezate în oglindă
6.	V6		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa transversală a tavanului, cele două rânduri sunt așezate în oglindă
<i>Pozițiile dispozitivelor (panourilor) acustice în plan vertical</i>			
	V7 ↑ axa verticală →	 axa longitudinală	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa verticală a încăperii
8.	V8		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa verticală a încăperii
9.	V9		2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 60° față de axa verticală a încăperii



Fig. 8.17. Imagine cu panourile din rigips așezate în varianta V6.

8.6.1. Determinarea prin măsurare a timpilor de reverberație

Deoarece s-a considerat că descreșterea (degradarea) este liniară pentru energia acustică, timpul de reverberație $T60$ a fost considerat media aritmetică între $T30$ și $T20$ pentru sursele S1 și S2 cu microfoanele (receptorii) M1, M2, M3 [29, 32, 73, 263]. Valoarea medie a timpului de reverberație $T60$ a fost considerată media valorilor obținute la cele șase frecvențe. Valorile timpului de reverberație s-au încadrat în intervalul $(1,0 \div 1,7)$ s, pentru încăperea având tavanul amenajat în toate variantele studiate, dar nepopulată.

Amenajarea tavanului încăperii cu dispozitive din OSB așezate vertical pe tavan (variantele V2) realizează o reducere a timpului de reverberație, în medie de peste 17% pentru amplasarea sursei S1 și în medie de 20% pentru amplasarea sursei S2. Dacă aceleași dispozitive din OSB sunt așezate pe tavan cu unghiuri față de planul transversal al încăperii de 30°, 45° și 60° (variantele V7, V8, respectiv V9), valoarea timpului de reverberație scade față de varianta V2, la ambele moduri de amplasare a sursei cu cca. 5%, iar față de varianta V1 scăderea este de 20% la amplasarea sursei S1, respectiv 25% la amplasarea sursei S2. Unghiul de înclinare al dispozitivului din OSB în plan vertical reduce timpul de reverberație.



Fig. 8.18. Imagine cu panourile din rigips așezate în varianta V5.

Pentru pozițiile dispozitivului (panoului) acustic în plan orizontal la 30° și 45° (variantele V3 și V4), timpul de reverberație scade mai mult ca la varianta V2, în ambele situații de amplasare a surselor, respectiv cu 2% la sursa S1 și cu 4% la sursa S2. Așezarea în oglindă a dispozitivelor din OSB pe tavanul încăperii la unghiuri de 30° și 45° față de axa longitudinală a tavanului (variantele V5 și V6) realizează o reducere a timpului de reverberație față de varianta V1 cu 23% (la S1) și cu 24% (la S2). La toate variantele prin amplasarea sursei S2 la mijlocul încăperii s-au obținut timpi de reverberație mai mici sau cel mult egali ca în cazul amplasării sursei S1 la un capăt al încăperii.

În variantele de amenajare a tavanului încăperii cu dispozitive din OSB cu pânză de iută pe o parte, față de tavanul neamenajat (V1), reducerea timpului de reverberație este mult mai mare față de folosirea dispozitivelor din OSB simple, respectiv între 27% (varianta V2, sursa S1) și 32% (varianta V9 sursa S1 și variantele V3, V5, V6, V7, și V9 sursa S2). Și în cazul dispozitivelor din OSB îmbrăcate cu pânză de iută pe o față, la toate variantele la care sursa S2 s-a amplasat la mijlocul încăperii s-au obținut timpi de reverberație mai mici sau cel mult egali (în funcție de varianta de așezare a dispozitivelor pe tavanul încăperii) ca în cazul amplasării sursei S1 la un capăt al încăperii.

Îmbrăcarea dispozitivelor din OSB cu pânză de iută pe ambele fețe a dus la reducerea timpului de reverberație și mai mult față de dispozitivele din OSB cu pânză de iută pe o față. Astfel, față de încăperea neamenajată cu dispozitive s-au înregistrat timpi de reverberație mai mici cu 31% la varianta V3, sursa

S1, până la 35% la variantele V7 și V9 sursa S1. În cazul sursei S2, timpii de reverberație au fost ai mici ca în cazul sursei S1, respectiv reducerile s-au încadrat în intervalul 34% (V8) până la 37% (variantele V3, V4, V6 și V9). Valorile din grafice arată variația timpului de reverberație înregistrat de fiecare microfon (receptor) aflat la o anumită distanță față de sursa S1 sau S2.

Montarea pe tavanul încăperii a dispozitivelor (panourilor) acustice din polistiren realizează reducerea timpului de reverberație în mod asemănător cu dispozitivele din OSB, dar reducerile sunt în alte intervale de valori. Față de valorile timpului de reverberație măsurate în încăperea cu tavanul neamenajat, în cazul amplasării sursei S1, cele mai mari reduceri de 24% s-au realizat la variantele cu tavanul amenajat cu dispozitive din polistiren orientate ca în variantele V3 și V8. În cazul amplasării sursei S2 la mijlocul încăperii reducerile sunt mai mari, respectiv de până la 30% la varianta V6.

Dispozitivele (panourile) acustice din polistiren acoperite pe o față cu pânză de iută reduc mai accentuat timpii de reverberație, față de cei mășurați la încăperea cu tavanul neamenajat (V1). Pentru amplasarea sursei S1, cea mai mare reducere s-a înregistrat la varianta de tavan V4, respectiv de 36%, iar cea mai mică reducere a T60 s-a înregistrat la varianta V7 (29%). Pentru amplasarea sursei S2, cele mai mari reduceri pentru T60 s-au înregistrat la variantele V3, V4 și V6, respectiv de 37%.

Dispozitivele din polistiren acoperite cu pânză de iută pe două fețe reduc cel mai mult timpii de reverberație, față de cei mășurați la încăperea fără dispozitive pe tavan (V1). Pentru amplasarea sursei S1, cea mai mare reducere s-a înregistrat la varianta de tavan V4, respectiv de 41%, iar cea mai mică reducere a T60 s-a înregistrat la varianta V9 (36%). Pentru amplasarea sursei S2, cea mai mare reducere pentru T60 s-a înregistrat la varianta V6, respectiv de 77%.

Cele mai mici reduceri ale timpului de reverberație le-au realizat dispozitivele din rigips în comparație cu cei mășurați la varianta cu tavanul neamenajat (V1). În cazul amplasării sursei de sunet în poziția S1, cea mai mare reducere de 7% s-a înregistrat la varianta V4. Pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere a T60 s-a obținut la varianta V3, respectiv 6%. Este singurul material (rigipsul), din cele studiate, la care s-au obținut timpi de reverberație apropiați de valorile înregistrate la încăperea neamenajată, adică reducerile sunt foarte mici.

Și în cazul folosirii pânzei de iută pe o parte a dispozitivului din rigips, reducerea timpului de reverberație a fost mică. La variantele de tavan unde sursa de sunet a avut poziția S1, cea mai mare reducere de 14% s-a înregistrat la varianta V4 de așezare a dispozitivelor. Pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere a T60 s-a obținut tot la varianta V4, respectiv 16%.

Folosirea pânzei de iută pe ambele fețe ale dispozitivelor din rigips ameliorează puțin timpii de reverberație dar aceștia se situează tot la valori ridicate (apropiate de varianta V1, încăperea cu tavanul neamenajat). La variantele de tavan unde sursa de sunet a avut poziția S1, cea mai mare reducere de 19% s-a înregistrat la varianta V4 de așezare a dispozitivelor. Pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere a T60 s-a obținut tot la varianta V5, respectiv 20%.

Cele mai mici valori ale timpului de reverberație mediu, calculat după măsurătorile realizate la 500 Hz și 1.000 Hz, se încadrează în intervalul 1,27 s, obținut la varianta de tavan echipat cu dispozitive din polistiren acoperit pe ambele fețe cu pânză de iută și așezate perpendicular pe tavan (V2.P+2I) și 1,83 s, la varianta de tavan echipat cu dispozitive din rigips așezate tot perpendicular pe tavan (V2.R).

8.6.2. Determinarea prin calcul a timpilor de reverberație

Folosind relația (2.3) a lui Sabine se pot determina analitic timpii de reverberație pentru toate materialele folosite atât în încăperea unde s-au măsurat timpii de reverberație, cât și pentru materialele studiate în camera anecoică. În primul caz vom putea compara valorile măsurate cu valorile calculate, iar în al doilea caz vom putea extinde calculul timpilor de reverberație pentru încăperea amenajată cu materiale ecologice, tradiționale și reciclate, toate cu proprietăți absorbante.

După același model de calcul s-au determinat timpul de reverberație în cazul tuturor variantelor de materiale acustice și dispozitive acustice montate pe tavanul încăperii. Nu s-au luat în considerare pozițiile dispozitivelor (panourilor) pe plafonul încăperii (influența poziției panoului nu este atât de semnificativă). Absorbția totală a încăperii s-a calculat pentru dispozitivele cu diferite materiale. Suprafața absorbantă pentru fiecare variantă a fost de 459,25 m², formată din suprafața încăperii 386,8 m², la care se adaugă câte două suprafețe de 36,225 m² fiecare, cu materialele acustice studiate, respectiv la absorbția totală a încăperii (21,601 m²) se adaugă absorbția dispozitivelor acustice.

În figura 8.58 sunt prezentate valorile timpului de reverberație măsurate, comparativ cu valorile timpului de reverberație calculate ($T60c$) și timpul de reverberație admis ($T60a$) pentru respectiva încăpere (considerată populată) ($T60ag = 0,7 \div 0,9 s$) [225, 259], care are tavanul neamenajat (variantele V1), sau tavanul amenajat cu dispozitive (panouri) acustice echipate cu diferite materiale: OSB, polistiren, rigips (variantele V.O, V.P și V.R), aceleași materiale dar cu o față din pânză de iută (variantele V.O+I, V.P+I, V.R+I) sau aceleași materiale cu pânză de iută pe ambele fețe ale panoului (variantele V.O+2I, V.P+2I, V.R+2I). Se observă că există diferențe mici între valorile obținute prin cele două metode (măsurare și calcul) pentru timpul de reverberație. În figura 8.59 este prezentată variația absorbției totale a încăperii în funcție de varianta de amenajare a tavanului.

Tabelul 8.15.

Valorile timpului de reverberație măsurate, calculate și admisibile.

Nr. crt.	Varianta	$T60$ măsurat (s), înc. nepop.	$T60c$ calculat (s), înc. nepop.	$T60ag$ admisibil grafic (s), încăpere populată	$T60ac$ adm. calculat (s), încăpere populată
1	V1	1,620	1,830	0,9	0,63
2	V.O	1,330	1,444	0,9	0,63
3	V.O+I	1,242	1,368	0,9	0,63
4	V.O+2I	1,203	1,114	0,9	0,63
5	V.P	1,302	1,463	0,9	0,63
6	V.P+I	1,203	1,384	0,9	0,63
7	V.P+2I	1,150	1,139	0,9	0,63
8	V.R	1,552	1,355	0,9	0,63
9	V.R+I	1,436	1,283	0,9	0,63
10	V.R+2I	1,378	1,061	0,9	0,63

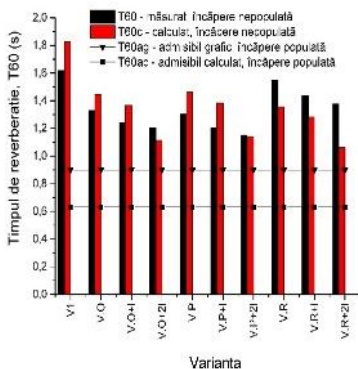


Fig. 8.58. Valorile timpului de reverberație măsurat, calculat și admis pentru variantele de amenajare a tavanului încăperii cu diferite materiale.

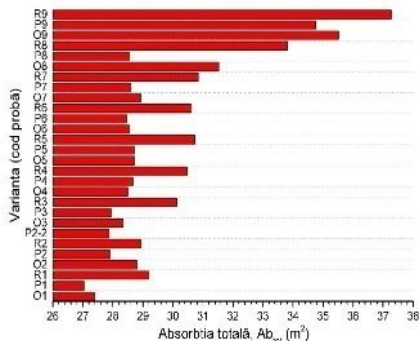


Fig. 8.59. Variația absorbției totale pentru fiecare variantă de dotare a tavanului încăperii cu dispozitive și materiale acustice (variantele/codul probelor sunt explicate la capitolul 7).

8.6.3. Determinarea prin măsurare a timpul de descreștere (amortizare) timpurie (EDT – *Early Decay Time*)

Și acest parametru caracterizează reverberația. Un EDT de valoare ridicată sugerează o valoare mai mare a reverberației și o claritate mai scăzută și invers. Datorită diferențelor între reverberația timpurie și târzie, pot apărea diferențe între EDT și $T30$. În continuare, în figurile 8.60 și 8.67 sunt prezentate valorile

acestui parametru acustic obținute din măsurători pentru variantele cu valorile cele mai mici pentru $T60$, dar și valorile medii calculate pentru valorile măsurate la frecvențele de 500 Hz și 1.000 Hz . În Anexa 2.1 a tezei sunt prezentate valorile EDT măsurate pentru toate variantele de lucru (73 de grupe de măsurători). EDT mediu se determină cu relația (2.8), prezentată în capitolul 2 [32, 97]:

Valorile EDT pe cele șase frecvențe de măsurare și la variantele la care s-au măsurat cei mai mici timpi de reverberație, s-au încadrat în intervalul $(0,7\pm 2,5)$ secunde. Față de încăperea cu tavanul neamenajat (varianta V1), unde s-a înregistrat cea mai mare valoarea a parametrului EDT_{med} de $1,97\text{ s}$, (fig. 8.60), cea mai mică valoare a parametrului EDT_{med} (determinat prin calculul mediei valorilor la frecvențele de 500 Hz și 1.000 Hz) s-a determinat la varianta V2.P+2I (dispozitive din polistiren acoperite pe două fețe cu pânză de iută, așezate vertical pe tavanul încăperii), rezultând valoarea de $1,4\text{ s}$ (fig. 8. Cealalte valori medii pentru parametrul acustic EDT se încadrează în acest interval.

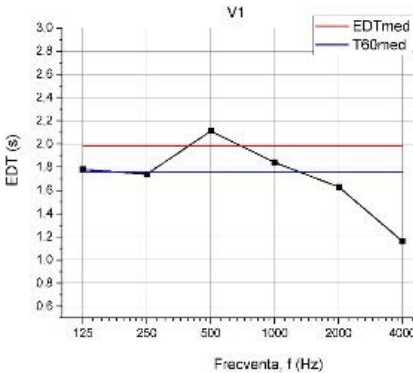


Fig. 8.60. Variația EDT pe frecvențe pentru încăperea cu tavanul neamenajat, în comparație cu EDT_{med} și $T60_{med}$.

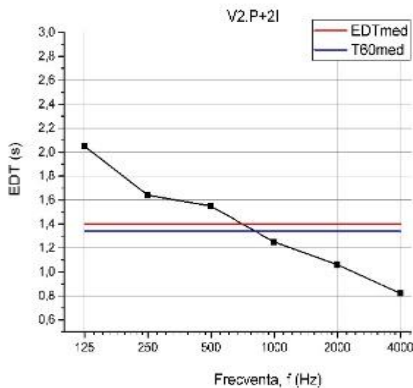


Fig. 8.67. Variația EDT pentru încăperea cu dispozitive din polistiren, având pânză de iută pe ambele fețe, așezate vertical pe tavanul încăperii.

8.6.4. Determinarea prin calcul a luminozității sunetului (TR – TrebleRatio)

Luminozitatea sunetului reflectă bogăția armonică la frecvențe ridicate a sunetului. Cea mai mare valoare a luminozității s-a determinat la varianta de încăperea cu tavanul neamenajat (V1), respectiv $0,76$, iar valoarea cea mai mică a luminozității s-a determinat la varianta de tavan echipat cu dispozitive (panouri) din polistiren îmbrăcat cu pânză de iută pe ambele fețe, amplasat vertical pe tavan (varianta V2.P+2I), respectiv valoarea de $0,66$ (fig. 8.71).

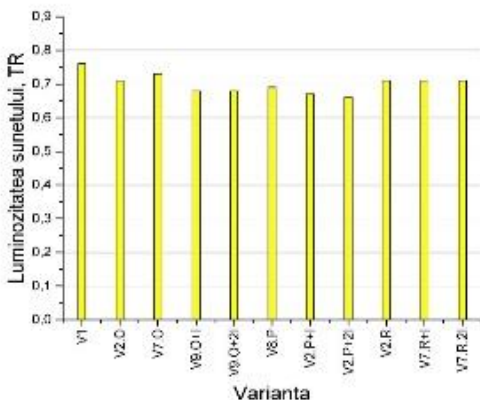


Fig. 8.71. Variația luminozității sunetului pe variantele de amenajare a tavanului încăperii, la care s-au înregistrat cei mai mici T60.

8.6.5. Determinarea prin calcul a clarității vorbirii (C50)

Pentru un factor de directivitate corespunzător sursei de sunet dintr-o încăpere $Q = 3$ [260], se pot determina valori ale clarității pentru vorbire în funcție de distanța dintre sursă și receptor.

În figura 8.72 sunt prezentate variațiile grafice ale acestor parametri acustici ($C50$, $T60$) în funcție de varianta de dispozitive (panouri) și materiale acustice studiate în încăpere. Pentru toate variantele de amenajare a tavanului valorile clarității la vorbire se încadrează în intervalul $(-0,46 \div 1,70)$ dB, ceea ce caracterizează toate variantele de tavan ca fiind cu o acustică acceptabilă.

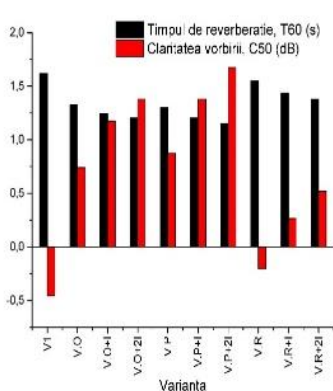


Fig. 8.72. Variația clarității la vorbire, $C50$, în funcție de valorile timpului de reverberație, $T60$.

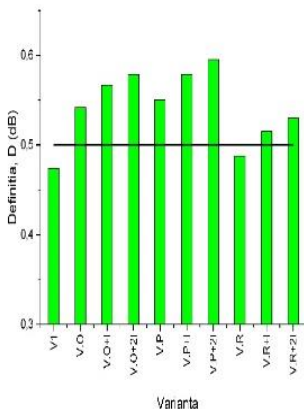


Fig. 8.73. Valorile definiției sunetului, $D50$, calculate în funcție de claritatea la vorbire, $C50$ ($D50_{adm} > 5$ dB).

8.6.6. Determinarea prin calcul a definiției ($D50$)

Există o legătură între definiție și claritate conform relației (2.19) din capitolul 2. În figura 8.73 sunt prezentate datele definiției pentru variantele studiate. Definiția are valori bune pentru tavanul amenajat cu dispozitive din OSB și polistiren și valori foarte bune la aceleași variante la care se adaugă o față din pânză de iută sau două fețe din pânză de iută (valoarea minimă admisibilă fiind de 0,5 dB). Încăperea cu

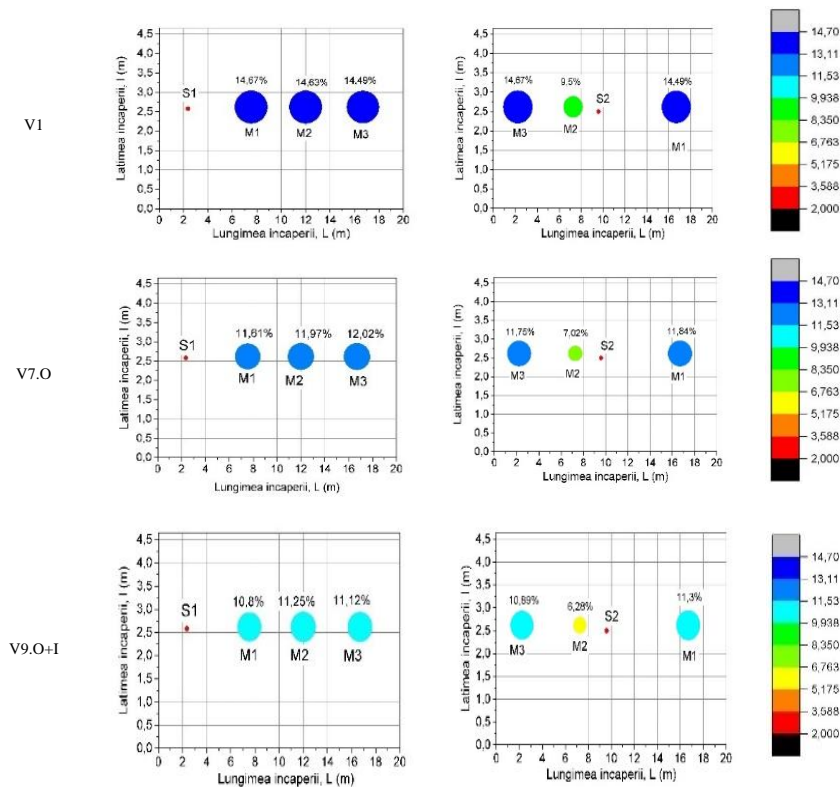
tavanul neamenajat sau amenajat cu dispozitive din rigips nu realizează valori admisibile pentru definiția sunetului.

