

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI”
DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII**



**CONTRIBUȚII LA STABILIREA IMPACTULUI DURATEI DE
VIAȚĂ A IZOLAȚIILOR TERMICE ASUPRA EFICIENȚEI
ENERGETICE A CLĂDIRILOR**

Student doctorand:

Ing. Sergiu George PETRE

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Dorina Nicolina ISOPESCU

IAȘI, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
R E C T O R A T U L

Către,

Vă facem cunoscut că, în data de 01.11.2024 la ora 9:00, în Sala 0.1R a Corpului R al Facultății de Construcții și Instalații Iași, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**„CONTRIBUȚII LA STABILIREA IMPACTULUI DURATEI DE VIAȚĂ A
IZOLAȚIILOR TERMICE ASUPRA EFICIENȚEI ENERGETICE A CLĂDIRILOR”**

elaborate de domnul **ing. Sergiu George PETRE** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|---|-------------------------------|
| 1. Prof. univ. dr. ing. Andrei Burlacu | <i>președinte</i> |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | |
| 2. Prof. univ. dr. ing. Dorina Nicolina Isopescu | <i>conducător de doctorat</i> |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | |
| 3. Prof. univ. dr. ing. Ana-Maria Grănescu | <i>referent oficial</i> |
| Universitatea „Ovidius” din Constanța | |
| 4. Prof. univ. dr. ing. Ioan Așchilean | <i>referent oficial</i> |
| Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca | |
| 5. Prof. univ. dr. ing. Nicolae Țăranu | <i>referent oficial</i> |
| Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof. univ. dr. ing. Dan Cașcaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagîț

CUPRINS

CUPRINS	i
Capitolul 1 - INTRODUCERE	1
1.1 Motivarea alegerii tematicii și caracterul cercetării.....	1
1.2 Obiectivele programului de cercetare	2
1.3 Structura tezei	3
Capitolul 2 - STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU	5
2.1 Conceptul de sustenabilitate pentru mediul construit.....	5
2.1.1 Considerații generale despre conceptul de sustenabilitate	5
2.1.2 Construcții sustenabile. Definiții și exigențe.....	5
2.1.3 Metode și principii aplicabile mediului construit sustenabil.....	6
2.2 Durabilitatea materialelor de construcție.....	7
2.2.1 Definiție și cerințe	7
2.2.2 Factori care influențează durabilitatea materialelor de construcție.....	8
2.3 Metode pentru evaluarea impactului construcțiilor asupra mediului	8
2.3.1 Certificarea construcțiilor prin stabilirea scorului de sustenabilitate și de eficiență	8
Capitolul 3 - ASPECTE GENERALE PRIVIND EFICIENȚA ENERGETICĂ A CLĂDIRILOR.....	9
3.1 Cerințele reglementate privind eficiența energetică a clădirilor.....	9
3.1.1 Cadrul de reglementare legislativă națională și internațională.....	9
3.1.2 Standarde de izolare termică a clădirilor	9

3.2	Materiale utilizate pentru izolarea termică a clădirilor.....	11
3.2.1	Materiale termoizolatoare convenționale	11
3.2.2	Materiale termoizolatoare alternative.....	12
3.2.3	Materiale termoizolatoare cu performanțe avansate	13
3.3	Modele analitice pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor	13
3.4	Modelarea numerică pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor ..	14
Capitolul 4 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU EVALUAREA PERFORMANȚEI TERMICE A ELEMENTELOR DE ANVELOPĂ ȘI A MATERIALELOR TERMOIZOLATOARE.....		15
4.1	Cercetări experimentale de măsurare in situ ale rezistențelor termice prin metoda termofluxmetrică.....	15
4.1.1	Descrierea metodologiei de cercetare	15
4.1.2	Interpretarea rezultatelor și concluzii	24
4.2	Cercetări experimentale pentru determinarea caracteristicilor termotehnice ale izolațiilor termice.....	25
4.2.1	Descrierea metodologiei de cercetare	25
4.2.2	Cercetări experimentale efectuate prin monitorizare in situ	26
4.2.3	Rezultate obținute în cercetările experimentale	27
4.2.4	Interpretarea rezultatelor și concluzii	29
Capitolul 5 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU DETERMINAREA VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ ȘI UMIDITATE RELATIVĂ LA ELEMENTELE DE ANVELOPĂ ALE CLĂDIRILOR		31
5.1	Metodologie de cercetare.....	31
5.1.1	Metodologia de monitorizare in situ	31
5.1.2	Prezentare studiu experimental	32
5.2	Prezentare rezultate studiu experimental	32
5.3	Determinarea analitică a temperaturilor suprafețelor	35
5.4	Interpretarea rezultatelor și concluzii	37

Capitolul 6 - CERCETĂRI DE LABORATOR PRIVIND DETERMINAREA EFECTULUI EXPUNERII LA CICLURILE MEDIULUI EXTERIOR ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FIZICE ALE POLISTIRENULUI EXPANDAT	39
6.1 Metodologia de efectuare a cercetărilor de laborator	39
6.1.1 Metodologia de încercare	39
6.1.2 Dispozitive și echipamente utilizate.....	40
6.2 Descrierea studiului experimental de laborator	40
6.3 Rezultatele cercetărilor de laborator	41
6.3.1 Influența expunerii asupra coeficientului de conductivitate termică	41
6.3.2 Influența expunerii asupra caracteristicilor mecanice	42
6.3.3 Influența expunerii asupra stabilității dimensionale.....	43
6.4 Interpretarea rezultatelor și concluzii	43
Capitolul 7 - MODELĂRI NUMERICE PENTRU DETERMINAREA VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ ȘI DE UMIDITATE	45
7.1 Metodă și program de calcul	45
7.1.1 Metodă de evaluare	45
7.1.2 Program de calcul utilizat pentru modelare numerică.....	45
7.2 Prezentare studiu de caz	46
7.3 Rezultate obținute pentru studiul de caz	46
7.4 Sinteza și analiza rezultatelor pentru studiul de caz	49
7.5 Interpretarea rezultatelor și concluzii	54
Capitolul 8 - CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI DE CERCETARE DOCTORALĂ. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	55
8.1 Concluzii generale	55
8.2 Contribuții personale	58
8.3 Valorificarea rezultatelor	59

8.4	Direcții viitoare de cercetare.....	61
	BIBLIOGRAFIE SELECTIVA	63

Capitolul 1 - INTRODUCERE

1.1 Motivarea alegerii tematicii și caracterul cercetării

Alegerea tematicii privind stabilirea impactului duratei de viață a izolațiilor termice asupra eficienței energetice a clădirilor este motivată de nevoia actuală de creștere a sustenabilității și a performanței termice a clădirilor în contextul încălzirii globale și al efortului general de reducere a acesteia. Sectorului construcțiilor îi este atribuită o proporție importantă din consumul total de energie și din emisiile de gaze cu efect de seră și astfel, implementarea unor soluții tehnice performante în ceea ce privește eficiența energetică a clădirilor și înțelegerea completă a materialelor termoizolatoare utilizate este esențială.

Durata de viață a materialelor de construcție este un factor cheie care are influență majoră asupra performanțelor termice ale materialelor/produselor termoizolante. În timp, caracteristicile fizice și mecanice ale termoizolațiilor pot suferi modificări sub acțiunea factorilor de mediu, cum ar fi umiditatea, variațiile de temperatură, fenomenul de îngheț-dezghet, expunerea la radiația solară sau altele asemenea. Modificările negative ale caracteristicilor termotehnice ale termoizolațiilor conduc la pierderi suplimentare de căldură și, implicit, la creșterea consumului de energie pentru încălzire sau răcire.

În literatura de specialitate este cunoscut fenomenul de „îmbătrânire termică” care se referă la modificări pe termen lung, ireversibile, ale structurii, compoziției și morfologiei materialelor expuse la temperaturi pe care este probabil să le întâlnească, de obicei, în timpul funcționării. Suplimentar variațiilor de temperatură, în zonele climatice temperate, variația umidității este destul de accentuată, pe termen lung această variație putând avea influențe care să conducă la degradarea suplimentară a materialelor ce alcătuiesc sistemele termoizolatoare aplicate la exteriorul clădirilor. Astfel, se subliniază importanța înțelegerii efectelor pe care le are îmbătrânirea asupra materialelor termoizolatoare.

Alegerea termoizolațiilor pe baza unei cunoașteri cât mai fidele a comportamentului lor în timp influențează costurile de operare și întreținere și ușurează deciziile proiectanților atunci

când concep clădiri noi sau modernizează clădiri existente. În plus, cercetarea duratei de viață a materialelor termoizolatoare are aport direct în atingerea obiectivelor curente de sustenabilitate și poate folosi drept fundament în elaborarea unor standarde sau a unor politici publice.

Conductivitatea termică a materialelor poroase este influențată de variațiile de temperatură și umiditate. Studiile și cercetările disponibile în literatura de specialitate evidențiază faptul că această conductivitate termică efectivă suferă modificări în timp, ca rezultat al procesului de îmbătrânire a materialului și al influenței parametrilor de mediu, inclusiv variațiile de temperatură și umiditate (Berardi, 2019).

Polistirenul expandat a fost ales ca material de studiu în cadrul cercetării doctorale datorită utilizării sale pe scară largă în industria construcțiilor ca material termoizolant, acesta fiind al doilea cel mai utilizat, cu o importantă cotă de piață și cu o utilizare puternic răspândită la nivelul României. Costul scăzut, performanțele termice ridicate, disponibilitatea sau ușurința în utilizare sunt avantaje care au făcut ca rata de utilizarea a polistirenului expandat să crească cu rapiditate în ultimii ani, fiind preferat în favoarea altor materiale termoizolatoare.

Conținutul tezei are la bază o combinație de cercetări experimentale, cercetări de laborator și modelări numerice care au avut ca scop stabilirea impactului duratei de viață asupra caracteristicilor tehnice a polistirenului expandat.

1.2 Obiectivele programului de cercetare

Obiectivul central al acestui program de cercetare îl reprezintă evaluarea influenței pe care durata de viață a polistirenului expandat o are asupra proprietăților sale, în scopul determinării efectelor potențiale asupra performanței energetice a clădirilor. Această cercetare urmărește să ofere o înțelegere aprofundată a modului în care variabilitatea în timp a caracteristicilor materialului afectează eficiența energetică a clădirilor izolate cu polistiren expandat. În vederea atingerii acestui obiectiv, procesul de cercetare a fost structurat în mai multe etape principale, fiecare dintre acestea contribuind la obținerea unor date necesare pentru evaluarea impactului analizat. Pentru îndeplinirea acestui obiectiv au fost parcurse următoarele etape:

- realizarea unui studiu de sinteză a conceptului de sustenabilitate, a durabilității materialelor și a metodelor de evaluare a impactului construcțiilor asupra mediului;

- realizarea unui studiu de sinteză a reglementărilor privind eficiența energetică, a materialelor utilizate pentru izolarea termică a clădirilor, a modelelor analitice și a modelărilor numerice pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor;
- realizarea cercetărilor experimentale de măsurare a rezistențelor termice la elemente de anvelopă și de determinare a caracteristicilor termotehnice ale polistirenului expandat, ambele realizate in situ;
- realizarea cercetărilor experimentale în vederea determinării variațiilor de temperatură și umiditate relativă la elemente de anvelopă din clădiri existente;
- realizarea cercetărilor de laborator în vederea stabilirii efectelor expunerii polistirenului expandat la ciclurile mediului exterior;
- realizarea unor modelări numerice pentru evaluarea variațiilor de temperatură la elementele de anvelopă și materialele constitutive.

1.3 Structura tezei

Teza este alcătuită din opt capitole care cuprind detaliat aspecte legate de sustenabilitatea mediului construit, eficiența energetică a clădirilor, precum și cercetările experimentale și modelările numerice realizate în cadrul programului de cercetare. În continuare, se va prezenta o sinteză a informațiilor expuse în fiecare capitol.

Capitolul 1 – Introducere prezintă tematica cercetării, motivația alegerii subiectului de cercetare și caracterul cercetărilor efectuate. De asemenea, în capitolul 1 sunt definite obiectivele principale ale programului de cercetare și este prezentată structura generală a tezei care facilitează înțelegerea clară a modului în care este organizat conținutul.

Capitolul 2 – Stadiul actual al cunoașterii în domeniu prezintă stadiul cunoașterii referitor la sustenabilitatea mediului construit. Aspecte privind conceptele fundamentale ale sustenabilității construcțiilor, durabilitatea materialelor de construcție și metodele de evaluare a impactului construcțiilor asupra mediului sunt prezentate.

Capitolul 3 – Aspecte generale privind eficiența energetică a clădirilor punctează reglementările privind eficiența energetică a clădirilor prezentând cadrul legislativ național și internațional, dar și diferite standarde de izolare termică. De asemenea, capitolul prezintă o sinteză a materialelor termoizolatoare împărțite în trei categorii, respectiv materiale convenționale, alternative și cu performanțe avansate. Sfârșitul capitolului constituie o

prezentare a modelelor analitice și numerice utilizate în evaluarea performanței energetice a clădirilor.