8.6.7. Determinarea prin calcul a timpului central (T_s)

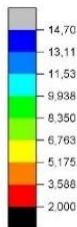
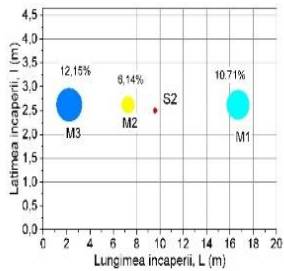
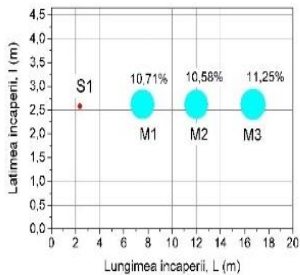
Pentru toate variantele analizate valorile timpului central variază între valorile 79 ms și 118 ms , valori care încadrează în intervalul admisibil ($72\div 144\text{ ms}$).

8.6.8. Determinarea prin calcul a parametrului privind procentul de consoane pierdute (nepercepute), %AlCons

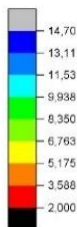
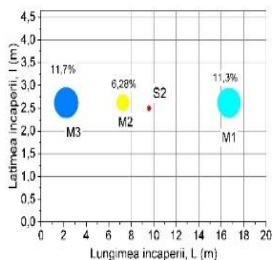
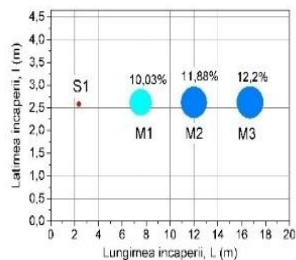
În figura 8.74 sunt prezentate repartizările acestui parametru în încăpere în funcție de variantele studiate. Valorile acestui parametru coroborate cu valorile parametrului *RASTI* caracterizează variantele de amenajare a tavanului în limitele de inteligibilitate.



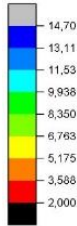
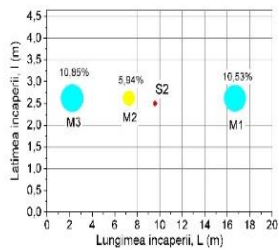
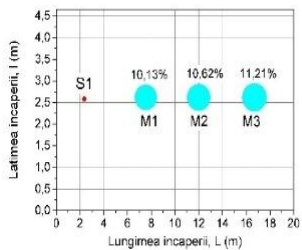
V3.O+2I



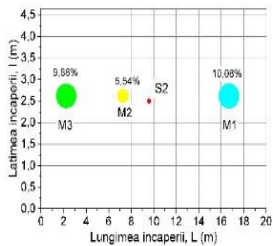
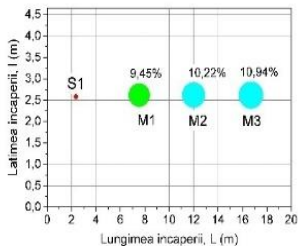
V4.P



V4.P+I



V4.P+2I



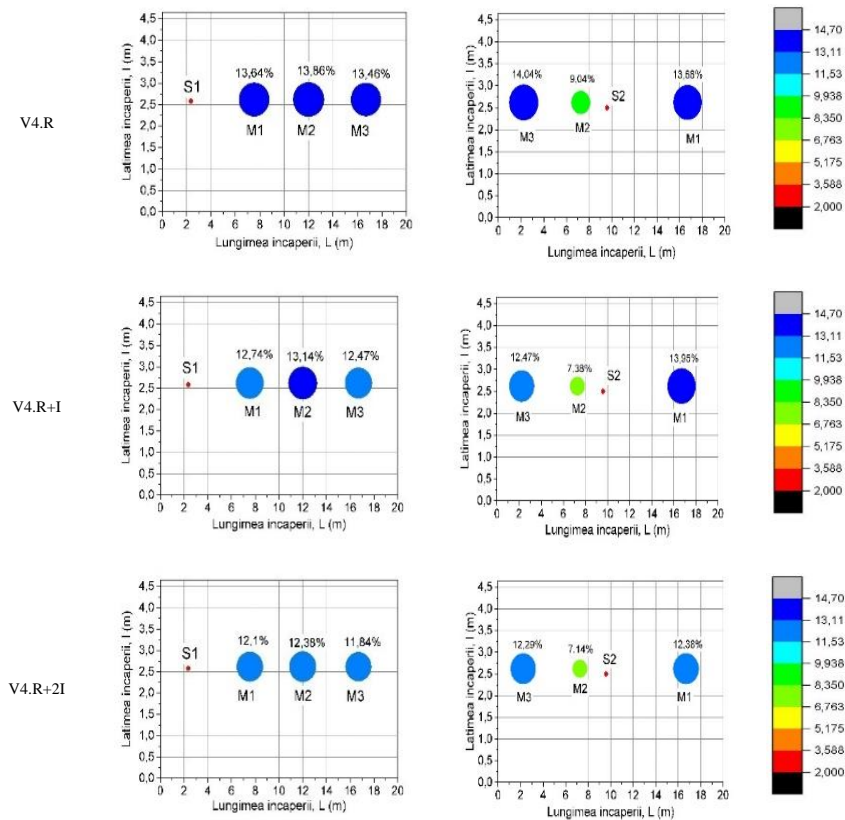


Fig. 8.74. Valorile parametrului %AlCons în încăperea cu tavanul amenajat conform variantelor.

8.6.9. Determinarea prin calcul a parametrului indicele rapid de transmitere a vorbirii (RASTI)

În figurile 8.75 și 8.76 sunt prezentate valorile calculate pentru parametrul RASTI. Din figurile respective se observă că în variantele de amplasare a sursei S2 la mijlocul încăperii s-au determinat cele mai mari valori pentru parametrul RASTI, care caracterizează încăperea ca având o inteligibilitate acceptabilă spre bună.

8.7. Parametrii acustici extinși la toate materialele încercate în camera anecoică

În figurile 8.77, 8.78 și 8.79 sunt prezentate valorile și variația acestor parametri. Calculele au la bază coeficienții de absorbție determinați prin măsurare în camera anecoică. Timpul de reverberație calculat variază în intervalul $(1 \div 1,7)$ s, iar timpul central T_s are aceeași alură a variației pe variante ca timpul de reverberație T_{60} , încadrându-se în intervalul $(75 \div 115)$ ms (fig. 8.77). Claritatea la vorbire $C50$ s-a încadrat între valorile $-0,5$ dB și $2,5$ dB pentru toate variantele, iar densitatea la vorbire este mai mare ca valoarea minimă admisibilă la toate variantele cu excepția variantei VI (tavan neamenajat), respectiv mai mari de $0,5$ dB (fig. 8.78). Parametrul RASTI caracterizează toate variantele ca fiind cu inteligibilitate acceptabilă la vorbire (fig. 8.79).

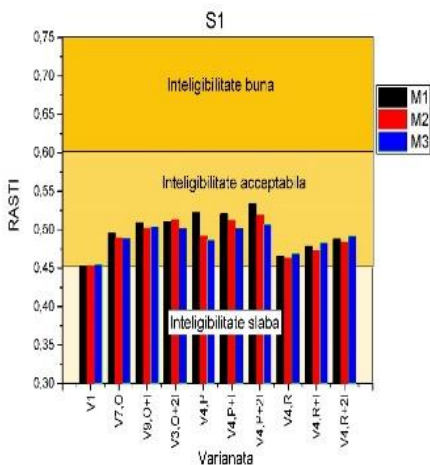


Fig. 8.75. Valorile parametrului RASTI în funcție de variantele de amenajare a tavanului la care s-au obținut cei mai mici timpi de reverberație, pentru amplasarea sursei S1.

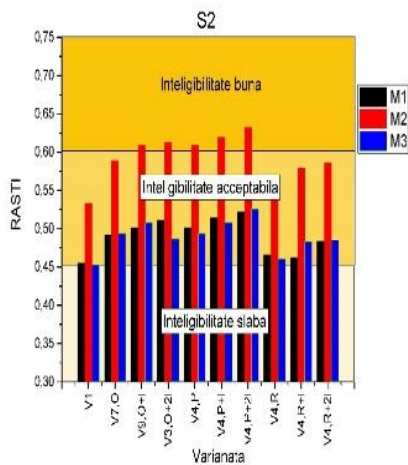


Fig. 8.76. Valorile parametrului RASTI în funcție de variantele de amenajare a tavanului la care s-au obținut cei mai mici timpi de reverberație, pentru amplasarea sursei S2.

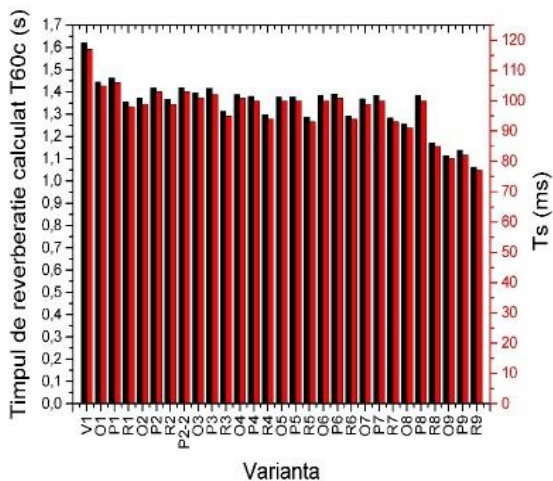


Fig. 8.77. Variația parametrilor T60 și Ts pentru materialele studiate în camera anecoică și care ar putea amenaja tavanul încăperii.

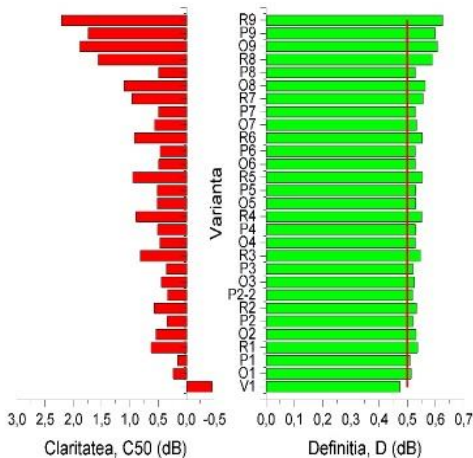


Fig. 8.78. Variația parametrilor C50 și D pentru materialele studiate în camera anecoică și care ar putea amenaja tavanul încăperii.

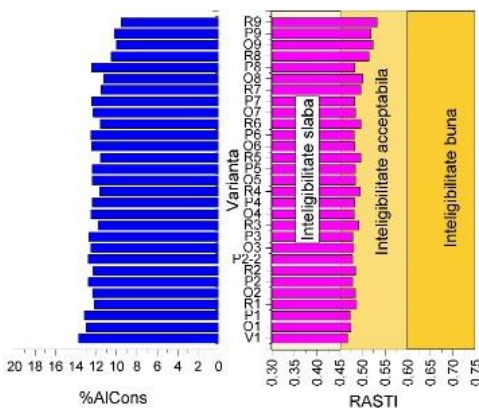


Fig. 8.79. Variația parametrilor %AICons și RASTI pentru materialele studiate în camera anecoică și care ar putea amenaja tavanul încăperii.

8.8. Parametrii acustici pentru încăperea cu geometrie variabilă a tavanului

Printre obiectivele principale ale cercetărilor s-a stabilit și identificarea unor geometrii ale tavanului, care pot fi variate în timpul zilei și pentru diferite destinații ale încăperii. Astfel în timpul zilei, în funcție de percepția (atenția) receptorului care scade pe parcursul zilei (elevul care petrece șase ore în aceeași sală de clasă) sau când trebuie să se amenajeze încăperea de la destinația vorbire la destinația audiție muzicală, sală de spectacole etc., s-a căutat identificarea unor soluții de modelare a tavanului pentru a rezulta parametri acustici corespunzători. Acest lucru este posibil folosind dispozitive acustice a căror poziție poate fi modificată ușor și materiale acustice care pot ușor să îmbrace aceste dispozitive acustice. În cele ce urmează s-au realizat calcule pentru parametrii acustici ai unei încăperi pornind de la timpul de reverberație determinat prin măsurători.

În figura 8.80 sunt prezentate două cazuri de amenajare a tavanului pentru fiecare sursă de sunet. Dispozitivele acustice (panourile) au fost așezate astfel încât să elimine paralelismul între pardoseală și tavan (tavanul să fie o suprafață curbă), într-o singură direcție, în cazul sursei S1 și în două direcții în

cazul sursei S2. Variația poziției dispozitivelor acustice s-a făcut doar în plan vertical conform variantelor studiate. Se observă că variantele prezentate în figura 8.81 sunt variante intermediare. De la aceste variante se poate merge la direcționarea dispozitivelor acustice (panourilor) în diferite alte poziții pentru a obține parametri acustici de o anumită valoare, care caracterizează un anumit tip de încăpere.

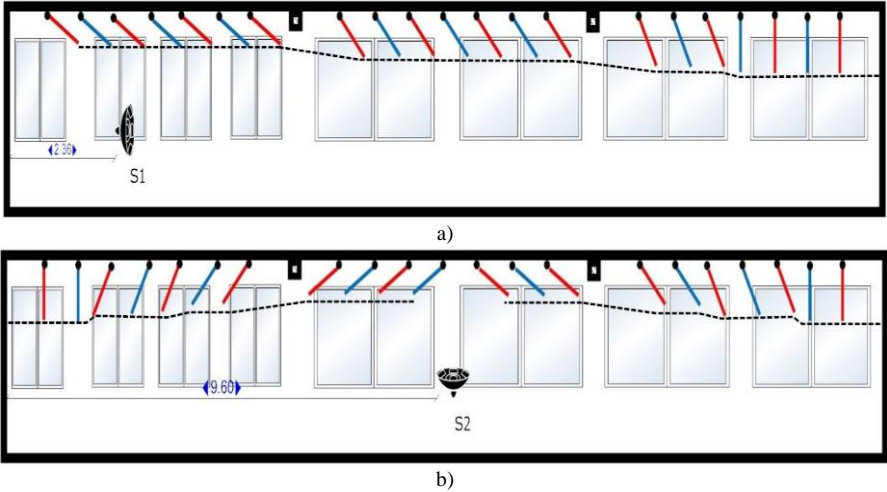
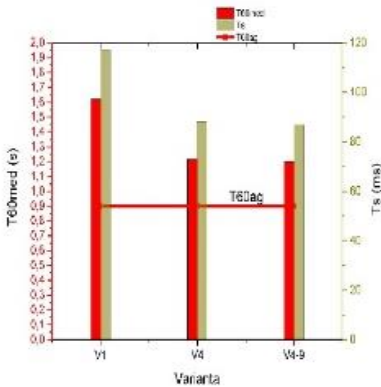


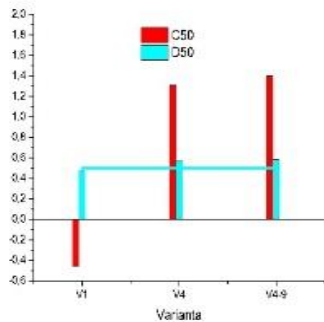
Fig. 8.80. Așezarea dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii pentru a elimina paralelismul cu podeaua (curbarea tavanului) în funcție de poziția sursei: a) sursa S1 la capăt de încăpere, b) sursa S2 la mijlocul încăperii.

S-au analizat separat două grupe mari de variante. Prima grupă de variante de dispozitive și materiale acustice au fost analizate pentru sursa S1, iar a doua grupă de variante de dispozitive și materiale acustice au fost analizate pentru sursa S2. În ambele variante există multiple posibilități de reglare a dispozitivelor (panourilor) acustice.

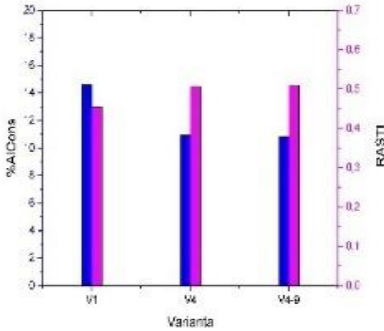
În figurile 8.83, 8.86 și 8.89 sunt prezentate variațiile parametrilor acustici pentru dispozitivele (panourile) acustice din OSB, polistiren și rigips, îmbrăcate pe ambele fețe cu pânză de iută, pentru încăperea având tavanul modelat și sursa amplasată ca în figura 8.80.a.



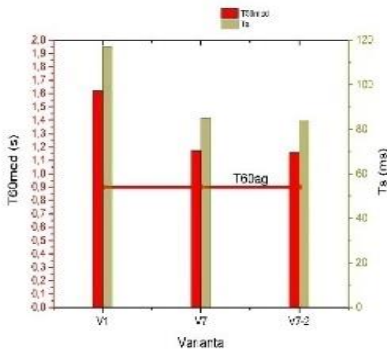
a)



b)

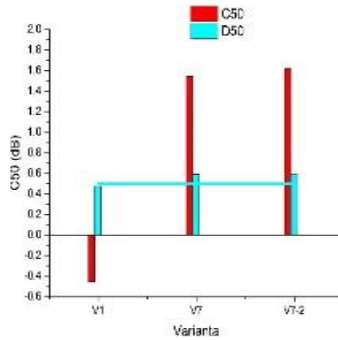


c)

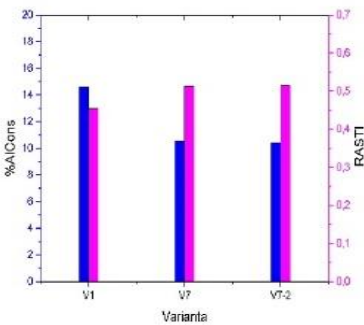


a)

Fig. 8.83. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din OSB și două fețe cu pânză de iută și sursa S1 așezate conform figurii 8.81.a (V4), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V9 – dispozitive din OSB și două fețe cu iută, așezate la un unghi de 60° față de axa verticală a încăperii) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AICons și RASTI.

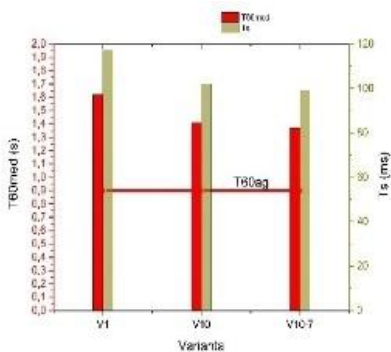


b)

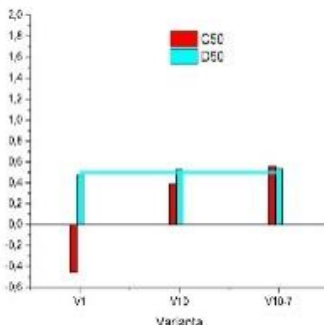


c)

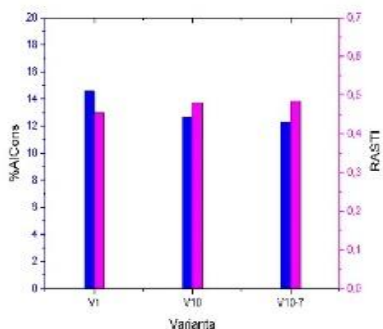
Fig. 8.86. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din polistiren și două fețe cu pânză de iută și sursa S1 așezate conform figurii 8.81.a (V7), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V2 – dispozitive din polistiren și două fețe cu iută, așezate vertical pe tavan) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AICons și RASTI.



a)



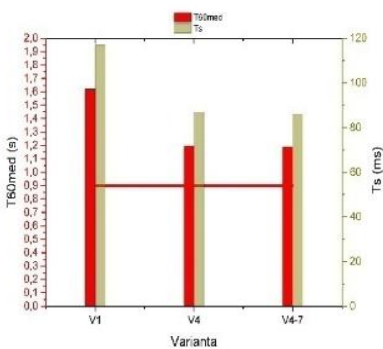
b)



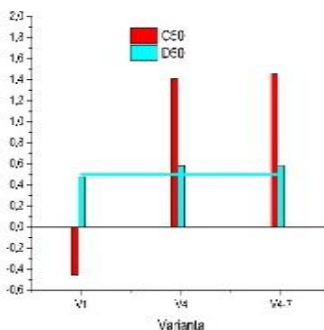
c)

Fig. 8.89. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din rigips și două fețe cu pânză de iută și sursa S1 așezate conform figurii 8.81.a (V10), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V7 – dispozitive din rigips și două fețe cu iută, așezate la un unghi de 30° față de axa verticală a încăperii) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AICons și RASTI.