Capitolul 4 – Cercetări experimentale pentru evaluarea performanței termice a elementelor de anvelopă și a materialelor termoizolatoare se concentrează pe cercetările experimentale de măsurare a rezistențelor termice in situ la elementele de anvelopă și de măsurare a caracteristicilor termotehnice ale polistirenului expandat care este parte constituantă a unor elemente de anvelopă. Rezultatele obținute sunt analizate și interpretate pentru a oferi concluzii relevante asupra performanței termice a materialului studiat.

Capitolul 5 – Cercetări experimentale pentru determinarea variațiilor de temperatură și umiditate relativă la elementele de anvelopă a clădirilor prezintă metodologia de cercetare pentru monitorizarea variațiilor de temperatură și umiditate relativă realizată in situ la nivelul elementelor de anvelopă de tip perete. Sunt prezentate un număr de trei studii experimentale realizate și rezultatele obținute, împreună cu concluziile și recomandările rezultate.

Capitolul 6 – Cercetări de laborator privind determinarea efectului expunerii la ciclurile mediului exterior asupra proprietăților fizice ale polistirenului expandat prezintă cercetările de laborator efectuate pentru a determina influența ciclurilor de expunere de tip îngheț-dezghet asupra performanței termice și structurale a polistirenului expandat. Capitolul descrie detaliat metodologia de testare, dispozitivele și echipamentele utilizate, precum și efectele expunerii asupra coeficientul de conductivitate termică, a rezistenței la compresiune și a stabilității dimensionale.

Capitolul 7 – Modelări numerice pentru determinarea variațiilor de temperatură și de umiditate prezintă modelările numerice utilizate pentru a evalua variațiile de temperatură și umiditate în elementele de anvelopă și materialele constitutive, pentru trei grosimi de termoizolație, în condiții specifice celor cinci zone climatice din România. Se oferă detalii despre metodele și programul de calcul folosit, iar rezultatele studiilor de caz sunt analizate în vederea sintetizării și interpretării datelor obținute.

Capitolul 8 – Concluzii generale. Contribuții. Valorificarea rezultatelor obținute în cadrul programului de cercetare doctorală. Direcții viitoare de cercetare este capitolul de încheiere a tezei care rezumă concluziile generale ale cercetării, evidențiază contribuțiile originale aduse de autor, prezintă valorificarea rezultatelor obținute și propune direcții viitoare de cercetare în domeniu.

Capitolul 2 - STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU

2.1 Conceptul de sustenabilitate pentru mediul construit

2.1.1 Considerații generale despre conceptul de sustenabilitate

Sustenabilitatea reprezintă un concept complex, fiind un sistem dinamic care integrează domeniile economic, social și de mediu, cunoscute și ca cei trei „piloni” ai dezvoltării sustenabile. Aceste dimensiuni sunt interdependente și trebuie gestionate în mod echilibrat pentru a asigura un viitor viabil. Termenul de dezvoltare sustenabilă a fost definit pentru prima dată într-un cadru oficial în Raportul Comisiei Mondiale pentru Mediu și Dezvoltare (Brundtland Report, 1987), intitulat „Our Common Future”. Raportul oferă definiția clasică a dezvoltării sustenabile: „dezvoltare care răspunde nevoilor prezentului fără a compromite capacitatea generațiilor viitoare pentru a-și satisface propriile nevoi”, subliniind atât aspectele de protecție a mediului, cât și necesitatea menținerii echității între generații.

Astfel, dezvoltarea sustenabilă a devenit un obiectiv esențial, cu o aplicabilitate largă, de la politici globale la inițiative locale, toate vizând crearea unui echilibru între dezvoltarea economică, protecția mediului și echitatea socială.

2.1.2 Construcții sustenabile. Definiții și exigențe

Industria construcțiilor sustenabile își propune, asemenea altor domenii, să răspundă nevoilor actuale ale societății fără a aduce prejudicii generațiilor viitoare. În acest sens, sustenabilitatea în construcții se bazează pe câteva principii esențiale, cum ar fi: reducerea consumului de energie și a emisiilor de carbon, utilizarea eficientă a resurselor, promovarea materialelor ecologice, optimizarea ciclului de viață al clădirilor, asigurarea confortului și

sănătății utilizatorilor și creșterea rezilienței construcțiilor în fața schimbărilor climatice (Plank, 2008; Mickaityte și colab., 2008; Akadiri și colab., 2012; Miller și colab., 2014). Aceste principii sunt esențiale pentru reducerea impactului pe termen lung al construcțiilor asupra mediului și a societății.

Sustenabilitatea a devenit, astfel, un pilon central în proiectarea, construcția și modernizarea clădirilor existente, iar importanța acestui subiect continuă să crească în rândul cercetătorilor, instituțiilor și factorilor politici. Unul dintre cele mai importante obiective actuale ale industriei de construcții este implementarea conceptului de economie circulară, care își propune reducerea risipei și reutilizarea resurselor (Nuñez-Cacho și colab., 2018; Benachio și colab., 2020; Hjaltadóttir și colab., 2021; Eberhardt și colab., 2022). În același timp, tehnologia joacă un rol esențial în dezvoltarea unor construcții mai sustenabile, fie că vorbim despre utilizarea tehnologiilor avansate pentru realizarea unor analize complexe în faza de proiectare (Debrah și colab., 2022; Xiang și colab., 2022; Rodriguez-Gracia și colab., 2023), sau despre integrarea sistemelor inteligente pentru gestionarea eficientă a clădirilor (Gao, 2019; Tushar și colab., 2018).

Pe măsură ce încălzirea globală și schimbările climatice devin provocări din ce în ce mai stringente, industria construcțiilor joacă un rol esențial în reducerea impactului asupra generațiilor viitoare. Mediul construit este responsabil pentru o mare parte a consumului global de energie, ceea ce a condus la necesitatea dezvoltării unor construcții mai sustenabile (Urge-Vorsatz și colab., 2015; Santamouris și colab., 2021). Beneficiile construcțiilor sustenabile includ, pe lângă reducerea consumului energetic, diminuarea costurilor operaționale și de întreținere, îmbunătățirea sănătății și confortului utilizatorilor, conservarea resurselor naturale și reducerea emisiilor de carbon. Aceste avantaje fac din sustenabilitatea construcțiilor un element esențial în implementarea conceptului general de sustenabilitate și asigurarea unei dezvoltări echilibrate și responsabile la nivel global.

2.1.3 Metode și principii aplicabile mediului construit sustenabil

Dezvoltarea unui mediu construit sustenabil implică o abordare cuprinzătoare și atentă în ceea ce privește proiectarea, construcția și utilizarea clădirilor, folosind metode și principii avansate care urmăresc eficiența energetică, utilizarea rațională a resurselor și minimizarea impactului asupra mediului. Aceste metode sunt esențiale pentru a crea clădiri care nu doar răspund nevoilor actuale, ci și protejează mediul și resursele pentru generațiile viitoare. Printre cele mai importante principii care stau la baza construcțiilor sustenabile se numără eficiența

energetică, utilizarea resurselor regenerabile, aplicarea economiei circulare și asigurarea confortului și sănătății utilizatorilor.

Pe lângă principiile menționate, dezvoltarea clădirilor sustenabile include și alte aspecte importante, cum ar fi gestionarea apei pluviale, orientarea optimă a clădirilor pentru a maximiza eficiența energetică, utilizarea vegetației pentru umbrire și reducerea supraîncălzirii, gestionarea eficientă a deșeurilor și integrarea de soluții pentru persoanele cu dizabilități. Crearea unor spații care să răspundă nevoilor locale și să faciliteze coeziunea socială este, de asemenea, un element important în promovarea sustenabilității în construcții.

2.2 Durabilitatea materialelor de construcție

Durabilitatea materialelor de construcție se referă la capacitatea acestora de a-și păstra proprietățile și funcționalitatea pe termen lung, în ciuda expunerii la factori externi precum variațiile de temperatură, umiditate, poluare sau altele. Aceasta este esențială pentru sustenabilitate, considerând că materialele cu o durată de viață extinsă reduc frecvența intervențiilor pentru reparații și întreținere, minimizând astfel consumul de resurse și energie.

2.2.1 Definiție și cerințe

La fel ca și în cazul clădirilor, durabilitatea materialelor utilizate în construcții este la fel de importantă. De la început, materialele trebuie alese astfel încât să reziste cât mai mult la expunerea la factori externi, limitând nevoia de înlocuire frecventă. Durata de viață a materialelor variază în funcție de tipul de material, dar este influențată și de calitatea lucrărilor de întreținere și de măsurile de protecție adoptate la început sau în timpul utilizării. Betonul, cărămizile, piatra naturală sau lemnul sunt exemple de materiale care, în condiții optime, pot avea o durată de viață similară cu cea a clădirii sau o pot chiar depăși. Acestea sunt materiale durabile, al căror ciclu de viață acoperă, de cele mai multe ori, întreaga durată de viață a construcției. Pe de altă parte, materialele cu o durată de viață mai scurtă, precum finisajele interioare și exterioare (tencuieli, vopseluri sau materiale plastice), necesită înlocuire periodică, contribuind la costuri suplimentare și având impact negativ asupra mediului (Thillai și colab., 2013; Yi și colab., 2015).

Prelungirea duratei de viață atât a clădirilor, cât și a materialelor utilizate, este crucială pentru atingerea obiectivelor de sustenabilitate. Pe lângă faptul că minimizează costurile de întreținere și reparație, aceasta contribuie la reducerea impactului asupra mediului prin limitarea

consumului de resurse și energie. Sustenabilitatea clădirilor nu depinde doar de proiectarea inițială, ci și de utilizarea materialelor durabile și de implementarea unor practici eficiente de gestionare a resurselor pe toată durata ciclului de viață al construcției.

2.2.2 Factori care influențează durabilitatea materialelor de construcție

Durabilitatea materialelor de construcție este un aspect esențial în asigurarea longevității și sustenabilității clădirilor, iar aceasta este semnificativ influențată de o varietate de factori externi care pot scurta durata de viață a materialelor. Printre acești factori se numără expunerea la agenți chimici, factori biologici, condiții climatice și activitatea umană, fiecare având un impact considerabil asupra capacității materialelor de a-și menține proprietățile și funcționalitatea pe termen lung.

Durabilitatea materialelor de construcție este influențată de un complex de factori externi, inclusiv condiții climatice, agenți chimici, influențe biologice și intervenția umană. Pentru a contracara aceste influențe negative, este esențială adoptarea unor măsuri preventive riguroase și implementarea de soluții tehnologice de protecție adecvate, care să reducă impactul factorilor de degradare și să prelungească durata de viață a materialelor. Prin adoptarea unor astfel de măsuri, se poate asigura o durabilitate sporită și se poate contribui la dezvoltarea sustenabilă a construcțiilor, reducând atât costurile de întreținere pe termen lung, cât și impactul asupra mediului.

2.3 Metode pentru evaluarea impactului construcțiilor asupra mediului

2.3.1 Certificarea construcțiilor prin stabilirea scorului de sustenabilitate și de eficiență

Certificarea clădirilor sustenabile și evaluarea impactului redus pe care aceste clădiri îl au asupra generațiilor viitoare reprezintă o componentă esențială în atingerea obiectivelor globale de sustenabilitate. Acest proces de certificare contribuie semnificativ la îmbunătățirea performanțelor de mediu ale clădirilor, asigurându-se că acestea respectă criterii stricte legate de eficiență energetică, conservarea resurselor și protecția ecosistemelor. La nivel mondial, au fost dezvoltate mai multe sisteme de certificare independente, adaptate în funcție de regiuni sau alți indicatori, care evaluează clădirile pe baza unor criterii diverse de sustenabilitate.

Capitolul 3 - ASPECTE GENERALE PRIVIND EFICIENȚA ENERGETICĂ A CLĂDIRILOR

3.1 Cerințele reglementate privind eficiența energetică a clădirilor

Reducerea efectelor încălzirii globale reprezintă una dintre cele mai semnificative provocări ale societății contemporane, iar în acest context, eficiența energetică a clădirilor devine o prioritate esențială pentru atingerea obiectivelor dezvoltării durabile.

3.1.1 Cadrul de reglementare legislativă națională și internațională

Uniunea Europeană a început să promoveze politici de eficiență energetică încă din anii 1970, iar din anii 1980, accentul s-a pus și pe clădiri. Ultima modificare majoră a avut loc în 2024, prin Directiva UE/2024/1275, care promovează politici ambițioase ce vizează crearea unui fond de clădiri extrem de eficiente energetic și complet decarbonizate până în anul 2050 (Energy Performance of Buildings Directive).

În România, ca stat membru al Uniunii Europene, cadrul legislativ privind eficiența energetică a clădirilor este strâns legat de directivele europene. Legea nr. 372 din 13 decembrie 2005, republicată ultima dată la 25 iulie 2024, reprezintă transpunerea Directivei Europene privind Performanța Energetică a Clădirilor și reglementează cerințele minime de performanță energetică, auditarea și certificarea performanței energetice (LEGE 372 13/12/2005 - Portal Legislativ)..