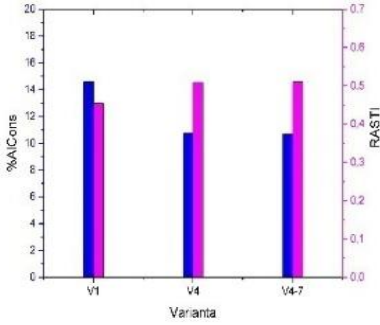
În figurile 8.92, 8.95 și 8.98 sunt prezentate variațiile parametrilor acustici pentru dispozitivele (panourile) acustice din OSB, polistiren și rigips, îmbrăcate pe ambele fețe cu pânză de iută, pentru încăperea având tavanul modelat și sursa amplasată ca în figura 8.80.b.



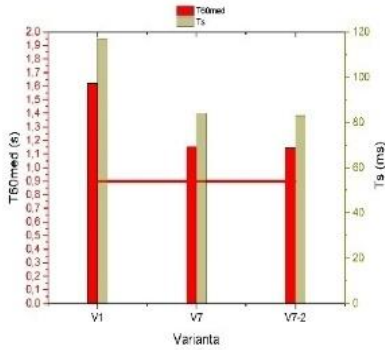
a)



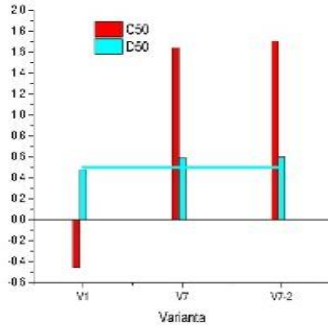
b)



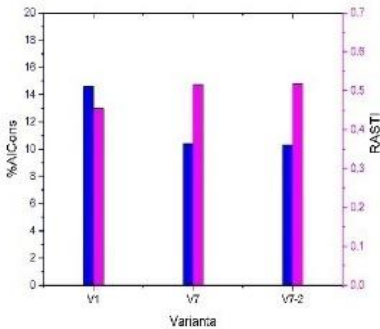
c)



a)



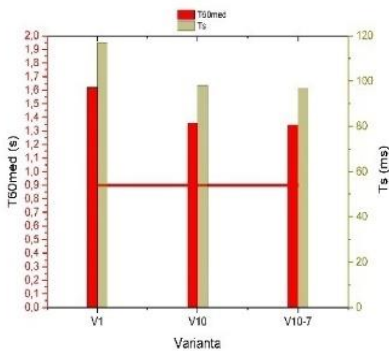
b)



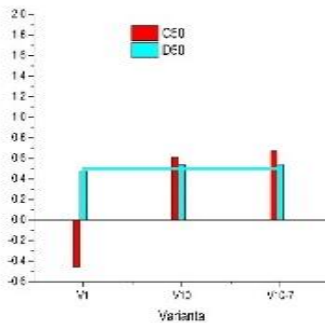
c)

Fig. 8.92. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din OSB și două fețe cu pânză de iută și sursa S2 așezate conform figurii 8.81.b (V4), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V7 – dispozitive din OSB și două fețe cu iută, așezate la un unghi de 30° față de axa verticală a încăperii) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AlCons și RASTI.

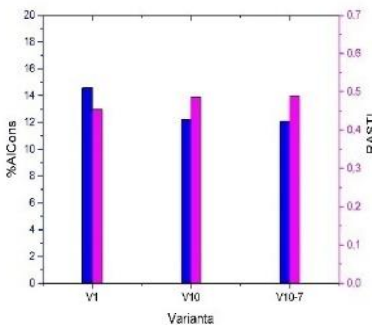
Fig. 8.95. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din polistiren și două fețe cu pânză de iută și sursa S2 așezate conform figurii 8.81.b (V7), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V2 – dispozitive din polistiren și două fețe cu iută, așezate vertical pe tavan) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AlCons și RASTI.



a)



b)



c)

Fig. 8.98. Variația parametrilor acustici pentru încăperea având tavanul echipat cu dispozitive din rigips și două fețe cu pânză de iută și sursa S2 așezate conform figurii 8.81.b (V10), față de varianta cu cele mai mici valori pentru T60 (V7 – dispozitive din rigips și două fețe cu iută, așezate la un unghi de 30° față de axa verticală a încăperii) și comparativ cu tavanul neamenajat (V1): a) T60 și Ts, b) C50 și D, c) %AlCons și RASTI.

8.9. Concluzii privind parametrii acustici ai încăperii studiate

1. Încăperea aleasă pentru studiu are un volum de $247,27 \text{ m}^3$ (fiind un volum mediu aproape de 300 m^3), fiind peste volumul încăperilor mici (camere, sub 100 m^3) și sub volumul încăperilor mari (săli de spectacole, amfiteatre etc);
2. Încăperea are dimensiunile atipice (raportul lungime/lățime/înălțime $19,55 \text{ m}/4,65 \text{ m}/2,72 \text{ m}$), de formă paralelipedică dreptunghică, cu pereții netezi, iar cei opuși paraleli. S-a optat doar pentru amenajarea tavanului încăperii pentru a elimina paralelismul cel puțin între doi pereți opuși;
3. Echipamentele și procedurile de lucru folosite pentru determinarea parametrilor acustici au respectat prescripțiile standardelor SR EN ISO 3382-3:2012 și SR EN ISO 3382-2:2009;
4. Pentru amenajarea tavanului încăperii s-a ales soluția unor dispozitive (panouri) acustice, care să poată fi montate pe tavanul încăperii în diferite poziții (dispozitivele au posibilități de reglaj a poziției lor față de tavan atât în planul vertical cât și în planul transversal (planurile încăperii));
5. Materialele utilizate pentru echiparea dispozitivelor (panourilor) acustice au fost cele studiate în camera anecoică la care s-a determinat prin măsurători coeficientul de absorbție;
6. La toate determinările prin măsurare sau calculare încăperea a fost mobilată, dar nepopulată;
7. Au fost alese pozițiile corespunzătoare pentru sursa de sunet și pentru difuzoarele de recepția a semnalului sonor, în două variante conform prescripțiilor din standard;
8. Timpul de reverberație T60 a fost măsurat pentru șase benzi de frecvență. Fiind o descresștere liniară pentru energia acustică timpul de reverberație T60 a fost considerat media aritmetică între T30 și T20;

9. Timpul de reverberație mediu $T60_{med}$ a fost considerat valoarea medie a măsurătorilor pentru cele șase frecvențe;
10. Valorile timpului de reverberație $T60$ s-au încadrat în intervalul $(1,0 \div 1,7)$ secunde la toate variantele de amenajare a tavanului încăperii mobilate, dar nepopulate;
11. Valori mici (măsurate și/sau calculate) pentru $T60$ s-au obținut la variantele de tavan echipat cu dispozitive acustice din OSB, polistiren expandat, rigips, îmbrăcate pe ambele fețe cu pânză de iută, urmate de aceleași dispozitive îmbrăcate pe o singură parte cu țesătură de cordele;
12. Unghiul de așezare a dispozitivelor acustice influențează valorile timpului de reverberație la toate materialele studiate;
13. Poziția sursei și microfoanelor în încăpere influențează valorile timpului de reverberație;
14. Pentru materialele studiate în camera anecoică (în tubul de impedență), care nu au putut îmbrăca dispozitivele acustice (din lipsă de material), timpul de reverberație a fost determinat prin calcul folosind relația lui Sabine;
15. Între valorile determinate prin măsurători și valorile determinate prin calcul pentru $T60$ s-au înregistrat diferențe mici în "+" sau în "-" (sub 15%, o excepție de 29%);
16. Timpul de descreștere (amortizare) timpurie EDT (EarlyDecay Time) a fost determinat prin măsurare pentru cele șase frecvențe, iar valorile s-au încadrat în intervalul $(0,7 \div 2,5)$ secunde. Valorile pentru EDT_{med} s-au încadrat în intervalul $(1,4 \div 1,97)$ secunde, valoarea maximă fiind la încăperea cu tavanul neamenajat;
17. Luminozitatea sunetului TR (TrebleRatio) a avut valori în interval restrâns, respectiv fost de 0,76 în încăperea cu tavanul neamenajat și de 0,66 în încăperea cu tavanul echipat cu dispozitive acustice din polistiren expandat îmbrăcate cu pânză de iută pe ambele fețe;
18. Claritatea vorbirii $C50$ în încăperea studiată a avut valori cuprinse în intervalul $(-0,456 \div 1,674)$ dB, încăperea fiind caracterizată cu o „acustică acceptabilă” pentru variantele studiate. O „acustică bună” s-a obținut la încăperea cu tavanul echipat cu dispozitive din polistiren expandat îmbrăcate cu pânză de iută pe ambele fețe;
19. Definiția sunetului $D50$ a fost determinată prin calcul și a avut valori peste valoarea minimă admisibilă (0,5 dB) la toate variantele de echipare a tavanului încăperii cu dispozitive acustice, cu excepția dispozitivelor din rigips și a tavanului neechipat, unde valorile au fost sub valoarea admisibilă;
20. Timpul central T_s depinde direct de $T60$ și EDT și indirect de $C50$. Valorile s-au încadrat în intervalul admisibil $(72 \div 144)$ ms. La varianta de tavan echipat cu dispozitive acustice din polistiren expandat îmbrăcate în pânză de iută pe ambele fețe s-au înregistrat cele mici valori pentru T_s , respectiv $(81 \div 95)$ ms pentru toate pozițiile sursă-microfoane;
21. Procentul de consoane pierdute (neperceptute) $\%AICons$ a înregistrat cele mai mici valori la aceeași variantă de tavan, respectiv echipat cu dispozitive acustice din polistiren expandat îmbrăcate cu pânză de iută pe ambele fețe, la toate pozițiile (distanțele) sursă – microfoane $(9,45 \div 10,94)$ %;
22. Din punct de vedere al indicelui rapid de transmitere a vorbirii $RASTI$, care caracterizează inteligibilitatea vorbirii în încăpere, calificativul „inteligibilitate bună” s-a obținut pentru sursa amplasată în poziția S2 (mijlocul încăperii) și pentru distanța cea mai mică de poziționare a microfonului ($M2 = 2,33$ m) la variantele de dispozitive acustice din polistiren expandat îmbrăcate cu pânză de iută pe ambele fețe;
23. Extinderea calculului pentru parametrii acustici la toate materialele studiate în camera anecoică a arătat că și variantele de dispozitive acustice îmbrăcate în țesătură de cordele pe cele trei materiale suport, au realizat valori admisibile pentru parametrii acustici, caracterizând încăperea ca fiind bună pentru activități unde se vorbește;
24. În cazul eliminării paralelismului între tavanul și pardoseala încăperii prin așezarea rândurilor de dispozitive acustice la unghiuri crescătoare față de poziția sursei S1 sau simetric crescătoare față de poziția sursei S2, s-au obținut valori mai bune pentru toți parametrii acustici ($T60$, T_s , $C50$, $D50$, $\%AICons$, $RASTI$), dar variantele de dispozitive acustice îmbrăcate pe ambele fețe cu pânză de iută au obținut cele mai bune valori pentru parametrii acustici la încăperea cu sursa de sunet amplasată

în mijlocul încăperii și cu dispozitivele acustice așezate în unghiuri crescătoare începând de la sursă (fig. 8.80.b).

CAPITOLUL 9. ELABORAREA UNOR MODELE MATEMATICE

9.1. Cu privire la pozițiile de așezare a dispozitivelor (panourilor) acustice pe tavanul încăperii

Pentru realizarea acestui model matematic s-a realizat o grupare a variantelor de lucru, ținându-se cont de pozițiile panourilor pe tavanul încăperii prezentate în cadrul capitolului 8 (tab. 8.2.). În tabelul 9.1. sunt prezentate grupele de variante pentru care s-a realizat modelarea matematică.

Tabelul 9.1.

Grupele de variante de lucru.

Nr. crt.	Grupa	Variantele de lucru	Unghiul de așezare al dispozitivelor (panourilor) acustice (conform tab. 8.2)
1.	1	V2	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 0° față de axa transversală a tavanului
2.		V3	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului
3.		V4	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa transversală a tavanului
4.	2	V5	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului, cele două rânduri sunt așezate în oglindă
5.		V6	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa transversală a tavanului, cele două rânduri sunt așezate în oglindă
6.	3	V2	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 0° față de axa transversală a tavanului
7.		V7	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 30° față de axa verticală a încăperii
8.		V8	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 45° față de axa verticală a încăperii
9.		V9	2 rânduri de dispozitive paralele așezate la unghi de 60° față de axa verticală a încăperii

9.1.1. Identificarea modelului matematic privind pozițiile de așezare a dispozitivelor (panourilor) acustice

Analizând valorile mărimilor măsurate s-au identificat o serie de ecuații matematice care descriu suprafețe în spațiu tridimensional (dependența între trei mărimi). Deoarece valoarea cât mai apropiată de "1" a coeficientului de corelație r^2 arată că valorile experimentale sunt foarte aproape de suprafața descrisă de ecuație, s-au ales modele matematice cu cea mai mare valoare pentru r^2 (tab. 9.2.).

Tabelul 9.2.

Ecuațiile matematice și coeficienții de corelație ale acestora.

Nr. relație mat.	Sursa	Grupa de lucru	Tipul de material	Ecuația matematică	Coef. de corelație, r^2
(9.1)	S1	1	OSB	$z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x^2 + e \cdot y^2 + f \cdot x \cdot y$	0,82
			OSB+I		0,64
			OSB+2I		0,71
			P		0,76
			P+I		0,96

			P+2I		0,98
			R		0,76
			R+I		0,65
			R+2I		0,96
(9.16)	S2		P	$z = a + b \cdot \ln x + c \cdot (\ln x)^2 + d \cdot (\ln x)^3 + e \cdot \ln y$	0,87
(9.33)		3	OSB	$z = a + b \cdot x + c \cdot \ln y + d \cdot (x)^2 + e \cdot (\ln y)^2 + f \cdot x \cdot \ln y + g \cdot (x)^3 + h \cdot (\ln y)^3 + i \cdot x \cdot (\ln y)^2 + j \cdot (x)^2 \cdot \ln y$	0,83

9.1.2. Verificarea modelului matematic privind așezarea dispozitivelor (panourilor) acustice

Valorile erorii relative s-a încadrat în intervalul $(-3,6 \div 4) \%$, cu câteva excepții cu valori de -29% și $39,6 \%$ (Anexa 3).

În cadrul figurii 9.2 sunt prezentate suprafețele de răspuns, corespunzătoare ecuațiilor (9.1), (9.16) și (9.33) din tabelul 9.2. Au fost alese doar trei ecuații din totalul de 41.

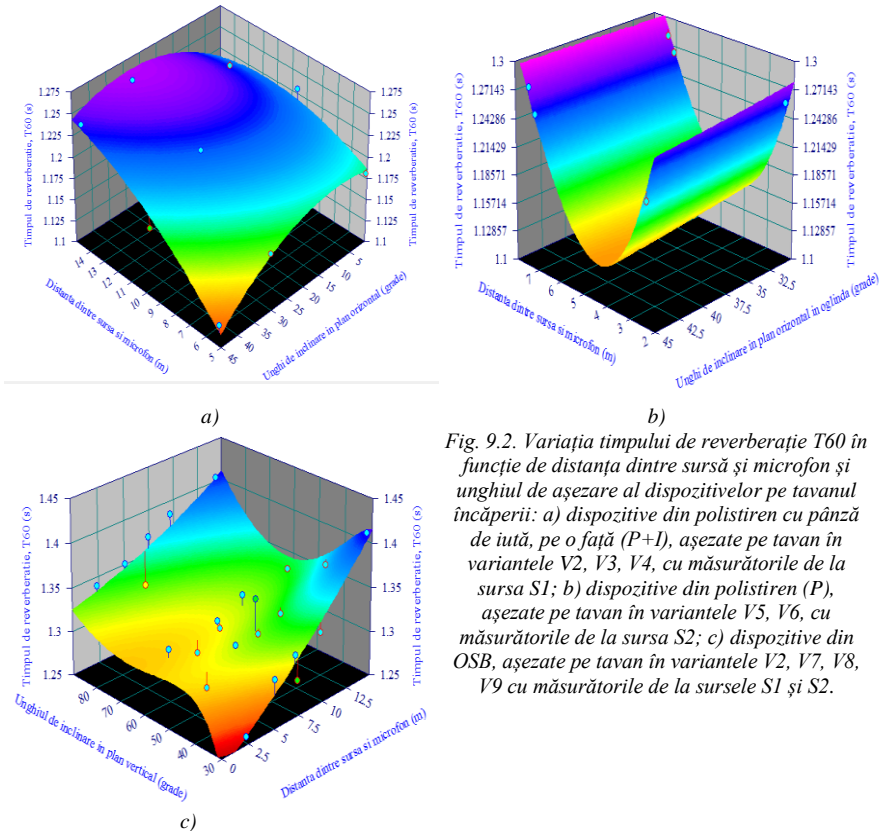
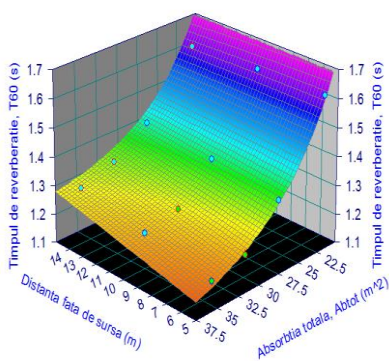


Fig. 9.2. Variația timpului de reverberație T_{60} în funcție de distanța dintre sursă și microfon și unghiul de așezare al dispozitivelor pe tavanul încăperii: a) dispozitive din polistiren cu pânză de iută, pe o față (P+I), așezate pe tavan în variantele V2, V3, V4, cu măsurătorile de la sursa S1; b) dispozitive din polistiren (P), așezate pe tavan în variantele V5, V6, cu măsurătorile de la sursa S2; c) dispozitive din OSB, așezate pe tavan în variantele V2, V7, V8, V9 cu măsurătorile de la sursele S1 și S2.

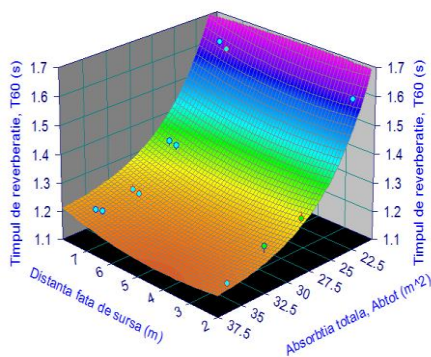
9.2. Cu privire la materialul dispozitivelor (panourilor) acustice

9.2.1. Identificarea modelului matematic privind materialul dispozitivelor

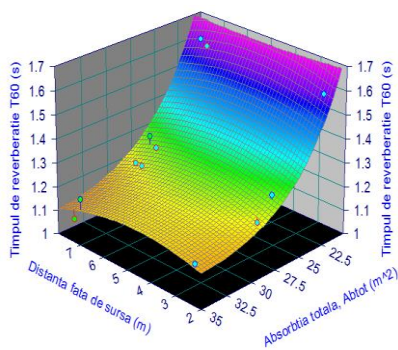
S-a obținut același model matematic (ecuația (9.43)) pentru toate cazurile studiate, model care a pus în evidență influența exercitată de către variația distanței dintre sursă și microfon (fig. 8.11 și fig. 8.12) și de către variația tipului de material folosit pe panourile/dispozitivele acustice, respectiv absorbția totală A_{tot} , pentru toate variantele de așezare a panourilor, asupra variației timpului de reverberație T_{60} .