3.1.2 Standarde de izolare termică a clădirilor

Un element central în dezvoltarea clădirilor eficiente energetic este izolarea termică, care reduce pierderile de căldură și consumul de energie necesar pentru încălzire sau răcire. Aceasta contribuie semnificativ la sustenabilitatea clădirilor noi sau renovate, fiind esențială

pentru îmbunătățirea performanței energetice și reducerea impactului asupra mediului. Pentru a asigura eficiența izolării termice, au fost elaborate standarde specifice care stabilesc niveluri minime de performanță, materiale adecvate și tehnici de aplicare, garantând astfel confortul termic și optimizarea consumului energetic.

3.1.2.1 Clădiri NZEB

Conceptul clădirilor cu consum de energie aproape egal cu zero apare în contextul sustenabilității clădirilor, respectiv a micșorării consumurilor generate de utilizarea clădirilor. La nivelul Uniunii Europene conceptul apare odată cu Directiva privind performanța energetică a clădirilor (2010/31/UE) prin care se introduce obligativitatea ca toate clădirile publice noi să fie NZEB începând cu data de 31 decembrie 2018 și toate clădirile noi private să fie NZEB începând cu data de 31 decembrie 2020 (Directive 2010/31/EU). În prezent, toate clădirile noi din Uniunea Europeană trebuie să fie clădiri NZEB.

3.1.2.2 Clădiri ZEB

Odată cu reformarea Directivei pentru performanța energetică a clădirilor (EU/2024/1275) în anul 2024, cerințele performanței energetice pentru clădiri au crescut, considerând că cel mai mare consumator de energie al Europei sunt clădirile și considerând ambiția de a deveni primul continent neutru din punct de vedere climatic până în anul 2050. Spre deosebire de clădirile cu consum de energie aproape egal cu zero, clădirile cu emisii zero sunt clădiri cu performanță energetică foarte înaltă, a căror necesar redus de energie este acoperit integral din surse regenerabile la fața locului sau din apropiere (EU/2024/1275).

3.1.2.3 Casa Pasivă

Casa Pasivă este un standard de construcție dezvoltat de Passive House Institute care are la bază limitarea consumurilor necesare pentru încălzire și răcire fără a limita confortul utilizatorilor, cu scopul de a crea clădiri cu eficiență energetică ridicată și cu un impact minim asupra mediului. Primele case pasive au fost construite în Germania în anii 1990 (Schnieders și colab., 2019), dar acest concept a crescut rapid în popularitate în Europa dar și în restul lumii și astfel, în prezent sunt certificate case pasive, în total, peste 5800 de clădiri (*Gebaute Passivhaus Projekte | Beispiele Passivhäuser Weltweit*).

3.1.2.4 Casa Activă

Casa activă este un standard de construcție dezvoltat în anul 2011 de către Active House Alliance, un parteneriat între sectorul public, cel privat, industrie și consumatori. Conceptul are la bază crearea unor clădiri mai mult decât eficiente energetic, considerând și aspecte care țin de sănătatea ocupanților, de confortul acestora dar și de impactul pozitiv asupra mediului (*Active House*).

3.2 Materiale utilizate pentru izolarea termică a clădirilor

Performanța energetică a unei construcții este strict legată de performanța elementelor de construcție care alcătuiesc anvelopa, iar aceasta este, mai departe, strict legată de caracteristicile materialelor utilizate pentru izolare termică.

3.2.1 Materiale termoizolatoare convenționale

3.2.1.1 Polistiren Expandat

Polistirenul expandat (Schiavoni și colab., 2016; Abu-Jdayil și colab., 2019), un material ușor cu o densitate variabilă între 15 și 35 kg/m³, este recunoscut pentru proprietățile sale termoizolante, având un coeficient de conductivitate termică situat între 0,030 și 0,040 W/mK. Datorită acestor caracteristici, este utilizat pe scară largă, în special sub formă de plăci, pentru izolarea termică a pereților exteriori ai clădirilor.

3.2.1.2 Polistiren Extrudat

Polistirenul extrudat (Schiavoni și colab., 2016; Abu-Jdayil și colab., 2019), cunoscut pentru caracteristicile sale superioare comparativ cu polistirenul expandat, prezintă un coeficient de conductivitate termică situat între 0,025 și 0,035 W/mK, ceea ce reflectă o eficiență termică mai bună.

3.2.1.3 Vată minerală de sticlă

Vata minerală de sticlă (Kim & Jeong, 2014), obținută printr-un proces de topire a sticlei la temperaturi ridicate, se prezintă sub formă de role sau plăci. Acest material termoizolant este caracterizat printr-un coeficient de conductivitate termică cuprins între 0,030 și 0,045 W/mK, ceea ce îl face eficient pentru aplicarea în diverse domenii de construcție.

3.2.1.4 *Vată minerală bazaltică*

Vata minerală bazaltică (Schiavoni și colab., 2016b; Abu-Jdayil și colab., 2019), obținută prin topirea bazaltului la temperaturi foarte ridicate, prezintă caracteristici termice comparabile cu cele ale vatei minerale de sticlă.

3.2.1.5 *Poliuretan*

Poliuretanul (Schiavoni și colab., 2016; Samali et al., 2019; Abu-Jdayil și colab., 2019), un material termoizolator cu performanțe termice superioare, se caracterizează printr-un coeficient de conductivitate termică variind între 0,020 și 0,030 W/mK.

3.2.1.6 *Plută*

Pluta (Schiavoni și colab., 2019; Abu-Jdayil și colab., 2019), un material izolator natural, este disponibilă sub formă de panouri sau umplutură și se utilizează pentru izolarea pereților exteriori, planșeelor și acoperișurilor. Coeficientul său de conductivitate termică variază între 0,037 și 0,050 W/mK, poziționându-l ca un material cu performanță termică bună.

3.2.1.7 *Celuloză*

Celuloza (Schiavoni și colab., 2019; Abu-Jdayil și colab., 2019), un material organic fibros, este utilizată pentru izolarea termică și fonică, fiind realizată din hârtie reciclată sau fibre de lemn. Cu un coeficient de conductivitate termică variind între 0,037 și 0,042 W/mK, celuloza oferă o performanță bună în ceea ce privește izolarea termică, contribuind eficient la menținerea confortului interior al clădirilor.

3.2.2 *Materiale termoizolatoare alternative*

3.2.2.1 *Câneapă*

Cânepa (Schiavoni și colab., 2019, Martinez și colab., 2023) este un material natural termoizolator care în funcție de cum este procesat are valori ale coeficientului de conductivitate termică cuprins între 0,038 și 0,060 W/mK. Dintre aplicațiile cânepii ca material termoizolator, aceasta se folosește, de obicei, la izolarea elementelor verticale de tip perete sau la izolarea elementelor orizontale de tip planșeu.