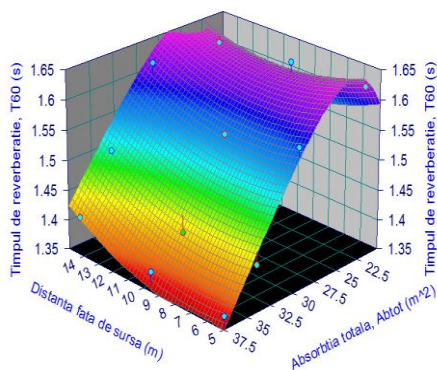
a) OSB, V2



OSB, V5



c) Polistiren, V2



d) Polistiren V3

Fig. 9.3. Variația timpului de reverberație T60 în funcție de distanța dintre sursă și microfon și tipul de material folosit la dispozitive: a) dispozitive din OSB dispuse pe tavan pe două rânduri paralele la unghi 0° față de axa transversală a tavanului (variante V2); b) dispozitive din OSB dispuse pe tavan pe două rânduri în oglindă, paralele la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului (variante V5); c) dispozitive din polistiren dispuse pe tavan pe două rânduri paralele așezate la unghi de 0° față de axa transversală a tavanului (variante V2); d) dispozitive din polistiren dispuse pe tavan pe două rânduri paralele așezate la unghi de 30° față de axa transversală a tavanului (variante V3).

$$z = a + b \cdot x + \frac{c}{y} + d \cdot x^2 + \frac{e}{y^2} + f \cdot \frac{x}{y} \quad (9.43)$$

unde:

- z reprezintă timpul de reverberație T60 (s);
- x – distanța dintre sursă și microfon (m);
- y – absorbția totală Abtot (m²);

a, b, c, d, e, f – coeficienți care variază pentru fiecare variantă de lucru și pentru fiecare tip de material. Valoarea acestor coeficienți este prezentată în Anexa 3.

În cadrul figurii 9.3. sunt prezentate suprafețele de răspuns, corespunzătoare ecuației (9.43).

9.2.2. Verificarea modelului matematic privind materialul dispozitivelor

Modelul matematic, generat de către soft-ul TableCurve 3D, a fost supus verificării, iar valorile obținute sunt prezentate în cadrul Anexei 3. Valorile erorii relative au variat în intervalul $(-6,35 \div 6,7) \%$, cu câteva excepții care au ajuns până la $187,76 \%$.

9.3. Corelații cu privire la alți parametri acustici ai unei încăperi

De asemenea, s-a conceput o serie de modele matematice care au avut ca scop identificarea corelațiilor existente între următorii parametri:

- La intrare: absorbția totală, $Ab_{tot} (m^2)$ și timpul de reverberație calculat, $T60c (s)$;
- La ieșire: claritatea, $C50 (dB)$; definiția, $D50 (dB)$; $Ts (ms)$; $\%AICons (\%)$; $RASTI$.

9.3.1. Identificarea modelului matematic pentru parametrii acustici

Pentru fiecare caracteristică urmărită s-a constatat existența unui model matematic general:

$$z = a + b x + c y \quad (9.44)$$

unde:

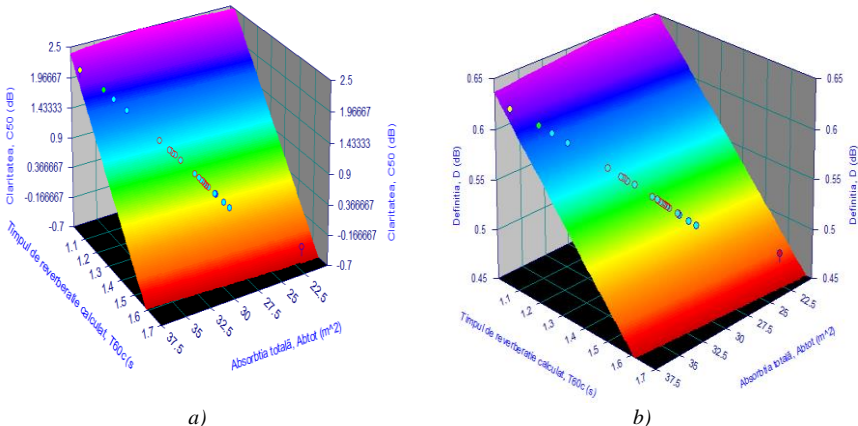
z este parametrul de ieșire (parametrul acustic studiat: claritatea, $C50 (dB)$; definiția, $D (dB)$; $Ts (ms)$; $\%AICons (\%)$ și $RASTI$);

x - absorbția totală, $Ab_{tot} (m^2)$;

y - timpul de reverberație calculat, $T60c (s)$;

a, b, și c – coeficienții care variază pentru fiecare parametru de ieșire.

În cadrul figurii 9.4. sunt prezentate suprafețele de răspuns care corespund relației matematice alese (9.44). Alegerea s-a făcut în funcție de cel mai mare coeficient de corelație r^2 care arată cât de „adevărat” este modelul matematic față de datele experimentale și față de alte situații care pot apărea și pot fi rezolvate aplicând modelul matematic fără a mai face măsurători.



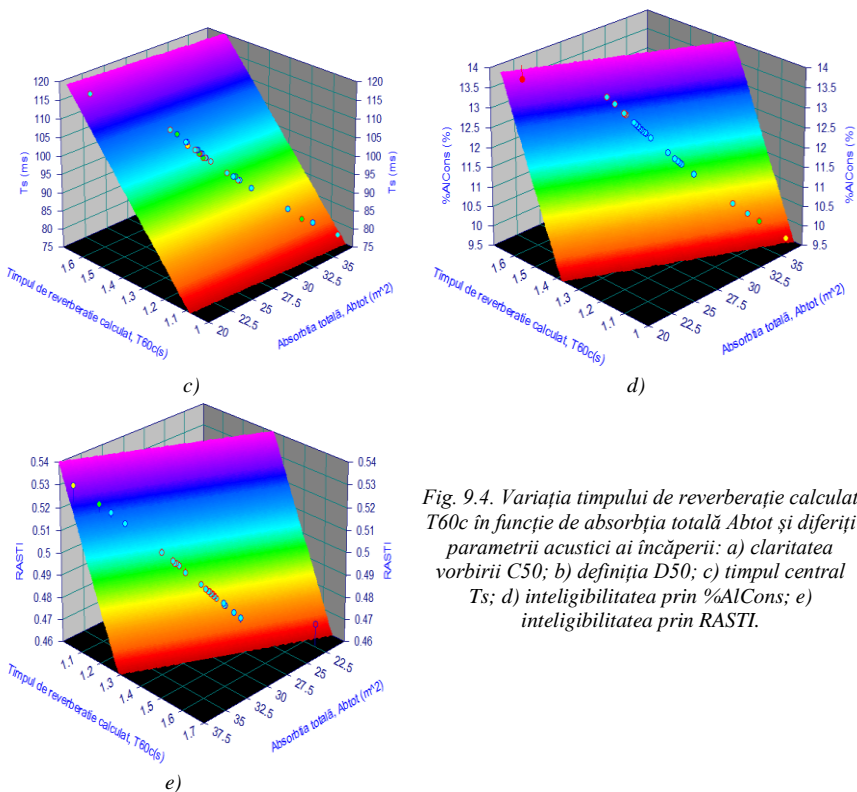


Fig. 9.4. Variația timpului de reverberație calculat T60c în funcție de absorpția totală Abtot și diferiți parametrii acustici ai încăperii: a) claritatea vorbirii C50; b) definiția D50; c) timpul central Ts; d) inteligibilitatea prin %AICons; e) inteligibilitatea prin RASTI.

9.3.2. Verificarea modelului matematic cu privire la alți parametri acustici

Ca și în cazul modelelor matematice prezentate anterior, și pentru aceste interpretări matematice s-a realizat o verificare a valorilor obținute cu ajutorul modelului comparativ cu valorile reale. Erorile relative sunt mici și s-au încadrat în intervalul $(-2,04 \div 9,06)\%$, cu două excepții: $-23,8\%$ și $37,8\%$ (Anexa 3).

9.4. Concluzii cu privire la elaborarea modelelor matematice

1. Au fost analizate multe modele matematice și au fost alese acele modele matematice care să poată exprima cât mai aproape de realitate dependența între mărimi variabile și parametrii acustici;
2. Valorile obținute la măsurarea parametrilor acustici în funcție de modul de așezare a dispozitivelor acustice pe tavanul încăperii au fost utilizate pentru a identifica un model matematic cât mai „real” care să poată fi extins și la alte situații de amenajare sub alte unghiuri cu dispozitive acustice a tavanului încăperii;
3. Au fost identificate mai multe relații matematice care descriu dependența timpului de reverberație în funcție de distanța sursă-microfon și de unghiul de așezare a dispozitivului acustic pe tavanul încăperii;
4. Au fost alese modelele matematice care au cei mai mari coeficienți de corelație (mai mari de 0,75 care reprezintă o relație puternică între mărimile variabile);
5. O altă abordare în identificarea modelelor matematice care pot reprezenta fenomenul în sens mai larg se referă la influența tipului de material folosit la dispozitivele acustice asupra timpului de

reverberație $T60$ împreună cu diferite unghiuri de așezare a dispozitivelor acustice pe tavanul încăperii;

6. Un model matematic general a fost identificat pentru parametrii acusticii claritatea vorbirii $C50$, definiția $D50$, timpul central T_s , procentul de consoane pierdute $\%AICons$, indicele $RASTI$;
7. Pentru toate grupele de valori de mărimi au fost alese modelele matematice care au coeficientul de corelație cât mai aproape de valoarea „1”;
8. La verificarea modelelor matematice valorile erorilor relative s-au încadrat în intervale mici de valori, ceea ce confirmă și coeficienții de corelație mari, respectiv veridicitatea modelului matematic, care îl recomandă pentru rezolvarea și altor situații care pot apărea.

Capitolul 10.

CONCLUZII GENERALE

Teza de doctorat prezintă studiile și cercetările cu privire la îmbunătățirea parametrilor acustici ai unei încăperi destinate vorbirii folosind dispozitive acustice echipate cu diferite tipuri de materiale ecologice, tradiționale, reciclabile.

În urma studiilor teoretice și a cercetărilor experimentale s-au putut identifica și elabora concluzii, care au fost prezentate la fiecare capitol. În cele ce urmează se vor prezenta doar acele concluzii care au putut fi grupate după anumite criterii:

A. Concluzii cu privire la oportunitatea temei:

1. Din analiza bibliografiei de specialitate, foarte bogată în domeniu, se pot evidenția următoarele:
 - Fiecare încăpere (spațiu închis) trebuie să asigure un confort acustic corespunzător destinației acelei încăperi;
 - Timpul de reverberație este cel mai important parametru acustic și este determinat de volumul și forma încăperii, dar și de calitățile reflectante ale suprafețelor încăperii (pereți, mobilier, persoane din încăpere);
 - În încăperile destinate cursurilor, conferințelor, prezentărilor etc., atât sursa de sunet, cât și receptorul auditiv sunt reprezentate de ființe umane;
 - Studiile și cercetările realizate și prezentate în teză au pornit de la ideea obținerii unui confort acustic bun într-un spațiu închis destinat desfășurării unor activități publice în grupuri medii de lucru, în funcție de suprafața și volumul încăperii (25-50 persoane). Pornind de la geometria spațiului închis, impusă prin construcția încăperii, s-a căutat să se realizeze un confort acustic care poate fi variat în timp și în spațiu. S-au studiat atât diferitele modificări ale geometriei tavanului încăperii, cât și diferite tipuri de materiale, unele ecologice și tradiționale. Geometria tavanului încăperii se poate modifica pentru a realiza un anumit tip de confort acustic pe durata unei zile, pentru același tip de material folosit, rezultând astfel mai multe tipuri de structuri acustice care au putut fi studiate;
 - Întrebările care au apărut pe parcursul documentării teoretice, dar și pe parcursul determinărilor practice s-au referit la: Care ar fi cea mai bună structură acustică pentru fiecare tip de încăpere (forma încăperii, obiectele și materialele din încăpere)? Cum putem realiza o structură acustică care să păstreze pe parcursul zilei același confort acustic, știind că receptorul auditiv uman nu rămâne constant în timp la primirea informațiilor? Ce materiale se pot folosi? Ce materiale tradiționale, ecologice și reciclate se pot folosi? Cum se pot grupa pentru a obține efectele dorite?
2. Există încercări timide de introducere a materialelor reciclabile, ecologice sau tradiționale în amenajarea spațiilor închise destinate în principal vorbirii (săli de curs, conferințe etc.). Gradul de folosire a unor materiale reciclate sau gradul de utilizare a unor materiale tradiționale trebuie să crească având în vedere principiile dezvoltării durabile în orice domeniu;
3. Extinderea domeniilor de utilizare a unei încăperi pentru mai multe destinații, utilizând dispozitive și materiale acustice (structuri acustice) corespunzătoare, cu posibilitatea reglării poziției acestora,

este o propunere care se poate aplica în multe încăperi pentru a le conferi un confort acustic reclamat de activitățile care se desfășoară în acele încăperi;

B. Concluzii cu privire la fundamentarea teoretică privind calitatea acustică a unei încăperi destinate pentru anumite activități:

- 1. Parametrii acustici** caracterizează o încăpere din punct de vedere al confortului acustic. Acești parametri sunt într-un număr foarte mare, dar în teză au fost studiați cei mai importanți, fiind selectați din mai multe grupe de parametri care caracterizează o încăpere, respectiv:
 - a) Parametrii privind reverberația**, care caracterizează încăperile pentru orice tip de activitate ce se desfășoară în acestea, din punct de vedere al timpilor de percepere de către receptor (ascultător) a undelor sonore emise de surse aflate în interiorul încăperii și reprezintă gradul de „vivacitate” al încăperii. Sunt măsurați sau determinați atât pentru încăperile nepopulate, cât și pentru încăperile populate. Cei mai importanți sunt: **timpul de reverberație (durata de reverberație) ($T60$), timpul de descreștere (amortizare) timpurie (EDT -Early Decay Time), căldura sunetului (BR - Bass Ratio), luminozitatea sunetului sau Treble Ratio (TR);**
 - b) Parametrii energetici**, care analizează energia sunetului și caracterizează încăperea din punct de vedere al clarității privind percepția vorbirii și a muzicii, al definiției vorbirii, a timpului central sau a sonorității încăperii, de fapt acești parametri exprimă echilibrul între energia sonoră care sosește mai devreme la receptor și energia sonoră care ajunge mai târziu. Dintre aceștia cei mai importanți sunt: **claritatea vorbirii ($C50$), definiția ($D50$), timpul central (Ts);**
 - c) Parametrii care descriu inteligibilitatea vorbirii**, sunt parametri subiectivi care pot fi exprimați prin numărul de cuvinte fără sens fonetic înțelese de ascultător (receptor) aflat în încăpere, deci reflectă nivelul de înțelegere a cuvintelor. Se pot determina prin indicii de articulare care se poate referi la consoane, silabe, cuvinte cu două silabe, propoziții complete. Din această grupă au fost analizați următorii parametri: **indicele rapid de transmitere a vorbirii ($RASTI$) și procentul de consoane pierdute ($\%AIConS$);**
 - d) Parametrii spațiali** se referă la efectele spațiale create pentru sunet de către o încăpere, respectiv la corelarea semnalelor sonore percepute de cele două urechi. Acești parametri nu au fost studiați în teză, urmează să fie studiați în alte teme de cercetare;
- 2. Absorbția sunetului într-o încăpere**, caracterizează din punct de vedere acustic materialele din care este construită acea încăpere, precum și obiectele și persoanele aflate în acea încăpere. Toate acestea la un loc formează dispozitivele și materialele acustice aflate într-o încăpere;

C. Concluzii cu privire la verificarea experimentală a teoriilor abordate:

- 1. Pentru măsurarea coeficientului de absorbție** au fost parcurse o serie de etape pentru obținerea unor rezultate corecte, care să reflecte cât mai mult situațiile din practică, respectiv:
 - Alegerea materialelor pentru studiu s-a efectuat urmărind scopul de a respecta cerințele de protecție a mediului, și anume folosirea de materiale biodegradabile și materiale reciclate, pentru a asigura cerințele de confort acustic ale unei încăperi;
 - Determinarea coeficientului de absorbție acustică a tuturor materialelor alese pentru studiu s-a realizat într-o camera anecoică performantă, cea de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, care are cele mai ridicate criterii de performanță: volum de 800 m^3 și coeficient de absorbție a sunetelor de 99% (universitate cu care s-a încheiat un contract de cercetare în acest sens);
 - Coeficientul de absorbție a undelor sonore reprezintă un parametru deosebit de important pentru caracterizarea oricărui tip de material care este folosit în construcția sau amenajarea spațiilor închise sau deschise;
 - Pentru studii, cercetări și determinări au fost alese materiale reciclate, naturale sau tradiționale, astfel încât să poată fi armonizate principiile economice cu cele ale dezvoltării durabile și cu cele ale promovării materialelor autohtone;
 - Materialele suport propuse și experimentate sunt cele mai folosite în construcții și amenajări (polistiren și rigips), dar și ecologice (OSB). Aceste materiale au fost utilizate atât ca suport pentru aplicarea altor materiale cât și ca material acustic propriu zis;

- Materialele propuse pentru determinări și care au fost depuse peste materialele suport, utilizate pentru amenajarea și studierea sunetului în încăperi pentru diferite destinații, sunt naturale (pânza de iută), sintetice (cauciuc reciclat, polipropilenă reciclată, plastic reciclat) și mixte (granule din făină de lemn, țesătură de cordele textile);
- Pentru materialele granulare (de amestec) s-a căutat un liant ecologic care a fost realizat de o firmă care a colaborat la aceste studii. A fost obținut un liant ecologic, biodegradabil în timp, în a cărui compoziție se află rășini acrilice pe bază de apă, materiale de umplutură (carbonat de calciu de diverse granulații), aditivi, îngroșător celulozic. Liantul este produs de S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău, rețetă proprie, care reprezintă o noutate în domeniu. După aproape doi ani de la realizarea și aplicarea amestecurilor, în condiții de interior, nu s-au identificat modificări de nici-o natură asupra amestecurilor realizate cu acest liant (privind culoarea, adezivitatea, dizolvarea materialului de amestec/granulele);
- Modul de folosire a materialelor reciclate a presupus presarea acestora (făina de lemn) sau mărunțirea acestora (cauciuc reciclat, polipropilenă reciclată și plastic reciclat);
- Granulometria acestor materiale reciclate, forma particulelor și rezistența în timp a formelor inițiale, realizează pentru amestecul depus pe materialele suport o anumită rugozitate, care intervine atât în aspectul dispozitivelor acustice care se realizează cu acestea, dar, cel mai important, în modificarea coeficientului de absorbție sau a coeficientului de difuzie al undelor sonore;
- O privire generală asupra modului de variație a coeficientului de absorbție arată o scădere a acestuia pentru toate materialele încercate la absorbția sunetului la frecvența de 500 Hz (nivel mediu-jos). Iar la frecvențe mai mari sau mai mici de de 500 Hz s-au înregistrat creșteri ale coeficientului de absorbție;
- Cele mai bune materiale privind coeficientul mediu de absorbție, sunt: țesătura de cordele aplicată pe rigips, țesătura de cordele aplicată peste OSB, pânza de iută aplicată pe ambele fețe ale panoului de OSB. Acest lucru poate fi explicat prin porozitatea complexă a acestora, indiferent de materialul suport. Pentru pânza de iută avem o porozitate dublă: cea a firului țesăturii și cea a țesăturii, pentru țesătura de cordele avem o porozitate triplă: cea a firului țesăturii inițiale, cea a cordelei răsucite și cea a țesăturii finale;
- Coeficienți de absorbție mici au realizat materialele suport simple, respectiv: polistiren, OSB;
- Atât individual, cât și cu materiale aplicate, cei mai mari coeficienți de absorbție au fost realizați de dispozitivele din rigips, iar cei mai scăzuți au fost înregistrați la dispozitivele din polistiren (fapt care confirmă influența directă a densității acestor materiale pentru anumite frecvențe);
- Se poate observa că variantele de materiale studiate realizează coeficienți de absorbție a sunetului care variază într-o plajă mare de valori, respectiv de la 0,075 până la 0,233. Cele mai mari valori s-au înregistrat la materialele de bază (OSB, polistiren și rigips) acoperite cu pânză de iută sau cu țesătură de cordele. Materialele reciclate mărunțite amestecate cu liantul ecologic și aplicate pe materialele suport, dau coeficienți de absorbție diferiți în funcție de materialul suport, astfel:
 - Cei mai mici coeficienți medii de absorbție pentru toate amestecurile s-au înregistrat pentru aplicarea lor pe polistiren, respectiv: valoarea de 0,1 pentru amestecul din granule din făină de lemn și liant ecologic; 0,114 pentru amestecul realizat cu granule din cauciuc reciclat; 0,12 pentru amestecul realizat cu plastic reciclat mărunțit; 0,121 pentru amestecul realizat cu granule din polipropilenă reciclată;
 - Valori intermediare pentru coeficientul de absorbție s-au înregistrat la amestecurile aplicate pe OSB, respectiv: 0,106 pentru amestecul cu făină de lemn; 0,110 pentru amestecul cu plastic reciclat mărunțit; 0,116 pentru amestecul cu granule din polipropilenă reciclată; 0,147 pentru amestecul cu granule din cauciuc reciclat;
 - Cele mai mari valori ale coeficientului de absorbție s-au obținut pentru amestecurile aplicate pe rigips, respectiv: 0,130 pentru amestecul cu făină de lemn; 0,140 pentru amestecul cu plastic reciclat mărunțit; 0,144 pentru amestecul cu granule din cauciuc reciclat; 0,147 pentru amestecul cu granule din polipropilenă reciclată;

- Folosirea unor pachete de materiale acustice (tip „sandwich”) duce la creșterea coeficientului de absorbție în toate cazurile și la toate frecvențele. Se poate ajunge la valori duble sau triple (în cazul aplicării pânzei de iută pe suport de rigips, sau aplicarea țesăturii de cordele pe suport de rigips);
 - Există o mare varietate de date privind valorile coeficientului de absorbție, pornind de la cataloagele producătorilor de dispozitive și materiale acustice până la considerațiile cercetătorilor care au publicat în revistele de specialitate. De asemenea, funcție de metoda de determinare a acestui coeficient, datele diferă [256];
 - Reprezentările grafice realizate pe baza datelor obținute experimental și prezentate evidențiază [256]:
 - tendințele de creștere sau scădere ale coeficientului de absorbție prin realizarea depunerilor pe fiecare material de bază;
 - modul de variație cu frecvența a coeficientului de absorbție pentru fiecare probă;
 - tendința generală de a obține coeficienți mai mari de absorbție la frecvențe mai mari;
2. Pentru determinarea prin măsurare și calcul a **parametrilor acustici**, care caracterizează o încăpere din punct de vedere al confortului acustic s-au parcurs următoarele etape:
- Au fost identificate mai multe obiective pentru realizarea cercetărilor, respectiv:
 - Alegerea materialelor de amenajare interioară, ecologice, reciclabile sau tradiționale care pot realiza îmbunătățirea performanțelor acustice;
 - Stabilirea poziției optime a dispozitivelor (panourilor) acustice, care să pună în valoare la maximum proprietățile acustice ale materialelor propuse pentru amenajări;
 - Analiza parametrilor acustici (măsurări și calculații), care dau confortul unei încăperi în funcție de destinația acesteia;
 - Identificarea unor soluții de dispozitive acustice și materiale acustice care să poată mări posibilitățile de utilizare a încăperii;
 - Identificarea geometriei optime a tavanului încăperii în funcție de timpul zilei și de percepția receptorilor (ascultătorilor);
 - Dispozitivele au fost concepute sub forma unor panouri din ramă metalică pe care se pot monta atât materialele suport (OSB, polistiren, rigips), cât și pânda de iută care au îmbrăcat aceste materiale suport. Dispozitivele (panourile) acustice, în număr de 21, au fost amplasate pe tavanul încăperii pe două rânduri, cu posibilități de rotire în plan vertical și în plan orizontal (datorită cuplei sferice cu deget). Astfel au rezultat opt variante de așezare a panourilor pe tavanul încăperii;
 - Materialele propuse pentru efectuarea experimentelor au fost: polistiren expandat sub formă de plăci cu 38 mm grosime, plăci de OSB de 6 mm grosime, plăci de rigips de 12,4 mm grosime, pânda de iută. Astfel au fost studiate patru variante de materiale acustice;
 - Au fost respectate prevederile standardelor SR EN ISO 3382-3:2012 - Acustica birourilor deschise și SR EN ISO 3382-2:2009 - Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 2: Durata de reverberație a încăperilor obișnuite;
 - S-a luat în studiu doar tavanul încăperii, deoarece, așa cum s-a arătat, pe tavan se pot realiza cele mai semnificative amenajări cu influențe relevante asupra confortului acustic al unei încăperi. S-a ales o încăpere cât mai atipică (raportul între dimensiuni, destul de mare $L/h = 19,55 \times 4,65 \times 2,72 \text{ m}$), cu un tavan cât mai plan pentru a putea fi amenajat cu dispozitivele și materialele acustice propuse pentru studiu. Raportul lungime / lățime este mare, respectiv 4,20, iar raportul suprafața podelei / înălțime este foarte mare 33,42;
 - Conform standardelor în vigoare au fost stabilite pozițiile pentru surse și pentru microfoane. S-au stabilit două poziții pentru sursă și trei poziții pentru microfoane (receptoare), astfel încât să poată fi studiate mai multe posibilități de amenajare a încăperii;
 - Valoarea medie a timpului de reverberație $T60$ a fost considerată media valorilor obținute la cele șase frecvențe. Valorile măsurate pentru timpul de reverberație s-au încadrat în intervalul $(1,0 \div 1,7) \text{ s}$, pentru încăperea având tavanul amenajat în toate variantele studiate, dar neocupată;

- Față de încăperea cu tavanul neamenajat, amenajarea tavanului încăperii cu dispozitive din OSB așezate vertical pe tavan, realizează o reducere a timpului de reverberație, în medie de peste 17% pentru amplasarea sursei la un capăt al încăperii (S1) și în medie de 20% pentru amplasarea sursei la mijlocul încăperii (S2). Dacă aceleași dispozitive din OSB sunt așezate pe tavan cu unghiuri față de planul transversal al încăperii de 30°, 45° și 60° valoarea timpului de reverberație scade cu 20% (la S1), respectiv cu 25% (la S2). Pentru pozițiile dispozitivelor în plan orizontal la 30° și 45°, timpul de reverberație scade în ambele situații de amplasare a surselor, respectiv cu 19% la sursa S1 și cu 24% la sursa S2. Așezarea în oglindă a dispozitivelor din OSB pe tavanul încăperii la unghiuri de 30° și 45° realizează o reducere a timpului de reverberație cu 23% (la S1) și cu 24% (la S2). La toate variantele prin amplasarea sursei S2 la mijlocul încăperii s-au obținut timpi de reverberație mai mici sau cel mult egali ca în cazul amplasării sursei S1 la un capăt al încăperii;
- În variantele de amenajare a tavanului încăperii cu dispozitive (panouri) din OSB cu pânză de iută pe o parte, reducerea timpului de reverberație este mult mai mare față de folosirea dispozitivelor din OSB simple, respectiv între 27% și 32% (ambele poziții de amplasare a sursei). Și în cazul dispozitivelor din OSB îmbrăcate cu pânză de iută pe o față, la toate variantele la care sursa S2 s-a amplasat la mijlocul încăperii s-au obținut timpi de reverberație mai mici sau cel mult egali ca în cazul amplasării sursei S1 la un capăt al încăperii;
- Îmbrăcarea dispozitivelor din OSB cu pânză de iută pe ambele fețe a dus la reducerea timpului de reverberație și mai mult față de dispozitivele din OSB cu pânză de iută pe o față. Astfel, față de încăperea neamenajată cu dispozitive acustice s-au înregistrat timpi de reverberație mai mici cu 31% până la 35% la sursa S1. În cazul sursei S2, timpii de reverberație au fost mai mici ca în cazul sursei S1, respectiv reducerile s-au încadrat în intervalul 34% până la 37%;
- Montarea pe tavanul încăperii a dispozitivelor din polistiren realizează reducerea timpului de reverberație în mod asemănător cu dispozitivele din OSB, dar reducerile sunt în alte intervale de valori. În cazul amplasării sursei S1, cele mai mari reduceri de 24% s-au realizat la variantele cu tavanul amenajat cu dispozitive din polistiren înclinate la diferite unghiuri. În cazul amplasării sursei S2 la mijlocul încăperii reducerile sunt mai mari, respectiv de până la 30%;
- Dispozitivele (panourile) acustice din polistiren acoperite pe o față cu pânză de iută reduc mai accentuat timpii de reverberație. Pentru amplasarea sursei S1, cea mai mare reducere s-a înregistrat la varianta de tavan cu dispozitive așezate la 45° față de verticală, respectiv de 36%, iar cea mai mică reducere a T_{60} s-a înregistrat la varianta de tavan cu dispozitive în oglindă așezate la unghi de 45° față de axa longitudinală a încăperii. Pentru amplasarea sursei S2, cele mai mari reduceri pentru T_{60} s-au înregistrat la mai multe variante de așezare a dispozitivelor (30° și 45° față de axa verticală și așezate în oglindă la 30° față de axa longitudinală), respectiv de 37%;
- Dispozitivele din polistiren acoperite cu pânză de iută pe două fețe reduc cel mai mult timpii de reverberație. Pentru amplasarea sursei S1, cea mai mare reducere s-a înregistrat la varianta de tavan cu dispozitive așezate la unghi de 45° față de axa verticală, respectiv de 41%, iar cea mai mică reducere a T_{60} s-a înregistrat la varianta de tavan la care dispozitivele au fost așezate la unghi de 45° față de axa longitudinală a încăperii (36%). Pentru amplasarea sursei S2, cea mai mare reducere pentru T_{60} s-a înregistrat la varianta de așezare a dispozitivelor în oglindă pe tavan la unghi de 30° față de axa longitudinală, respectiv de 77%;
- Cele mai mici reduceri ale timpului de reverberație le-au realizat dispozitivele din rigips. La variantele de tavan unde sursa de sunet a avut poziția S1, cea mai mare reducere a fost de 7%. Pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere pentru T_{60} a fost de 6%. Rigipsul este singurul material, din cele studiate, la care s-au obținut timpi de reverberație apropiați de valorile înregistrate la încăperea neamenajată;
- Și în cazul folosirii pânzei de iută pe o parte a dispozitivelor din rigips, reducerea timpului de reverberație a fost mică. La variantele de tavan unde sursa de sunet a avut poziția S1, cea mai mare reducere de 14%, iar pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere a T_{60} a fost de 16%. În ambele cazuri panourile au fost orientate la 45° față de axa verticală a încăperii;

- Folosirea pânzei de iută pe ambele fețe ale dispozitivelor din rigips ameliorează puțin timpii de reverberație dar aceștia se situează tot la valori ridicate (apropiate de cei înregistrați la varianta cu tavanul neamenajat). La variantele de tavan unde sursa de sunet a avut poziția S1, cea mai mare reducere de 19% s-a înregistrat la varianta cu dispozitive înclinate la unghi de 45° față de axa verticală a tavanului. Pentru variantele cu sursa S2, cea mai mare reducere a T60 s-a obținut la aceeași variantă de așezare a dispozitivelor, respectiv 20%;
- Timpul de reverberație mediu, calculat ca medie a timpilor de reverberație măsurați la 500 Hz și la 1.000 Hz. Cele mai mici valori ale timpului de reverberație mediu se încadrează în intervalul 1,27 s obținut la varianta de tavan echipat cu dispozitive din polistiren acoperit pe ambele fețe cu pânză de iută și așezate perpendicular pe tavan și 1,83 s la varianta de tavan echipat cu dispozitive din rigips așezate tot perpendicular pe tavan;
- Aparatura și metoda de cercetare au fost bine folosite, deoarece s-au determinat diferențe mici între timpii de reverberație măsurați, comparativ cu timpii de reverberație calculați (T60c) cu relația lui Sabine, pentru încăperea nepopulată, folosind coeficienții de absorbție măsurați în camera anecoică, respectiv: valorile măsurate la variantele de materiale studiate sunt cuprinse între 1,378 s și 1,62 s, iar valorile calculate sunt cuprinse în intervalul 1,061 s și 1,83 s. Timpul de reverberație admis (T60a) pentru respectiva încăpere populată (T60a = 0,7÷0,9 s) [225, 259];
- Absorbția totală a încăperii s-a calculat pentru toate variantele de dispozitive echipate cu materialele corespunzătoare. Suprafața absorbantă pentru fiecare variantă a fost de 459,25 m², formată din suprafața încăperii 386,8 m², la care se adaugă câte două suprafețe de 36,225 m² fiecare, cu materialele acustice studiate. Absorbția totală a încăperii cu tavanul neamenajat (21,601 m²) are cea mai mică valoare, iar absorbția cea mai mare s-a înregistrat la încăperea echipată cu dispozitive din rigips acoperite cu pânză de iută pe ambele fețe, respectiv 37,273 m²;
- Valorile EDT pe cele șase frecvențe de măsurare și la variantele la care s-au măsurat cei mai mici timpi de reverberație, s-au încadrat în intervalul (0,7÷2,5) s. Față de încăperea cu tavanul neamenajat, unde s-a determinat cea mai mare valoare a parametrului EDTmed (1,97 s), cea mai mică valoare a parametrului EDTmed s-a determinat la varianta de dispozitive din polistiren cu ambele fețe acoperite cu iută, amplasate vertical pe tavan, respectiv 1,4 s. Determinările prin calcul reprezintă valoarea medie a valorilor măsurate la frecvențele de 500 Hz și 1.000 Hz. Celelalte valori medii pentru parametrul acustic EDT se încadrează în acest interval;
- Luminozitatea sunetului reflectă bogăția armonică la frecvențe ridicate a sunetului. Valorile recomandate sunt [230]: $0,87 \leq TR \leq 1$. Cea mai mare valoare a luminozității s-a determinat la varianta de încăpere cu tavanul neamenajat, respectiv 0,76, iar valoarea cea mai mică a luminozității s-a determinat la varianta de tavan echipat cu dispozitive din polistiren îmbrăcat cu pânză de iută pe ambele fețe, amplasate vertical pe tavan, respectiv valoarea de 0,66;
- Pentru toate variantele de amenajare a tavanului valorile clarității în vorbire C50 se încadrează în intervalul (-0,46÷1,70) dB, ceea ce caracterizează toate variantele de tavan că pot asigura o acustică acceptabilă pentru încăpere;
- Valorile medii optime pentru definiția D trebuie să fie [122]: Dmed > 0,5 dB. Definiția are valori bune pentru tavanul amenajat cu dispozitive din OSB și polistiren și valori foarte bune la aceleași variante la care se adaugă o față din pânză de iută sau două fețe din pânză de iută;
- Timpul central se recomandă să varieze în intervalul 72 ms÷144 ms, pentru un T60 cuprins între 1 s și 2 s (sunt valori de referință). În practică Ts se abate de la aceste valori, fiind în legătură cu EDT și T60 [230]. Cu cât Ts este mai mare, cu atât C50 este mai mic [122]. Pentru toate variantele analizate valorile timpului central variază între valorile 79 ms și 118 ms, valori care se încadrează în intervalul admisibil;
- Valorile parametrul %AICons (în %), au fost determinate pentru încăperea având tavanul echipat cu diferite tipuri de dispozitive și materiale acustice. Valorile acestui parametru coroborate cu valorile parametrului RASTI caracterizează variantele de amenajare a tavanului în limitele de inteligibilitate;

- Valorile calculate pentru parametrul *RASTI* indică faptul că la variantele de amplasare a sursei S2 la mijlocul încăperii s-au determinat cele mai bune valori ale inteligibilității, respectiv *acceptabilă spre bună*;

3. **Parametrii acustici extinși la toate materialele încercate în camera anecoică și care ar putea amenaja încăperea studiată** se referă la: timpul de reverberație calculat, care variază în intervalul $(1 \div 1,7)$ s; timpul central *Ts* care are aceeași alura a variației pe variante încadrându-se în intervalul $(75 \div 115)$ ms; claritatea la vorbire *C50* se încadrează între valorile $-0,5$ dB și $2,5$ dB pentru toate variantele; densitatea la vorbire este mai mare ca valoarea minimă admisibilă la toate variantele cu excepția variantei de încăperea cu tavan neamenajat, respectiv mai mari de $0,5$ dB; parametrul *RASTI*, care caracterizează toate variantele ca fiind cu inteligibilitate *acceptabilă* la vorbire;
4. **Parametrii acustici pentru încăperea cu geometria variabilă a tavanului** au fost determinați pentru a putea identifica diferite geometrii ale tavanului, care pot fi variate în timpul zilei și pentru diferite destinații ale încăperii în principal pentru a elimina paralelismul între tavan și pardoseală (cel puțin pentru o pereche de pereți opuși). Acest lucru este posibil folosind dispozitive acustice a căror poziție poate fi modificată și materiale acustice care pot ușor să îmbrace aceste dispozitive acustice. S-au luat în studiu două cazuri de amenajare a tavanului pentru fiecare sursă de sunet. Dispozitivele acustice (panourile) au fost așezate astfel încât să „curbeze” tavanul, într-o singură direcție, în cazul sursei S1 și în două direcții în cazul sursei S2 (tavanul să nu mai fie paralel cu pardoseala). Variația poziției dispozitivelor (panourilor) acustice s-a făcut doar în plan vertical conform variantelor studiate. S-au făcut determinări pentru aceste variante intermediare. De la aceste variante se poate merge la direcționarea dispozitivelor acustice (panourilor) în diferite alte poziții pentru a obține parametri acustici de o anumită valoare, care caracterizează un anumit tip de încăperea. Au fost determinați parametrii acustici: *C50*, *D50*, *Ts*, *%AICons* și *RASTI*. S-au analizat separat două grupe mari de variante. Prima grupă de variante de dispozitive și materiale acustice au fost analizate pentru sursa S1, iar a doua grupă de variante de dispozitive și materiale acustice au fost analizate pentru sursa S2. În ambele variante există multiple posibilități de reglare a dispozitivelor (panourilor) acustice, cu valori ai parametrilor acustici intermediare între valorile obținute la încăperea cu tavan neamenajat și încăperea cu tavanul amenajat cu dispozitive și materiale acustice aflate în pozițiile cele mai favorabile;

D. Concluzii cu privire la caracterul original al lucrării

1. În urma studiilor teoretice cu privire la confortul acustic al încăperilor au fost evidențiate următoarele:
 - identificarea parametrilor acustici care pot caracteriza o încăperea destinată unor activități publice;
 - stabilirea în conformitate cu standardele în vigoare a metodelor de cercetare a structurilor acustice atât din punct de vedere a materialelor acustice, cât și a dispozitivelor acustice;
 - stabilirea echipamentelor și a metodelor de măsurare a parametrilor acustici măsurabili, care caracterizează o încăperea din punct de vedere a confortului acustic;
 - identificarea celor mai eficiente relații pentru determinarea prin calcul a parametrilor acustici care caracterizează o încăperea pentru diferite destinații;
2. Contribuțiile teoretice se referă la analiza fractală a fenomenului de propagare a sunetului într-o încăperea. Analiza fractală ține seama de complexitatea situațiilor care pot apărea în procesul de propagare a sunetului. Să notăm că spațiul închis nu oferă un mediu continuu pentru propagarea undelor acustice. În general acest spațiu este puternic restricționat prin următoarele: materialele din care este realizat/amenajat, mobilat, persoanele fizice prezente în respectivul spațiu închis etc., așa încât întotdeauna acesta poate fi asimilat unui sistem complex acustic. Pentru aceasta s-au realizat următoarele activități și etape:
 - S-a construit un operator fractal de mișcare (operator fractal acustic) cu statut de derivată covariantă (derivată covariantă acustică) (relația 5.24);
 - S-a acceptat un principiu de covarianță (principiul covarianței acustice) care permite verificarea legilor de conservare, în caz particular legea de conservare a impulsului (relația 5.25) (legea