3.2.2.2 Lână de oaie

Lâna de oaie (Korjenic și colab., 2015, Schiavoni și colab., 2019) este un material termoizolant cu proprietăți de reglare a umidității utilizat cu precădere în realizarea construcțiilor verzi. În funcție de producător, lâna are un coeficient de conductivitate cuprins între 0,038 și 0,054 W/mK.

3.2.3 Materiale termoizolatoare cu performanțe avansate

3.2.3.1 Panouri vidate termoizolante

Panourile vidate termoizolante (Schiavoni și colab., 2019, Božiček și colab., 2024) sunt produse cu o performanță termică foarte înaltă, acestea fiind alcătuite dintr-un nucleu și un înveliș. Nucleul este constituit dintr-un material cu o porozitate ridicată plasat sub vid, iar învelișul este unul ermetic de tip multistrat care are rolul de a menține vidul și de a proteja nucleul. În ceea ce privește performanțele termice, panourile vidate termoizolante au un coeficient de conductivitate termică de aproximativ 0,004 W/mK, aproximativ de zece ori mai mic decât în cazul materialelor convenționale.

3.2.3.2 Aerogel

Aerogelul (Riffat și colab., 2012, Schiavoni și colab., 2019) este unul dintre cele mai performante materiale termoizolatoare fiind un material format într-un procent cuprins între 85-99,8% din nanopori. Acesta se obține de obicei, din silice dar și din oxizi sau materiale polimerice, prin îndepărtarea lichidului dintr-un gel la o anumită temperatură. Atunci când este folosit ca material termoizolator în industria de construcții, aerogelul are o greutate tehnică cuprinsă între 70 și 100 kg/m³ și un coeficient de conductivitate termică cuprins între 0,0131 și 0,0136 W/mK.

3.3 Modele analitice pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor

Evaluarea performanței energetice a clădirilor reprezintă un punct cheie în strategia mondială de reducere a consumului de energie și cu atât mai mult la nivelul Uniunii Europene, unde aproximativ 40% din totalul de energie consumată este utilizată de clădiri și peste o treime din emisiile de gaze cu efect de seră din sectorul de energie provin de la clădiri (*Energy Performance of Buildings Directive*).

În Uniunea Europeană, setul de standarde EN ISO 52000 a fost dezvoltat pentru a consolida măsurile Directivei Europene privind Performanța Energetică a Clădirilor, acesta oferind un cadru uniform de evaluare a performanței energetice. Standardele abordează toate tipurile de consum de energie, respectiv pentru încălzire, răcire, iluminare, ventilare și preparare de apă caldă menajeră în diferite medii climatice. Acestea sunt realizate astfel încât să fie ușor de adoptat și permit adaptarea la condițiile climatice regionale sau locale, dar și alegerea diferitelor metode de calcul, considerând obligația statelor membre ale Uniunii Europene de implementare a acestor standarde (Van Dijk și colab., 2019).

Transpunerea setului de standarde europene EN ISO 52000 în reglementările din România a fost realizată în anul 2022 prin adoptarea Metodologiei de calcul al performanței energetice a clădirilor, Indicativ Mc 001 – 2022. Această metodologie stabilește cadrul necesar pentru evaluarea performanței energetice atât pentru clădirile noi, cât și pentru cele existente, aplicându-se atât în cazul clădirilor rezidențiale, cât și al celor nerezidențiale.

3.4 Modelarea numerică pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor

Modelarea numerică, în scopul stabilirii performanței energetice a clădirilor, reprezintă o metodă avansată comparativ cu modelele analitice tradiționale, implicând utilizarea unor calcule complexe ce permit obținerea unor rezultate cu un grad ridicat de încredere. Aceste simulări energetice sunt esențiale pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor, având un rol crucial atât în proiectarea unor clădiri noi cu eficiență energetică ridicată, cât și în dezvoltarea soluțiilor de intervenție pentru îmbunătățirea eficienței energetice a clădirilor existente.

Capitolul 4 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU EVALUAREA PERFORMANȚEI TERMICE A ELEMENTELOR DE ANVELOPĂ ȘI A MATERIALELOR TERMOIZOLATOARE

4.1 Cercetări experimentale de măsurare in situ ale rezistențelor termice prin metoda termofluxmetrică

Metoda termofluxmetrică este cea mai utilizată metodă folosită pentru determinarea rezistențelor termice la elementele de construcții (Meng și colab., 2015). Aceasta poate fi utilizată atât în condiții de laborator, cât și pentru efectuarea măsurărilor in situ. Principiul metodei constă în măsurarea diferenței de temperatură între două suprafețe ale elementului și măsurarea fluxului termic în lungul gradientului de temperatură.

4.1.1 Descrierea metodologiei de cercetare

4.1.1.1 Metodă de măsurare

Măsurătorile efectuate în cadrul programului de cercetare au fost realizate în conformitate cu prevederile standardului ISO 9869-1:2014, “Thermal insulation – building elements – in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – part 1: heat flow meter method”. Acesta prezintă dispozitivele necesare în vederea efectuării măsurărilor, procedura de instalare a aparatului și de efectuare a măsurărilor, analiza datelor și a eventualelor erori precum și un format de raport al măsurărilor.

Pentru compararea rezistențelor termice unidirecționale determinate prin efectuarea măsurărilor in situ, pentru fiecare dintre cele trei elemente de construcție de tip perete

analizate, a fost calculată rezistența termică unidirecțională conform relației din C107-2005 - „Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor

4.1.1.2 Dispozitivul de măsurare

Pentru realizarea măsurărilor experimentale a fost utilizat dispozitivul Hukseflux – TRSYS, un sistem care permite evaluarea in situ a rezistențelor termice și a transmitanței termice a elementelor de construcție. Acest echipament oferă posibilitatea de măsurare conform cerințelor prevăzute în standardul ISO 9869-1:2014, “Thermal insulation – building elements – in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance – part 1: heat flow meter method”

4.1.1.3 Studiu de caz 1 – Element de anvelopă clădire publică

În cadrul primului studiu de caz au fost realizate măsurători la un element de anvelopă ce face parte din clădirea Corpului R al Facultății de Construcții și Instalații din Iași din Bulevardul Profesor Dimitrie Mangeron 1. Elementul de anvelopă este reprezentat de un perete exterior, de închidere. Acesta delimitează o încăpăre a cărei destinație este de birou, iar orientarea acestuia este spre Nord-Est. În Figura 4.3. se prezintă elementul propus spre analiză iar Figura 4.4. prezintă variația temperaturii pe suprafața elementului, obținută cu ajutorul camerei termografice.