- de conservare a impulsului acustic specific fie generalizat, fie pentru scale de rezoluție) și legea de conservare a densității (relația 5.29) (legea de conservare a densității acustice de stări);
- S-a obținut ecuația de mișcare a unui mediu fractal (relația 5.41), care studiază comportamentul unui mediu fractal elastic sub forma legii fractale de tip Hooke generalizate (relația 5.43) și de aici a legii fractale de tip Hooke unidimensionale (relația 5.52);
 - S-au obținut ecuațiile fractale de propagare pentru mediu fractal elastic (specific) (relațiile 5.62 și 5.63), unde fractale de tip primar (unde fractale de tip longitudinal) și unde fractale de tip secundar (unde fractale de tip transversal). Acestea sunt cele mai generale tipuri de unde fractale, vitezele lor fiind definite cu ajutorul coeficienților fractali de structură ai mediului fractal de propagare (relațiile 5.64 și 5.65);
 - Pentru un caz particular de fractalizare prin procese stohastice de tip Markov sub forma mișcărilor de tip Levy s-au reformulat legile de conservare ale impulsului și densității. Ca aplicație a acestui tip de fractalizare s-a analizat propagarea unei perturbații acustice într-un mediu fractal. De aici, printr-o „scufundare” în spațiu scalelor și reinterpretare a mărimilor care descriu dinamicele, s-a studiat dependența coeficientului de absorbție a unui mediu fractal de propagare de frecvența undei acustice (relațiile 5.122 și 5.123). A rezultat apariția unui mediu în această dependență care depinde de caracteristicile sistemului sursă-mediu, rezultat teoretic verificat prin experiment în capitolul 7;
3. Elaborarea planului de cercetare a avut la bază următoarele obiective propuse pentru a fi realizate:
- Identificarea materialelor de amenajare interioară, ecologice, reciclabile sau tradiționale care pot realiza îmbunătățirea performanțelor acustice;
 - Stabilirea poziției optime a dispozitivelor (panourilor) acustice, care să pună în valoare la maximum proprietățile acustice ale materialelor propuse pentru amenajări;
 - Analiza parametrilor acustici (măsurați și determinați), care dau confortul unei încăperi în funcție de destinația acesteia;
 - Identificarea unor soluții de dispozitive (panouri) acustice și materiale acustice care să poată mări posibilitățile de utilizare a încăperii;
 - Identificarea geometriei optime a tavanului încăperii în funcție de timpul zilei și de percepția receptorilor (ascultătorilor);
4. Pentru cercetările și determinările în camera anecoică s-au realizat următoarele:
- S-au identificat mai multe serii de materiale, care provin din diferite surse, respectiv:
 - Materiale folosite ca suport: plăci din OSB, plăci din polistiren expandat, plăci din rigips;
 - Materialele pentru depunere: naturale (pânza de iută), sintetice (granulele din cauciuc reciclat, plastic reciclat mărunțit, granulele din polipropilenă reciclată), mixte (granulele din făină de lemn, care au un liant sintetic și țesătura de cordele care sunt realizate atât din materiale naturale, cât și din materiale sintetice). Țesătura de cordele este un produs tradițional, realizat din reciclarea unor țesături;
 - Liant ecologic, realizat de o firmă care a colaborat la aceste studii. Liantul ecologic, este biodegradabil în timp, în a cărui compoziție se află rășini acrilice pe bază de apă, materiale de umplutură (carbonat de calciu de diverse granulații), aditivi, îngroșător celulozic. Liantul este produs de S.C. ROMCHIM PROTECT S.A. Bacău, rețetă proprie, care reprezintă o noutate în domeniu;
 - Pregătirea probelor pentru realizarea măsurătorilor în camera anecoică astfel încât valorile obținute în urma măsurătorilor să fie corecte;
5. Pentru obținerea unei structuri acustice sub forma unui model de studiu real, s-au realizat următoarele:
- Alegerea unei încăperi atipice din punct de vedere al dimensiunilor, pentru a se putea modela în realitate mai multe variante de încăpere amenajată cu dispozitive și materiale acustice;
 - Realizarea unor cadre metalice care să poată fi amenajate cu materialele suport formând dispozitive (panouri) acustice;
 - Prinderea de tavan a dispozitivelor (panourilor) acustice printr-o cuplă sferică cu deget care să poată asigura rotirea acestor dispozitive în plan longitudinal și plan orizontal;

- Conceperea unor scheme (variante) experimentale pentru modelarea formei tavanului încăperii și folosirea unor materiale studiate în camera anecoică. S-au ales opt variante reprezentative pentru modelarea tavanului încăperii;
- 6. S-au determinat condițiile de realizare a măsurătorilor, respectând standardele corespunzătoare, s-au realizat 73 de grupe de măsurători astfel încât să fie acoperite toate variantele de tavan obținute prin așezarea panourilor la diferite unghiuri;
- 7. În urma măsurătorilor s-au elaborat tabele cu valori și s-au stabilit corelații sub formă de grafice. S-au analizat rezultatele și o parte au fost prezentate în teză, iar toate datele și corelațiile grafice sunt prezentate în anexele tezei;
- 8. Valorile parametrilor acustici mășurați (*T60* și *EDT*) au fost verificate și comparate cu valorile calculate și valorile recomandate. Deoarece diferențele sunt mici, pe baza *T60* și *EDT* măsurate s-au putut calcula ceilalți parametri acustici care caracterizează o încăpere din punct de vedere al confortului acustic;
- 9. Condițiile necesare pentru ca o încăpere să poată asigura confortul acustic pentru o anumită destinație, pot fi ușor identificate și realizate pe baza rezultatelor obținute și a soluțiilor prezentate;
- 10. Au fost analizate multe modele matematice și au fost alese acele modele matematice care să poată exprima cât mai aproape de realitate dependența între mărimile variabile și parametrii acustici;
- 11. Valorile obținute la măsurarea parametrilor acustici în funcție de modul de așezare a dispozitivelor acustice pe tavanul încăperii au fost utilizate pentru a identifica un model matematic cât mai „real” care să poată fi extins și la alte situații de amenajare sub alte unghiuri cu dispozitive acustice a tavanului încăperii;
- 12. Au fost identificate mai multe relații matematice care descriu dependența timpului de reverberație în funcție de distanța sursă-microfon și de unghiul de așezare a dispozitivelor acustice pe tavanul încăperii;
- 13. Au fost alese modelele matematice care au cei mai mari coeficienți de corelație (mai mari de 0,75 care reprezintă o relație puternică între mărimile variabile);
- 14. La verificarea modelelor matematice valorile erorilor relative s-au încadrat în intervale mici de valori, ceea ce confirmă și coeficienții de corelație mari, respectiv veridicitatea modelului matematic, care îl recomandă pentru rezolvarea și altor situații care pot apărea;

E. Concluzii cu privire la căile de dezvoltare ulterioară a cercetării

Studiile și cercetările pot și trebuie continuate în următoarele direcții:

1. Extinderea posibilităților de utilizare a unei încăperi pentru diferite destinații, cu îndeplinirea unor cerințe de confort acustic diferite de la o destinație la alta;
2. Extinderea măsurătorilor și determinărilor prin calcul și asupra altor grupe de parametri acustici pentru a obține cât mai multe informații și a putea elabora soluții mult mai exacte;
3. Determinarea parametrilor spațiali pentru elaborarea hărților privind acustica încăperilor în spațiu și în volumul încăperii;
4. Extinderea studiului și la alte tipuri de dispozitive acustice ca formă și amplasare care să poată ușor și rapid schimba parametrii acustici în funcție de cerințe specifice;
5. Extinderea studiului și altor materiale, autohtone, tradiționale și mai ales ecologice care să poată fi ușor și rapid amplasate pe dispozitivele acustice.

F. Publication of the research results

1. Articole publicate în reviste cotate ISI:

1. Mirela Panainte, Marius Stănilă, Emilian Moșneguțu, Oana Irimia, Doina Capșa, **Florin Nedeff**, Claudia Tomozei, Ion Joița, Gabriela Telibașa, *Monitoring emissions from large combustion plants*, Environmental Engineering and Management Journal, July 2014, Vol.13, No. 7, pp. 1657-1664, ISSN 1559-1842, IF=1,258;
2. Panainte M., Inglezakis V., Caraman I., Nicolescu M.C., Moșneguțu E., **Nedeff F.**, *The evolution of eco-labeled products in Romania*, Environmental Engineering and Management Journal, 2014, Vol. 13, No. 7, pp. 1665-1671, ISSN 1559-1842, IF=1,258;

3. Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Gigel Paraschiv, Oana Irimia, Greta Ardeleanu, Alina Conțu Petrovici, *Mathematical modelling of sound pressure level attenuation transmitted by an acoustic screen in industrial environment*, Environmental Engineering and Management Journal, July 2014, Vol.13, No. 7, 1743-1749, IF=1,258;
4. Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Alina Petrovici Contu, Oana Tirtoaca Irimia, Marius Stanila, Ioan Joița, Valentin Zichil, *Impacts of outdoor noise on teaching and learning activities*, Environmental Engineering and Management Journal March 2016, Vol. 15, No. 3, pp. 545-552, IF=1,008;
5. Panainte-Lehăduș M., **Nedeff F.**, Petrovici A., Telibașa G., Felegeanu D.-C., Schnakovszky C., *Assessing the health and safety risks in the education sector*, Environmental Engineering and Management Journal, 2016, Vol. 15, No. 3, pp. 563-572, IF=1,008;
6. Alina Mihaela Petrovici, Jose Luis Cueto, Ricardo Gey, **Florin Nedeff**, Ricardo Hernandez, Claudia Tomozei, Emilian Mosnegutu, *Optimization of some alternatives to noise barriers as noise mitigation measures on major roads in Europe. Case study of a highway in Spain*. Environmental Engineering and Management Journal July 2016, Vol.15, No. 7, pp 1617-1628, IF=1,008;
7. **Nedeff Florin**; Lazăr Gabriel, Dumitru Filipeanu, Alexandru Luca Florin, Agop Maricel, *Free perturbations in fractal media*, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Volume 13, Number 11, November 2016, pp. 8534-8543, IF=1,665;
8. V. Zichil, A. Coseru, **F. Nedeff** and C. Tomozei, *Considerations on stress triaxiality variation for 2P armor steel*, Innovative Ideas in Science 2016 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 200 (2017) 012066 doi:10.1088/1757-899X/200/1/012066;
9. Carmen Bujoreanu, **Florin Nedeff**, Marcelin Benchea, Maricel Agop, *Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates*, Applied Acoustics 119 (2017), pp. 88–93, YIF=1,549;
10. Dabija R.C., Zala A., Hnatiuc E., Agop M., Puiu E., Văideanu D., Palamanciuc I., Jimborian G., **Nedeff F.**, Ivan M.V., *Fractality influence on a free Gaussian „perturbation” in the hydrodynamic version of the scale relativity theory. Possible implications in the biostructures dynamics*, U.P.B. Sci. Bull (submitted for publication);
11. **Florin Marian Nedeff**, Narcis Bârsan, Adriana Luminița Fînar, *Studies and research concerning the use of some recyclable absorbent materials for increasing acoustic comfort into a room designed for speaking*, STUDII ȘI CERCETĂRI ȘTIINȚIFICE – Chimie și Inginerie Chemică, Biotehnologii, Industrie Alimentară, Volume 18, No. 3, 2017 (acceptat pentru publicare);

II. Articole publicate în reviste indexate în baze de date internaționale:

1. Claudia Tomozei, **Florin Marian Nedeff**, Mirela Panainte, Oana Irimia, *Solutions to reduce the noise generated by an airconditioning system*, Journal of Engineering Studies and Research, Volume: 19, No. 4, 2013, pp. 71-76, ISSN 2068-7559;
2. Alina Petrovici, Claudia Tomozei, Ricardo Gey Flores, **Florin Nedeff**, Oana Irimia, *Noise prediction, calculation and mapping using specialized software*, Journal of Engineering Studies and Research, vol. 21, No. 3, pp. 59-64, 2015, ISSN 2068-7559;
3. Alina Petrovici, Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Oana Irimia, Mirela Panainte-Lehadus, *Review on the road traffic noise assesment*, Journal of Engineering Studies and Research, Vol. 22, No. 1, 2016, pp 81-89;
4. **Florin Marian Nedeff**, Marcel Agop, Emilian Florin Moșneguțu, Narcis Barsan, *Evaluation of the reverberation time improvement in a speaking hall*, Journal of Engineering Studies and Research, Volume: 22, No. 2, 2016, pp. 49-54;

III. Articole susținute la conferințe și publicate în volumele conferințelor:

Conferințe internaționale în străinătate:

1. **Nedeff Florin Marian**, Tomozei Claudia, Panainte Mirela, Lazăr Gabriel, *Noisemaps for the industrial enclosures*, EE&AE 2013, Engineering and Research for Agriculture Conference, „Angel Kanchev” University of Rousse, Bulgaria, 17-18 May 2013, pp. 299- 306;

2. **Nedeff Florin Marian**, Panainte Mirela, Lazăr Gabriel, Theoretical study regarding the civil environmental impact, EE&AE 2013, Engineering and Research for Agriculture Conference, „Angel Kanchev” University of Rousse, Bulgaria, 17-18 May 2013, pp. 291-298;
3. **Florin Nedeff**, Tomozei Claudia, Gabriel Lazar, Alina Petrovici (Contu), *The influence of enclosure geometry on sound distribution in teaching spaces*, IJAS International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference Series, Malta, 2 – 6 March 2014;

Conferințe internaționale în țară:

4. Alina Petrovici (Contu), Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Mirela Panainte, *General aspects concerning the assessment of the urban road traffic noise*, Second International Conference of Natural and Anthropic Risks (ICNAR), Bacau, Romania, 04-07 June 2014;
5. Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Alina Petrovici (Contu), Mirela Panainte, Oana Irimia, *The exterior noise impact on the activities developed in a teaching environment*, Second International Conference of Natural and Anthropic Risks (ICNAR), Bacau, Romania, 04-07 June 2014;
6. Claudia Tomozei, Alina Petrovici, Mirela Panainte, **Florin Nedeff**, Oana Irimia, *Evaluation of noise level generated by the road traffic on bridges in urban areas*, Constructive and Technological Design Optimization in the Machines Building Field, Conference Proceedings abstracts, Oproteh 2015, 04-06 iunie 2015;
7. Claudia Tomozei, **Florin Nedeff**, Oana Irimia, Mirela Panainte, *Shielding of noise sources using acoustic screen composed*, Constructive and Technological Design Optimization in the Machines Building Field, Conference Proceedings abstracts, Oproteh 2016, 02-04 iunie 2016;

IV. Contracte de cercetare:

1. Contract nr. 13/20.05.2014, *Studii și cercetări privind îmbunătățirea acusticii în săli cu activități didactice, (responsabil/director)*;
2. Contract nr 8/02.11.2016, *Colectare de date de trafic pentru elaborarea Planului de mobilitate urbană durabilă Bacău*, (membru în echipă);

V. Capitole din cărți:

1. Claudia Tomozei, Mirela Panainte, Gabriel Lazăr, **Florin Nedeff**, *Reducerea poluării fonice în mediul industrial, Seria: Procedee și tehnici de protecția mediului*, Ed. Alma Mater Bacău, 2014, 269 pg., ISBN 978-606-527-354-2;

VI. Burse de studii doctorale și stagii de pregătire

1. Mobilitate de plasament prin Programul ERASMUS+ KA1 la *Universidad de Cadiz, Spain – Acoustic Engineering Laboratory, 27 ianuarie - 31 mai 2015*;

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Abăcioaie S.D., Agop M. - Dinamica neliniară și gravitația, Ed. Ars Longa, Iași, 2009.
- [2]. Agop M., Nica P.E., Ioannou P.D., Antici A., Păun V.P. – Fractal model of the atom and some properties of the matter through an extended model of scale relativity. European Physical Journal D -- Atoms, Molecules, Clusters & Optical Physics . Feb2009, Vol. 49 Issue 2, p239-248.
- [3]. Agop M., Jarcău M. - Fractalitate și gravitație, Ed. Ars Longa, Iași, 2006.
- [4]. Agop M., Crăciun P. - Microfractalitatea, macrofractalitatea și gravitație, Ed. Ars Longa, Iași, 2008.
- [5]. Ioana Mihaela Alexe - Contribuții la studiul propagării undelor sonore în aer liber, cu aplicații la mediul urban, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții, București, 2015.
- [6]. Andrescu (Anghel) Luminița-Sanda - Contribuții la studiul propagării și limitării zgomotului în instalații, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2010.
- [7]. Andrea Andrijašević, Bojan Ivančević, Marko Horvat - Evaluation of speech intelligibility in two acoustically different spaces using logatome test and measured impulse responses, Engineering Review, vol.32, Issue 2, 2012, pp. 78-85.
- [8]. Takayuki Arai, Yoshiaki Murakami, Nahoko Hayashi, Nao Hodoshima, Kiyohiro Kurisu - Inverse correlation of intelligibility of speech in reverberation with the amount of overlap-masking, Acoust. Sci. & Tech. 28, 6 (2007), pp. 438-441.
- [9]. G.B. Artken, H.J. Weber - Mathematical Methods for Physicists, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [10]. Asdrubali F., Pispola G. - Studio teoretico-sperimentale delle proprietà acustiche di pannelli fonoassorbenti trasparenti, Associazione Italiana di Acustica 35o, Convegno Nazionale 1-10, 2008.
- [11]. Asdrubali F., Pispola G. - Properties of transparent sound-absorbing panels for use in noise barriers, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 121, No. 1, January, 2007, DOI:10.1121/1.2395916.