Figura 4.1. – Element de construcție propus spre analiză

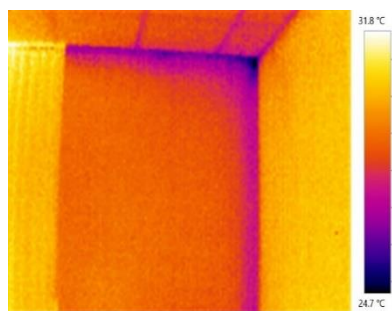


Figura 4.2. – Variația temperaturii pe suprafața elementului

Datele măsurate și înregistrate în prima perioadă sunt prezentate sub formă unor grafice care evidențiază variația valorilor fluxului termic unitar, a temperaturii suprafeței interioare și a temperaturii suprafeței exterioare cu timpul. Figurile 4.7., 4.8. și 4.9. prezintă aceste variații.

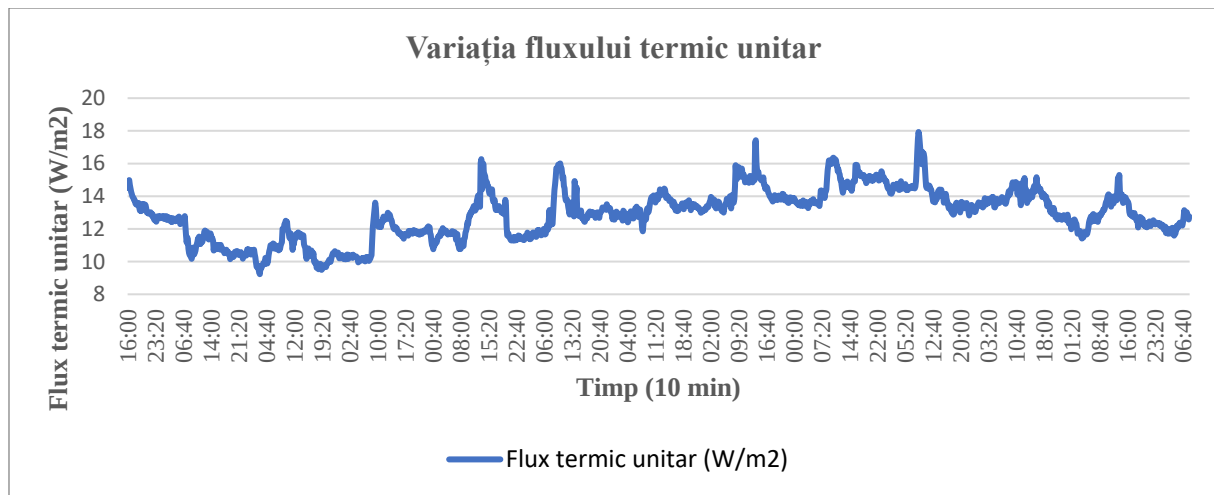


Figura 4.3. – Variația fluxului termic unitar

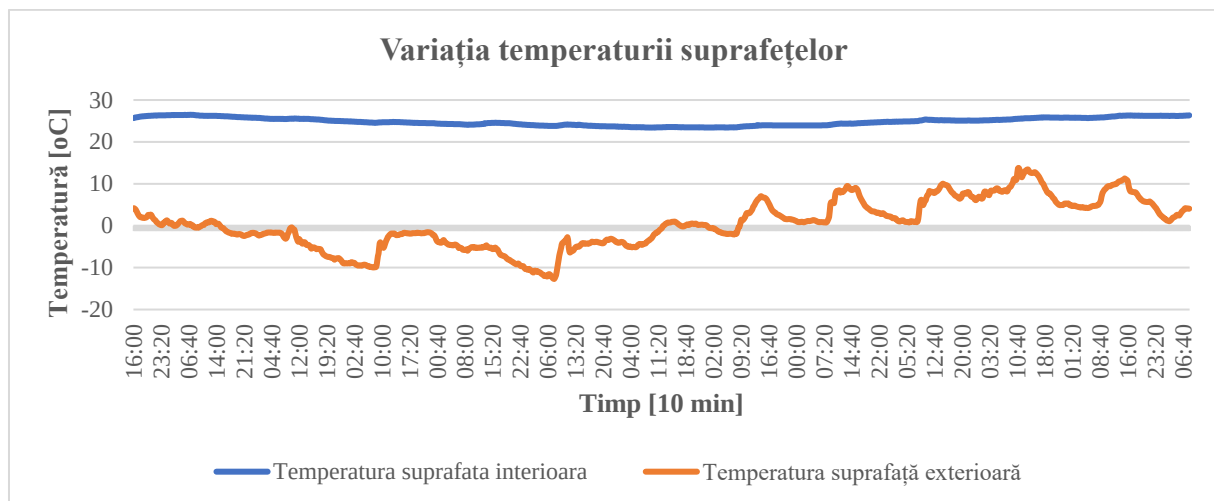


Figura 4.4. – Variația temperaturii suprafețelor interioare și exterioare

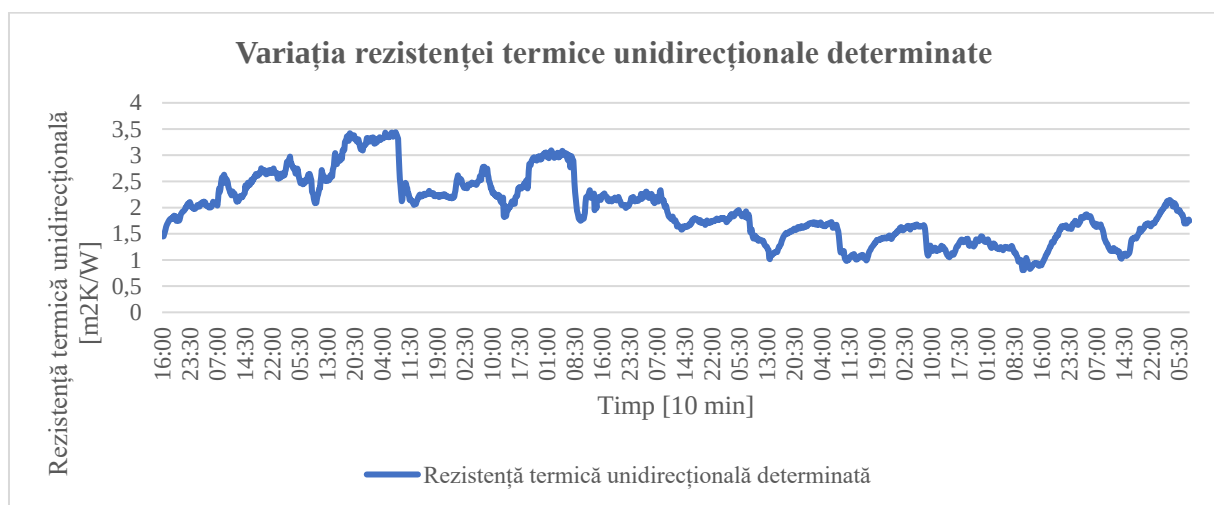


Figura 4.5. – Variația rezistenței termice unidirecționale determinate

Tabel 4.1. – Calculul rezistenței termice unidirecționale teoretice – Studiu de caz 1