- [12]. Glen M. Ballou - Handbook for sound engineers, Elsevier Inc., 2005.
- [13]. Michael Barron - Using the Standard on Objective Measures for Concert Auditoria, ISO 3382, to Give Reliable Result, Acoustic Science and Technology 26, 2005, pp. 162-169.
- [14]. Michael Barron - Auditorium Acoustics and Architectural Design, Second edition, Taylor & Francis e-Library, 2009.
- [15]. Barvinschi F. - Fizică Generală, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2004.
- [16]. Mike Barron - The current status of spatial impression in concert halls, University of Bath, UK, lib.ioa.ac.cn/ScienceDB/18TH-ICA/pdf/Th2.B1.1.pdf.
- [17]. Umberto Berardi - A Double Synthetic Index to Evaluate the Acoustics of Churches, Archives of Acoustics, 2012, vol. 37, no. 4, pp. 521-528.
- [18]. Leo L., Beranek - Acoustics, Acoustical Society of America, 1986.
- [19]. Blauert J., Xiang N. - Acoustics for Engineers, Second edition, Springer, ISBN 978-3-642-03392-6, eISBN 978-3-642-03393-3, 2009.
- [20]. M. Blasco, J. Belis, H. De Bleecker - Acoustic failure analysis of windows in buildings, Engineering Failure Analysis 18 (2011) 1761-1774.
- [21]. Bădărău Eugen, Grumăzescu Mircea - Bazele acusticii moderne, Editura Tehnică, București, 1975.
- [22]. Ingolf Bork - A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin Room Acoustical Computer Simulation, Acta Acustica, Volume 86, Number 6, November/December 2000, pp. 943-956.
- [23]. Ingolf Bork - Simulation and measurement of auditorium acoustics - The Round Robins of Acoustical Simulation, Physikalisch - Technische Bundesanstalt Braunschweig, Proceedings of Institute of Acoustics Vol. 24 Pt 4, 2002.
- [24]. Anuța Borlea (Tiuc), Tiberiu Rusu, Silviu Ionescu, Ovidiu Nemeș - Determinarea proprietăților fonoabsorbante ale unor noi materiale compozite realizate din deșeurii, Revista Română de Materiale 2012, 42(4), pp. 405-414.
- [25]. John S. Bradley - A comparison of three classical concert halls, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 89, Issue 3, March 1991, pp. 1176-1192.
- [26]. J.S. Bradley - Review of objective room acoustics measures and future needs, Applied Acoustics 72 (2011), pp. 713-720.
- [27]. Bransley M. - Fractals Everywhere. Deterministic Fractal Geometry, Boston, 1988.
- [28]. Carmen Bujoreanu, Florin Nedeff, Marcelin Benchea, Maricel Agop Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates, Applied Acoustics 119 (2017), pp. 88-93.
- [29]. Simone Campanini, Angelo Farina - A new audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module, University of Parma, Italy, lac.linuxaudio.org/2009/cdm/Friday/08_Campanini/08.pdf.
- [30]. Joaquín Castillo, Alejandro Costa - Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos, www.profesores.frc.utn.edu.ar/.../fundamentos de acustica y ele.
- [31]. I. Casian-Botez, M. Agop, P. Nica, V. Paun, and G. V. Muncelleanu - Conductive and Convective Types Behaviors at Nano-Time Scales, J. Comput. Theor. Nanosci, 7, 2271-2280 (2010).
- [32]. S. Cerdá, A. Giménez J. Romero, R. Cibrian, J.L. Miralles - Room acoustical parameters: A factor analysis approach, Science Direct, Applied Acoustics 70 (2009), pp. 97-109.
- [33]. Alan Javier Chorubczyk, Florent Masson - Relevamiento y valoración de par metros acústicos sobres dos auditorios argentinos modernos, Primeras Jornades Regionales de Acustica-AdAA 2009, 19 y 20 novembre, Rosario, Argentina.
- [34]. Young-Ji Choi - Effects of periodic type diffusers on classroom acoustics, Applied Acoustics 74 (2013), pp.694-707.
- [35]. J Harvie-Clark, N Dobinson, F Larrieu - USE OF G AND C50 FOR CLASSROOM DESIGN, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 36. Pt.3 2014, apexacoustics.co.uk/wp.../2014_IOA_G-C50_Classrooms.pd.
- [36]. Croker J. - Handbook of noise and vibration control, John Wiley and Sons, Ink. Hoboken, New Jersey, ISBN 978-0-471-39599-7, 2007.
- [37]. Crandall I. B. - Theory of Vibration System and Sound, Van Nostrand, New York, 1926.
- [38]. J. Cresson - Scale relativity theory for one-dimensional non-differentiable manifolds Chaos, Solitons & Fractals 14, 2002, 553.
- [39]. Cresson J. - Emergence of complex and spinor wave functions in scale relativity. I. Nature of scale variables, Journal of Mathematical Physics 44, 2003, 4907.
- [40]. Czerwiński and Z. Dzielciński - Evaluation of Acoustical Properties of an Auditorium after a Modernization Program, Acta Physica Polonica A, vol. 125 (2014), no. 4-A, pp. A-71-A-76.
- [41]. Darabont A., Iorga I., Ciodaru Michaela - Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică, Editura Tehnică, București, 1983.
- [42]. Dima Vasile - Acustica, Editura Universității București, 1994.
- [43]. José Pedro Donoso - Acústica Física, Universidade do São Paulo, Brazil
- [44]. Carl F. Eyring - Reverberation time in „dead” rooms, Journal of Acoustical Society of America, Volume 1, Issue 2A, Januarie 1930, pp. 217-241.
- [45]. Robert Essert - Links between concert hall geometry, objective parameters, and sound quality, London, UK, Acoustical Society of America/DAGA/Forum Acusticum, Berlin, March 1999, Journal Acoust. Soc. Am., 105 (2), pp. 986, academia.edu.
- [46]. Everest F. A., Pohlmann K. C. - Master Handbook of Acoustics, Fifth edition, ISBN 978-0-07-160333-1, 2009.
- [47]. Angelo Farina, Regev Ayalon - Recording Concert Hall Acoustics for Posterity, 24th AES Conference on Multichannel Audio, Banff, Canada, 26-28 June, 2003.
- [48]. Patrizio Faustì, Angelo Farina - Acoustic Measurements in Opera Houses: Comparison between Different Techniques and Equipment, Journal of Sound and Vibration, Vol. 232, No 1, April 2000, pp. 213-229.
- [49]. Fahy F. - Foundations of Engineering Acoustics, Academic Press, London, ISBN 0-12-247665-4, 2005.
- [50]. Mauro Felli - Lezioni di Fisica Tecnica 2, Trasmisione del Calore, Acustica, Tecnica dell'Illuminazione, Morlacchi Editore, 2004, ISBN: 88-89422-18-1.
- [51]. Feynman R.P., Leighton R., Snads M. - The Feynman Lectures on Physics, Addison-Wesley, 1964.
- [52]. Feynman R.P. - The Reason for Antiparticles: The 1986 Dirac Memorial Lecture, Slone J.,E., Cambridge, 1986.
- [53]. Feder J., Aharony A. (Eds) - Fractals in Physics, North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [54]. Feuerbacher M. - The resonance frequency of a membrane absorber, 2005 (<http://dogbreath.de/misc/PlaneAbsorberResonance.pdf>).
- [55]. Lelia Feștilă, Emil Simion, Costin Miron - Amplificatoare audio și sisteme muzicale, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 2009.
- [56]. Angelo Farina - Acoustic Quality of Theatres: Correlations between Experimental Measures and Subjective Evaluations, Applied Acoustics, Volume 62, Issue 8, August 2001, pp. 889-916.

- [57]. Kenji Fujii, Takuya Hotehama, Kosuke Kato, Ryota Shimokura, Yosuke Okamoto, Yukio Suzumura, Yoichi Ando - Spatial Distribution of Acoustical Parameters in Concert Halls: Comparison of Different Scattered Reflections, *Journal of Temporal Design in Architecture and Environment* (2004), vol. 4, No. 1, pp. 59-68.
- [58]. Gaftănu Mihai, Crețu Spiridon, Drăgan Barbu - Diagnosticarea vibraoustică a mașinilor și utilajelor, Editura Tehnică, București, 1989.
- [59]. M. Garcia-Valles, G. Avila, S. Martinez, R. Terradas, J.M. Nogués - Acoustic barriers obtained from industrial wastes, *Chemosphere* 72 (2008) 1098–1102.
- [60]. William Grant Gardner - The Virtual Acoustic Room. Master's Thesis Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [61]. Alina Gabor - Fizică II, Curs, Universitatea Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca.
- [62]. Galindo Miquel, Zamarréno Teófilo, Girón Sala - Measured acoustic parameters versus predicted ones in two mudejar-gothic churches, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo>.
- [63]. N. D. Gaubitch1, H. W. Lollmann, M. Jeub, T. H. Falk, P. A. Naylor1, P. Vary2, M. Brookes - Performance comparison of algorithms for blind reverberation time estimation from speech, International Workshop on Acoustic Signal Enhancement 2012, 4-6 September 2012, Aachen, www.iks.rwth-aachen.de/fileadmin/.../gaubitch12.pdf.
- [64]. Mauricio Andrés González Güell, José Luis Barros Rojas - Estudio teórico-experimental de paneles absorbentes microperforados, *validia* - Chile, 2010, estudio teórico-experimental de paneles absorbentes microperforados cyberthesis.uach.cl/tesis/uach/2010/.../doc/bmficg6431e.pdf
- [65]. Rocio Andrés Gómez - Estudio de la calidad acústica del aula master del edificio 1c de la Etsie, Valencia Marzo 2012. estudio de la calidad acústica del aula master del edificio 1c de la Etsie <https://riunet.upv.es/bitstream/.../Trabajo%20PFG.pdf?..1>.
- [66]. Elizabeth Godoya, Maria Koutsogiannika și Yannis Stylianou - Approaching speech intelligibility enhancement with inspiration from Lombard and Clear speaking styles, *Computer Speech and Language* 28 (2014) 629–647.
- [67]. Adrian Gogu, Marina Topa - Implementation Aspects of Jots Reverberator. Electrical Engineering Research Report, 2000.
- [68]. Gouyet J.F. - *Physique et Structures Fractals*, Masson, Paris, 1992.
- [69]. Grumăzescu M., Stan A., Wegener N., Marinescu V. - *Combaterea zgomotului și vibrațiilor*, Ed. Tehnică, București, 1964.
- [70]. David Graham and Nicholas Midgley - Triangular diagram plotting spreadsheet (TRI-PLOT), www.staff.lboro.ac.uk/~gydjg2/downloads/tri-plot_v1-4-2.xls.
- [71]. Guyer J. P., P. E., R. A. - Fellow ASCE, Fellow AEI, Introduction to Building Acoustics and Noise Control, Course No. M04-019, 2009.
- [72]. Annu Haapakangas, Valtteri Hongisto, Jukka Hyönä, Joonas Kokko, Jukka Keränen - Effects of unattended speech on performance and subjective distraction: The role of acoustic design in open-plan offices, *Applied Acoustics* 86 (2014) 1–16.
- [73]. C.C.J.M. Hak, R.H.C. Wenmaekers - The Impact of Sound Control Room Acoustics on the Perceived Acoustics of a Diffuse Field Recording, *Wseas Transactions on Signal Processing*, Issue 4, volume 6, October 2010, ISSN: 1790-5052.
- [74]. C.C.J.M. Hak, R.H.C. Wenmaekers - The Effect of Room Acoustics on the Perceived Acoustics of Reproduced Sound, 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 26-29 October, 2008, Shanghai, China, www.acoustics-engineering.com/.../PERCEIVED%20ACOU.
- [75]. Takayuki Hidaka, Leo L. Beranek - Objective and Subjective Evaluations of Twenty-Three Opera Houses in Europe, Japan and the Americas, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 107, Issue 1, January 2000, pp.368-383.
- [76]. Nicolas Holzem - Implementing reverberation algorithms in Matlab, finalwork. Universidad de Zaragoza, Centro Politécnico Superior, Dpto. Ing. Electrónica y Comunicaciones, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, Service Electricité Générale, 1999.
- [77]. Ingard U. - *Noise Reduction Analysis*, Jones & Bartlett Publishers, 2010, ISBN-13: 978-1934015315.
- [78]. Iordache Vlad - *Protecție la zgomot. Acustica clădirilor și a instalațiilor*, Editura MatrixRom, București, 2007.
- [79]. Antoni Carrion Isbert - *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Ediciones UPC, 1998, ISBN: 84-8301-252-9.
- [80]. Ana Maria Jaramillo Jaramillo - *Acústica: La ciencia del sonido*, la Edición: septiembre de 2007, ISBN: 978-958-98314-6-5.
- [81]. Francisco José Jimenez-Espadafor, José A. Becerra Villanueva, Miguel Torres García, Elisa Carvajal Trujillo, Antonio Muñoz Blanco - Optimal design of acoustic material from tire luff, *Materials and Design* 32 (2011) 3608–3616.
- [82]. Adrián Sánchez Jiménez - *Medita de características acústicas de la Sala 3 de Kinepolis Madrid*, oa.upm.es/33037/1/TFG.
- [83]. Peng Jianxin, Bei Chengxun - Prediction of Chinese speech intelligibility using usefulto detrimental sound ratios based on auralization, *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*, ISRA 2010, 29-31 August 2010, Melbourne, Australia.
- [84]. Jung S. S., Kim Y. T., Lee D. H., Kim H. C., Cho S. I., Lee J. K. - Sound Absorption of Micro-Perforated Panel, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 50, No.4, 2007, pp. 1044-1051.
- [85]. M. Kahrs, K. Brandenburg - *Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics*, Kluwer Academic Publishers 1998.
- [86]. Brian FG Katz - *International Room Robin on Room Acoustical Impulse Response Analysis Software 2004*, *Applied Research Letters Online* 5(4), Octombrie 2004, pp. 158-164.
- [87]. Heinrich Kuttruff - *Roomacoustics*, Spon Press, London, UK, 2009.
- [88]. Maria A. Kuczmarski, James C. Johnston - Acoustic Absorption in Porous Materials - NASA Technical Reports NASA/TM—2011 - 216995... <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/...nasa.../20110011143.pdf>.
- [89]. K. Leo - Influence of Modulation Detection Thresholdon Speech Intelligibility, *Acta Physica Polonica A*, vol. 119 (2011), no. 6-A, pp. 1023-1026.
- [90]. Lévy P. - *Processus Stochastiques et Mouvement Brownien*, Paris: Gauthier-Villars, 1965.
- [91]. Fang-Ming Lin, Pei-Yu Hong, Chia-Yen Lee - An experimental investigation into the sound-scattering performance of wooden diffusers with different structures, *Applied Acoustics* 71 (2010) 68–78.
- [92]. Cătălin Vasile Lumei, Mariana Arghir - Absorbția sonoră a materialelor din aşchii de lemn cimentate, A XII-a Conferință Națională cu participare internațională „Profesorul Dorin Pavel”, Sebeș, 2012.
- [93]. Aurelian Lăzăroiu, Cătălin Lăzăroiu - *Efecte sonore-Reverberatoare analogice și digitale*, Editura Teora, 2000.
- [94]. Claudia Manuela Lăzărescu (Tomozoi) - Studii și cercetări privind posibilitățile de reducere a poluării fonice din instalațiile industriale, Teză de doctorat, Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău, 2011.
- [95]. Emil Marian - *Montaje electroacustice HI-FI*, Editura Tehnică, 1997.

- [96]. Donato Masci - Parametri fisici dell'acustica ambientale, Tesi di laurea in fisica di primo livello, Università degli studi di Firenze, Italia, 2007-2008.
- [97]. Marcio A. Gomes, Samir N.Y. Gerges - Modelling of room acoustic parameters using mls technique and numerical simulatio, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001, pp. 1291-1296.
- [98]. Francesco Martellotta - Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches, Science Direct, Journal of Sound and Vibration 317 (2008), pp. 378-399.
- [99]. Russell Mason, Tim Brookes, Francis Rumsey - Development of the Interaural Cross-Correlation Coefficient Into a More Complete Auditory Width Prediction Model, Institute of Sound Recording, University of Surrey, UK, <https://pdfs.semanticscholar.org/.../850a8e6d5be7dc479b89>.
- [100]. Mandelbrot B. - Les Objets Fractals, Flammarion, Paris, 1975.
- [101]. Mandelbrot B. - The Fractal Geometry of Nature, Freeman, San Francisco, 1982.
- [102]. Mandelbrot B. - Multifractals and 1/f Noise, Springer, 1999.
- [103]. Viviane S.G. Melo, Roberto A. Tenenbaum, Ricardo E. Musafir - Intelligibility assessment in elementary school classrooms from binaural room impulse responses measured with a childlike dummy head, Applied Acoustics 74 (2013) 1436–1447.
- [104]. Le Mehante A. - Les Geometries Fractales, Hermes, Paris 1990.
- [105]. M. Mitchell - Complexity: A Guided Tour, Oxford University Press, Oxford, 2009.
- [106]. Mihăileanu D., Agop M. - Neliniaritate in sisteme fizice complexe, Ars Longa, Iași, 2015.
- [107]. James A. Moorer - About this Reverberation Business, Computer Music Journal, Volume 3, No. 2 June, 1979, pp. 13-28.
- [108]. Mrtinez A., Castro E., Prior J., Martinez-Conesa E.J. - Evaluación de la calidad acústica de un aula problemática en la Universidad Politécnica de Cartagena, Anuario de Jóvenes Investigadores, vol. 9 (2016), pp. 10-13.
- [109]. Nedeff Florin Marian, Tomozei Claudia, Panainte Mirela, Lazăr Gabriel - Noise maps for the industrial enclosures, EE&AE 2013, Engineering and Research for Agriculture Conference, „Angel Kanchev” University of Rousse, Bulgaria, 17-18 May 2013, p. 299- 306.
- [110]. Nedeff Florin Marian, Panainte Mirela, Lazăr Gabriel - Theoretical study regarding the civil environmental impact,EE&AE 2013, Engineering and Research for Agriculture Conference, „Angel Kanchev” University of Rousse, Bulgaria, 17-18 May 2013, p. 291-298.
- [111]. Nedeff Florin, Lazăr Gabriel, Dumitru Filipeanu, Alexandru Luca Florin, Agop Maricel - Free perturbations in fractal media, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Volume 13, Number 11, November 2016, pp. 8534-8543.
- [112]. Florin Nedeff, Tomozei Claudia, Gabriel Lazar, Alina Petrovici (Contu)-The influence of enclosure geometry on sound distribution in teaching spaces, IJAS International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference Series, Malta, 2 – 6 march 2014.
- [113]. Florin Marian Nedeff, Marcel Agop, Emilian Florin Moşneguţu, Narcis Barsan - Evaluation of the reverberation time improvement in a speaking hall, Journal of Engineering Studies and Research, Volume: 22, no 2, 2016, pp. 49-54.
- [114]. Ning Han, Cheuk Ming Mak - Improving speech intelligibility in classrooms through the mirror image model, Applied Acoustics 69 (2008) 945–950.
- [115]. Nocke C., Hilge C., Scherrer J. M. - Micro-perforated sound absorbers in stretched materials, paper no. 92, Proceedings of ACOUSTICS, Australia, 2011, pp. 1-5.
- [116]. Nottale L. - Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity, Singapore: World Scientific, 1993.
- [117]. Nottale L. - Scale Relativity and Fractal Space-Time – A new Approach to Unifying Relativity and Quantum Mechanics, London: Imperial College Press, 2011.
- [118]. Oldfield R. - Improved membrane absorbers, Research Institute for the Built and Human Environment, Acoustics Department, University of Sanford, UK, 2006.
- [119]. Flaviu Oros - Acustica încăperilor, JF Studio Design SRL, 2011, www.jfstudiodesign.ro.
- [120]. Rita D' Ostuni, Anastasia Porcu - Acustica: La qalıt del suono, 2014, www.ramsete.com/
- [121]. Artur José Alves Patrão - Caracterização acústica de salas de ensaio – Estudo de casos, Dissertação, Universidade do Porto, Portugal, 2010.
- [122]. Diego Fernando Hidalgo Patiño - Medición y análisis de parámetros acústicos en diez salas de concierto y teatros de Bogota, Primeras Jornadas Regionales de Acustica-AdAA 2009, 19 y 20 novembre, Rosario, Argentina.
- [123]. Mirela Panainte, Marius Stănilă, Emilian Moşneguţu, Oana Irimia, Doina Capşa, Florin Nedeff, Claudia Tomozei, Ion Joiţa, Gabriela Telibaşa - Monitoring emissions from large combustion plants, Environmental Engineering and Management Journal, July 2014, Vol.13, No. 7, p. 1657-1663, ISSN 1559-1842,IF=1.258.
- [124]. Timo Peltonen, - A Multichannel Measurement System for Room Acoustic Analysis, master's thesis, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, October, 2000.
- [125]. Alina Petrovici, Claudia Tomozei, Ricardo Gey Flores, Florin Nedeff, Oana Irimia - Noise prediction, calculation and mapping using specialized software, Journal of Engineering Studies and Research, vol. 21, no. 3, p. 59-64, 2015, ISSN 2068-7559.
- [126]. Alina Petrovici (Contu), Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Mirela Panainte – General aspects concerning the assessment of the urban road traffic noise, Second International Conference of Natural and Anthropic Risks (ICNAR), Bacau, Romania, 04-07 June 2014.
- [127]. J. Ramis, J. Alba,J.M. Bravo, J.Redondo - Absorption for the Control of Reverberation by Using Perforated Gypsum and Wood Boards, www.icacommission.org/Proceedings/.../4_02.pdf.
- [128]. Rienstra S. W., Hirschberg A. - An Introduction to Acoustics, Eindhoven University of Technology, 2013.
- [129]. Rossing T. D. - Springer Handbook of Acoustics, Springer Science + Business Media, New York, ISBN 978-0-387-30446-5, 2007.
- [130]. Piercarlo Romagnoni - Fisica Tecnica e Controllo Ambientale, Elementi di acustica 09, www.iiuv.it/.
- [131]. Philip W. Robinson, Ning Xiang, Jonas Braasch - Investigations of architectural configurations and acoustic parameters for multiple sources, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010, 23-27 August, Sydney, Australia.
- [132]. Ribeiro Maria Rosa - Room acoustic quality of a multipurpose hall: a case study PACS: SS-RBA- 02, Centro de Estudos do Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, www.sea-acustica.es/fileadmin/.../Sevilla02_rba02013.pdf.

- [133]. René Alejandro Quirós Rodríguez - Estudio de pantallas acústicas elaboradas a partir de green composites, Tesis de master, Gandia, 2013, Estudio de pantallas acústicas elaboradas a partir de green - RiuNet <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/.../memoria.pdf>.
- [134]. Ruiz Delgado Ligia - Representación gráfica de la Primera Reflexión en espacios destinados a la palabra, <https://upcommons.upc.edu/bitstream/>.
- [135]. James J. Sargianis, Hyung-Ick Kim, Erik Andres, Jonghwan Suhr - Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites, *Composite Structures* 96 (2013) 538–544.
- [136]. Jonathan Infante Salamanca, Edgar Dario Proaño Navas - Diseño y construcción de un panel absorbente con materiales de residuo sólido, Bogotá D.C. 5. Fecha: Junio de 2012. RAE 1. Tipo de documento: Trabajo de grado para optar por el ...biblioteca.usbbog.edu.co:8080/.../69020.pdf.
- [137]. J. Salencon - Handbook of Continuum Mechanics. General Concepts, Thermoelasticity, Springer Science & Business Media, New York, 2001.
- [138]. Selamet A., Xu M. B., Lee I. J., Huff N. T. - Helmholtz resonator lined with absorbing material, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(2), 2005, ISSN 0001-4966, pp. 725-733.
- [139]. Serway R. A., Jewett J. W. - *Physics for Scientist and Engineers*, 8th Edition, Brooks/Cole Publishing CO., 2010.
- [140]. Fereshteh Shahani, Parham Soltani, Mohammad Zarrebini - The Analysis of Acoustic Characteristics and Sound Absorption Coefficient of Needle Punched Nonwoven Fabrics, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Volume 9, Issue 2 – 2014, <http://www.jeffjournal.org>.
- [141]. Shinichi Sakamoto, Hiroshi Ngatomo, Ayumi Ushiyama, Hideki Tachibana - Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by the finite-difference time-domain method, *Acoustic Science and Technology*, vol. 29 (2008), No. 4, pp. 256-265.
- [142]. Magne Skålevik - Reverberation Time – The Mother of All Room Acoustic Parameters, Proceedings of 20th on Acoustics, International Congress ICA 2010, 23-27 August 2010, Sydney, Australia.
- [143]. J. O. Smith III - Physical Audio Signal Processing: Digital Waveguide Modeling of Musical Instruments and Audio Effects, Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Department of Music, Stanford University, Stanford, California 94305, USA, August 2004, <http://www-corma.stanford.edu/~jos/waveguide/>.
- [144]. Márcio Henrique de Sousa Carboni - Qualidade acústica em salas de ensino de música, Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Brazil, 2012.
- [145]. Marta Abad Sorbet - Estudio acústico y electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás (Madrid), 2013, oa.upm.es/21507/1/.
- [146]. Gilbert A. Soulodre - New Objective Measures of Listener Envelopment, Ottawa, Canada, <http://lib.iaoc.ac.cn/ScienceDB/18TH-ICA/pdf/Th2.B1.5.pdf>.
- [147]. Dumitru Stanomir, Laurențiu Tincu – Acustică aplicată, Editura Tincu și Stanomir, 1999.
- [148]. Gianina Ileana Stan - Cercetări privind optimizarea panourilor compozite fonoabsorbante și rezistente la șoc utilizate la protecția habitatului limitrof autostrăzilor, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania Brașov, 2011.
- [149]. Stremțan Florina-Anca - Cercetări privind modelarea, simularea și dezvoltarea structurilor acustice, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2013.
- [150]. Suciu Vasile - Expunerea la zgomot în construcții, Simpozion tehnico-științific „Reducți expunerea la zgomot”, Oradea, 18-20 octombrie 2005.
- [151]. Sundberg J. - The Acoustics of The Singing Voice, *Scientific American*, 1977.
- [152]. Florina Szabo - Proiectarea acustică a sălilor - Academia.edu, www.academia.edu/9646421/proiectarea_acustica_a_salilor
- [153]. Takahashi Y., Otsuru T., Tomiku R. - In situ measurements of absorption characteristics using two microphones and environmental „anonymous” noise, *Acoust. Sci. & Tech.* 24, 6, 2003.
- [154]. Takahashi D. - A New Method for Predicting the Sound Absorption of Perforated Absorber Systems, *Applied Acoustics*, Vol. 51, No. 1, ISSN 0003-682X, 1997, pp. 71-84.
- [155]. Tayong R. D. - On the variations of acoustic absorption peak with flow velocity in Micro-Perforated Panels at high level of excitation, *Journal Acoustic, Soc. Am.*, ISSN 0001-4966, 2010, pp. 2875-2882.
- [156]. Martin Tarragona - Estimación de parámetros acústicos de salas para audición música, iee.fing.edu.uy/.
- [157]. Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos – Épületek akusztika I modellezése reverberátorok felhasználásával – Modelling the acoustics of buildings using reverberators, *Műszaki Szemle–Technical Review*, ISSN1454-0746, 35/2006, pp. 37-48, 2006.
- [158]. Norbert Toma, Marina Dana Țopa, - Analiza fenomenului de reverberație, Școala Sătmăreană, ISSN1584-0662, Anul IV, Nr. 8, Septembrie, 2007, pp. 116-123.
- [159]. Norbert Toma, Marina Dana Țopa, Victor Popescu, Erwin Szopos - Comparative Performance Analysis of Artificial Reverberation Algorithms, Proceeding of the 2006 IEEE-TTTC International Conference on Automation Quality and Testing, Robotics AQTR, ISBN 1-4244-0360-X, May 25-28, 2006, Cluj-Napoca, România, pp. 138-142.
- [160]. Norbert Toma, Marina Țopa - Modelarea și optimizarea acusticii încăperilor, Volumul Simpozionului național „Edmond Nicolau”, ISBN 978-973-53-0017-3, Vol. I, 2009, pp.153-156.
- [161]. Norbert Toma, Marina Țopa - Reverberatoare timpurii, Școala Sătmăreană, ISSN 1584-0662, Anul V, Nr. 10, Noiembrie 2008, pp 147-152.
- [162]. Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos - Reverberation Algorithms, *Acta Tehnica Napocensis*, ISSN 1221-6542, Volume 46, No. 2, 2005, pp. 27-34.
- [163]. Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos - Aspects of Reverberation Algorithms, Proceedings of the International Symposium on Signals, Circuits And Systems ISSCS 2005, ISBN 0-7803-9029-6, 14-15 July 2005, Iasi, Romania, pp. 577-580.
- [164]. Norbert Toma, Marina Dana Țopa, Erwin Szopos - Design and Performance Analysis of Reverberation Algorithms, *Acta Technica Napocensis*, ISSN 1221-6542, Volume 48, no. 1, 2007, pp. 35-43.
- [165]. Toma-Ghica Alina - Contribuții la reducerea zgomotului prin conducte utilizând rezonatori acustici, Teză de doctorat, Universitatea Politehnică București, 2016.
- [166]. Claudia Tomozei, Florin Nedefi, Gigel Paraschiv, Oana Irimia, Greta Ardeleanu, Alina Conțu Petrovici - Mathematical modelling of sound pressure level attenuation transmitted by an acoustic screen in industrial environment, *Environmental Engineering and Management Journal*, July 2014, Vol.13, No. 7, 1743-1749, IF=1,258.

- [167]. Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Alina Petrovici Contu, Oana Tirtocia Irimia, Marius Stanila, Ioan Joița, Valentin Zichil - Impacts of outdoor noise on teaching and learning activities, *Environmental Engineering and Management Journal* March 2016, Vol. 15, No. 3, p. 545-551, IF=1.008.
- [168]. Claudia Tomozei, Florin Marian Nedeff, Mirela Panainte, Oana Irimia - Solutions to reduce the noise generated by an air conditioning system, *Journal of Engineering Studies and Research*, Volume: 19, no 4, 2013, p. 71-76, 2068-7559.
- [169]. Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Alina Petrovici (Contu), Mirela Panainte, Oana Irimia - The exterior noise impact on the activities developed in a teaching environment, *Second International Conference of Natural and Anthropic Risks (ICNAR)*, Bacau, Romania, 04-07 June 2014.
- [170]. Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Oana Irimia, Mirela Panainte - Shielding of noise sources using acoustic screen composed, *Constructive and Technological Design Optimization in the machines Building Field*, Conference Proceedings abstracts, Oprotech 2016, 02-04 iunie 2016.
- [171]. Claudia Tomozei, Alina Petrovici, Mirela Panainte, Florin Nedeff, Oana Irimia - Evaluation of noise level generated by the road traffic on bridges in urban areas, *Constructive and Technological Design Optimization in the machines Building Field*, Conference Proceedings abstracts, Oprotech 2015, 04-06 iunie 2015.
- [172]. Claudia Tomozei, Mirela Panainte, Gabriel Lazăr, Florin Nedeff - Reducerea poluării fonice în mediul industrial, *Seria: Procedee și tehnici de protecția mediului*, Ed. Alma Mater Bacău, 2014, 269 pg., ISBN 978-606-527-354-2.
- [173]. Norbert Ștefan Toma - Contribuții la evaluarea și modelarea acusticii încăperilor, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, 2011.
- [174]. Alexandros Tsilifidis, Iosif Mporas, John Mourjopoulos, Nikos Fakotakis - Automatic speech recognition performance in different room acoustic environments with and without reverberation preprocessing, *Computer Speech and Language* 27 (2013), pp. 380-395.
- [175]. Marina Dana Țopa, Norbert Toma, Erwin Szopos - Performance Analysis of Some Artificial Reverberators, *Proceedings of the 6th IEEE International Conference Communications 2006*, ISBN (10) 973-718-479-3, ISBN (13) 978-973-718-479-5, June 8-10, 2006, Bucharest, Romania, pp. 73-76.
- [176]. Marina Dana Țopa, Norbert Toma, Botond Sandor Kirei, Ioana Crișan - Evaluatio of Acoustic Parameters in a Room, *SIP,10, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Signal Processing*, ISBN: 978-954-92600-4-5, Catania, Sicily, Italy, May 29-31, 2010, pp.41-44.
- [177]. Marina Țopa, Norbert Toma, Erwin Szopos - Efficient Reverberation Algorithms, *Cel de al XXXV-lea Simpozion de Comunicări Științifice al Agenției de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare*, ISBN 973-0-03501-6, May 27-28, 2004, Bucharest, Romania, on CD.
- [178]. Marina Dana Topa - Modelarea 2,5D a propagării sunetului în încăperi și îmbunătățirea proprietăților acustice ale unei încăperi folosind implementări digitale, *Contract de cercetare CNCIS: ID_1057, 2007*.
- [179]. Riitta Väänänen - Efficient Modelling and Simulation of Room Reverberation, *Master.s Thesis*, 1997.
- [180]. Wang, C. and J. Torng - Experimental study of the absorption characteristic of some porous fibrous materials, *Applied Acoustic*, 62: 447-459, 2001.
- [181]. Wang L. K., Pereira N. C., Hung Y. T. - Handbook of environmental Engineering – Advanced Air and Noise Pollution Control, Vol. 2, Humana Press Inc., ISBN 1-58829-359-9 (alk. paper), e ISBN 1-59259-779-3 New Jersey, 2005.
- [182]. Lily M. Wang, Michelle C. Vigeant - Evaluatio of output from room acoustic computer modeling and auralizatio due to different sound source directionalities, *Science Direct, Applied Acoustics* 69 (2008), pp. 1281-1293.
- [183]. G.J. Zeilstra - Speech Intelligibility in Classrooms. A new measurement method, 2009, www.tnw.tudelft.nl/~Gerben_Zeilstra_20090827.pdf
- [184]. Zuercher J. C., Carlson E. V., Killion M. C. - Small acoustic tubes: New approximations including isothermal and viscous effects, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 83, No. 4, ISSN 0001-4966, 1988, pp. 1653-1660.
- [185]. Jun-Oh Yeon, Kyoung-Woo Kim, Kwan-Seop Yang, Jea-Min Kim, Myung-Jun Kim - Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper, *Construction and Building Materials* 70 (2014) 494–500.
- [186]. Yoichi Ando - *Architectural Acoustics*, Springer-Verlog, New York, 1998.
- [187]. ***, *Acustica Construcțiilor*, curs, Facultatea de Arhitectură "G.M. Cantacuzino", Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.
- [188]. ***, <http://www.isover.ro/confort-acustic/acustica-ncaperilor-216.html>.
- [189]. ***, Prospecte, carte tehnică: Sonometru Quest 210.
- [190]. ***, Prospecte, carte tehnică: Stații portabile de monitorizare – Sinus NoiseLOG – mobil.
- [191]. ***, Prospecte, carte tehnică: Analizor portabil zgomot cu modul intern de înregistrare cu două canale – Sinus Soundbook.
- [192]. ***, http://www.casellameasurement.com/downloads/datasheets/ds12_Portable_Monitoring_Stations.pdf.
- [193]. ***, <http://www.bksv.ro/produse/Sound%20Source%204295%20&%204292-L.pdf>.
- [194]. ***, Manual de utilizare: Lima - Software de hărți de zgomot și calcul al zgomotului ambiental - tip 7812 A/B/C.
- [195]. ***, Manual de utilizare: Softwar-ul Acoustic Determinator tip 7816.
- [196]. ***, Manual de utilizare: soft Cadna de predicție a nivelului de zgomot ambiental.
- [197]. ***, <http://www.clubafaceri.ro/24563/polistiren-expandat-pentru-fatade-78780.html>.
- [198]. ***, <http://www.deconstruct.ro/osb/>.
- [199]. ***, http://www.egger.com/RO_ro/products/?N=4294965032+21&R=product-368-ro-ro.
- [200]. ***, <http://www.companieconstructii.ro/produs.php?id=105>.
- [201]. ***, <http://www.opitec-hobbyfix.ro/index.php?tm=514068>.
- [202]. ***, <http://www.perpetuum.ro/acoperisuri/placa-ondulata-bituminoasa-cid86-pid193.html>.
- [203]. ***, SR EN ISO 3382-1:2009, Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 1: Săli de spectacole.
- [204]. ***, SR EN ISO 3382-2:2008, Acustică. Măsurarea parametrilor acustici ai încăperilor. Partea 2: Durata de reverberație a încăperilor obișnuite.
- [205]. ***, <http://www.DEXONLINE.ro>.
- [206]. ***, <http://www.scritub.com/biologie/biofizică.Constanta.Ganea>.
- [207]. ***, <http://www.ro.math.wiki.com/wiki/Acustică>.
- [208]. ***, <http://www.manualdefizica.ro/wp-content-UNDE.MECANICE>.
- [209]. ***, <http://www.msl.utcluj.ro/down/Fizică>.

- [210]. ***, http://www.rasfoiese.com/educatie/fizica/UNDE_ACUSTICE_FENOMENE_SONORE.
- [211]. ***, <http://www.phys.utcluj.ro/PersonalFile/Cursuri>.
- [212]. ***, http://www.spatiuconstruit.ro/.../amf_617.
- [213]. ***, SR EN ISO 3747/2009, Acustica. Determinarea nivelurilor de putere acustică emise de sursele de zgomot utilizând presiunea acustică.
- [214]. ***, http://www.academia.edu/9646421ROIECTAREA_ACUSTICĂ_A_SĂLILOR
- [215]. ***, <http://www.utgjiu.ro/revista/ing>.
- [216]. ***, <http://www.uac.incd.ro/>
- [217]. ***, http://www.instal.utcb.ro/conferinta_2010.
- [218]. ***, Normativ privind protecția la zgomot, UAUIM București.
- [219]. ***, <http://www.creaza.com/sunete-sireceptoare-de-sunete>.
- [220]. ***, Specificație tehnică privind cerințele tehnice specifice pentru echiparea căilor de trafic rutier cu dispozitive de reducere a zgomotului, Contract 524/2012, ICECOM S.A.
- [221]. ***, http://www.newton.phys.uaic.ro/Reflexia_și_absorbția_undelor_sonore. Determinarea coeficienților de reflexie și absorbție.
- [222]. ***, Normativ privind protecția la zgomot, Universitatea de Arhitectură și Urbanism „Ion Mincu”, București.
- [223]. ***, H.G. 674/2007 pentru modificarea și completarea H.G. 321/2005 privind evaluarea și gestionarea zgomotului ambiental.
- [224]. ***, http://www.spectra.it/RT60/Metodi_per_la_misura_del_tempo_di_riverberazione/ARMANI_Alberto/2009.
- [225]. ***, http://www.architettura.unige.it/did/complementi_di_acustica_architettonica_Davide_Foppiano.
- [226]. ***, <http://www.architettura.unina2.it/>
- [227]. ***, <http://www.ingineriacusticafacil.com/ingineria-acustica-5-parametros>.
- [228]. ***, es.slideshare.net/raqsound/parametros-acusticos.
- [229]. ***, Generalidades de los Par metros acústicos, unad.dataata.unad.edu.co/
- [230]. ***, Capítulo2: Diseño acústicos de salas/bibing.us.es/Proyecto.
- [231]. ***, http://crrma.stanford.edu/Subjective_and_objective_room_acoustic_parameter.
- [232]. ***, www.umiacs.umd.edu/Room_acoustics_CMSC_828D/Spring_2006.
- [233]. ***, Smart 7 Impulse Response Measurement and Analysis Guide, <https://www.rationalacoustics.com/.../Smaart-v7-IR-Guide.pdf>.
- [234]. ***, Springer Handbook of Acoustics, Chapter 9. Acoustics in Halls for Speech and Music, <https://crrma.stanford.edu/.../Gade%20-%20Handbook%20C>.
- [235]. ***, Agenda. Room Acoustics Parameters, www.cfh.dk/assets/2-nk---per-rubak---nh-4.pdf.
- [236]. ***, Acoustical Guide. General definitions, www.armstrong.co.uk/content2/commlcglue/files/66286.pdf.
- [237]. ***, Acoustic Engineering – Dirac, www.acoustics-engineering.com/html/dirac.html/.
- [238]. ***, Acoustical parameters / Inspired Acoustics, www.inspiredacoustics.com/en/node/.
- [239]. ***, Acústica Arquitectónica – Materiales en Arquitectura Acustica, <https://www.ipi.tel.uva.es/~nacho/>
- [240]. ***, Absorbentes acústicos VS Aislantes acústicos, skumacoustics.com/.
- [241]. ***, fonoassorbenti (materiali fonoassorbenti) - isolanti acustici, www.fonisolamento.it/fonoassorbenti.html.
- [242]. ***, Il fonoassorbimento, www.iauv.it/.../materiali-.../appli-09-scheda4_f
- [243]. ***, Materiales absorbentes – SlideShare es.slideshare.net/.../materiales-absorbentes-7197...
- [244]. ***, Materiales absorbentes - Departamento de Física Aplicada de la .rabfis15.uco.es/.../materiales%20absorbentes.htm
- [245]. ***, Ingenieros acústicos - Manual sobre acústica de salas, www.ingenierosacusticos.com/ingenieros-acusticos-manual-s..
- [246]. ***, Acústica Arquitectónica, www.analfatecnicos.net/.../27_AcusticaArquitectonica.pdf.
- [247]. ***, Estudio, diseño e implementación de una cámara anecoica para el dspace.ups.edu.ec/bitstream/.../7461/1/UPS-CT004412.pdf.
- [248]. ***, Metodología de diseño de estudios de grabación y aplicación a caso ..., oa.upm.es/.../Tesis_master_Manuel_Vazquez_Ro.
- [249]. ***, Helmholtz Resonance, www.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html.
- [250]. ***, ISO 17497-1:2004, Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [251]. ***, EN ISO 140-3:1995, Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Laboratory measurement of airborne sound insulation of building elements.
- [252]. ***, Cualidades acústicas de una sala, www.ehu.es/acustica/espanol/salas/.../casles.htm.
- [253]. ***, Habitaciones con techos acústicos – Ecophon www.ecophon.com/.../acusticas/...acustica/Habitaci..
- [254]. ***, Acústica para salas de Home Theater - Revista Home Theater & Casa ..revistahometheater.uol.com.br/.../acustica-para-salas-de-hom...
- [255]. ***, Diseño y acondicionamiento de una sala de proyección ...oa.upm.es/14014/1/pfc_raul_arribas_perez.pdf de R Arribas Pérez - 2012.
- [256]. ***, Analiza coeficientului de absorbție acustică pentru materiale fonoabsorbante, Contract 1101P/07.07.2015, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.
- [257]. ***, Prospecte, carte tehnică: Sonometru 2270.
- [258]. ***, EN ISO 3382-3:2012 - Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters. Open plan offices.
- [259]. ***, C125: 2013 – Normativ privind acustica în construcții și zone urbane.
- [260]. ***, Acustica, www.crbnet.it/fisicatecnica/.../l.acustica_architettonica.pdf.
- [261]. ***, Progettazione acustica dei grandi ambienti - Studio Sound Service, www.studiosoundservice.com/.../grandi_ambienti_SAIE201.
- [262]. ***, Representación gráfica de la Primera Reflexión en espacios ... https://upcommons.upc.edu/bitstream/.../LigiaRuiz_TFM.pdf.
- [263]. ***, ISO 3382:1997, Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [264]. ***, Legea 10/1995 (actualizată) privind calitatea în construcții.
- [265]. ***, ISO 10534-1:1996, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio.
- [266]. ***, SR EN ISO 10534-1, Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance with the interferometer, Part 1: Stationary wave ratio method, 2002.

- [267]. ***, SR EN ISO 10534-2, Determination of sound absorption coefficient and acoustic impedance with the interferometer, Part 2: Transfer function method, 2002.
- [268]. ***, SR EN ISO 11654, Acoustics. Acoustic absorbers for use in buildings. Evaluation of acoustic absorption, 2002.
- [269]. ***, P 123-1989, Instrucțiuni tehnice privind proiectarea și executarea sălilor de audiție publică din punct de vedere acustic.
- [270]. ***, www.soundblog.ro/529/tratament-acustic-si-sau-antifonare-partea-a-II-a/.