Nr. crt.	Denumire strat material	Grosime strat [m]	Conductivitate termică de calcul [W/mK]	Coeficient de majorare	Rezistență termică strat [m ² K/W]
1	Tencuială	0,03	0,93	1,03	0,031
2	Zidărie de cărămidă cu goluri verticale	0,25	0,58	1,03	0,418
3	Beton armat	0,15	1,74	1	0,086
4	Tencuială	0,03	0,93	1,03	0,031
5	Polistiren expandat	0,05	0,04	1,05	1,190
6	Tencuială minerală armată	0,005	0,93	1	0,005
Rezistență termică unidirecțională [m ² K/W]					1,763

Pentru o înțelegere mai ușoară a datelor, Figura 4.10. prezintă ambele seturi de date sub formă grafică.

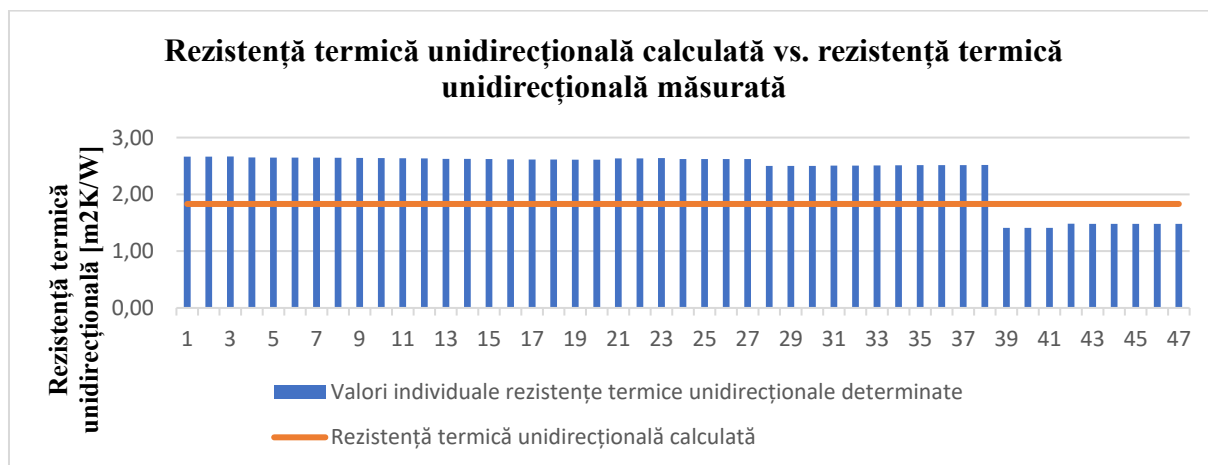


Figura 4.6. – Comparație între rezistența termică unidirecțională calculată și rezistențele termice determinate în urma măsurărilor efectuate

4.1.1.4 Studiu de caz 2 – Element de anvelopă locuință în condominiu de tip bloc P+4E din Iași

În cadrul studiului de caz au fost realizate măsurători la un element de anvelopă ce face parte din clădirea unui bloc de locuințe din Bulevardul Tudor Vladimirescu nr. 2, Iași. Elementul de anvelopă este reprezentat de un perete exterior, de închidere. Acesta delimitează o încăpere a cărei destinație este de dormitor, iar orientarea acestuia este spre Nord. În continuare, pentru stabilirea finală a zonei în care s-au efectuat măsurătorile, peretele s-a inspectat cu o cameră termografică. Adiacent zonei de interes nu au fost identificate punți termice care să poată influența experimentul, distanța în orice direcție până la cea mai apropiată punte termică fiind de minim un metru. De asemenea, în alegerea ariei în care s-au instalat senzorii s-a ținut cont și de poziția rosturilor din zidăria de BCA. În Figura 4.14. se prezintă

elementul propus spre analiză iar Figura 4.15. prezintă variația temperaturii pe suprafața elementului, obținută cu ajutorul unei camere termografice.

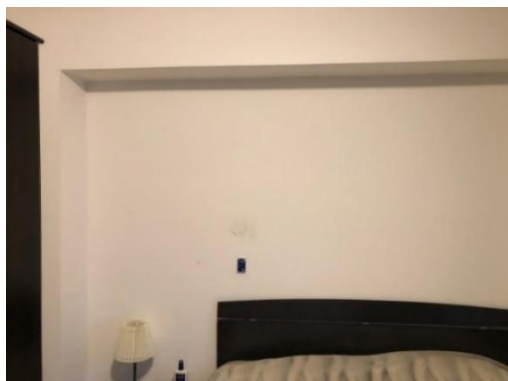


Figura 4.7. – Element de construcție propus spre analiză

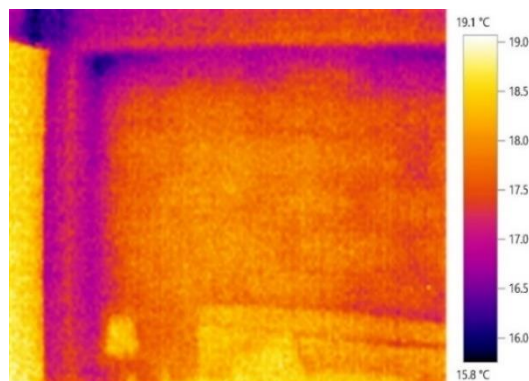


Figura 4.8. – Variația temperaturii pe suprafața elementului

La clădirea care face obiectul studiului de caz 2, după instalarea senzorilor, sistemul de achiziție de date a fost pornit la ora 11:30 în data de 26 ianuarie 2021, iar datele au fost înregistrate până la ora 7:10 în data de 3 februarie 2021, când sistemul a fost oprit din efectuarea măsurătorilor. Datele măsurate și înregistrate se vor prezenta sub formă unor grafice care evidențiază variația valorilor fluxului termic unitar, a temperaturii suprafeței interioare și a temperaturii suprafeței exterioare cu timpul. Figurile 4.19., 4.20. și 4.21. prezintă această variație.

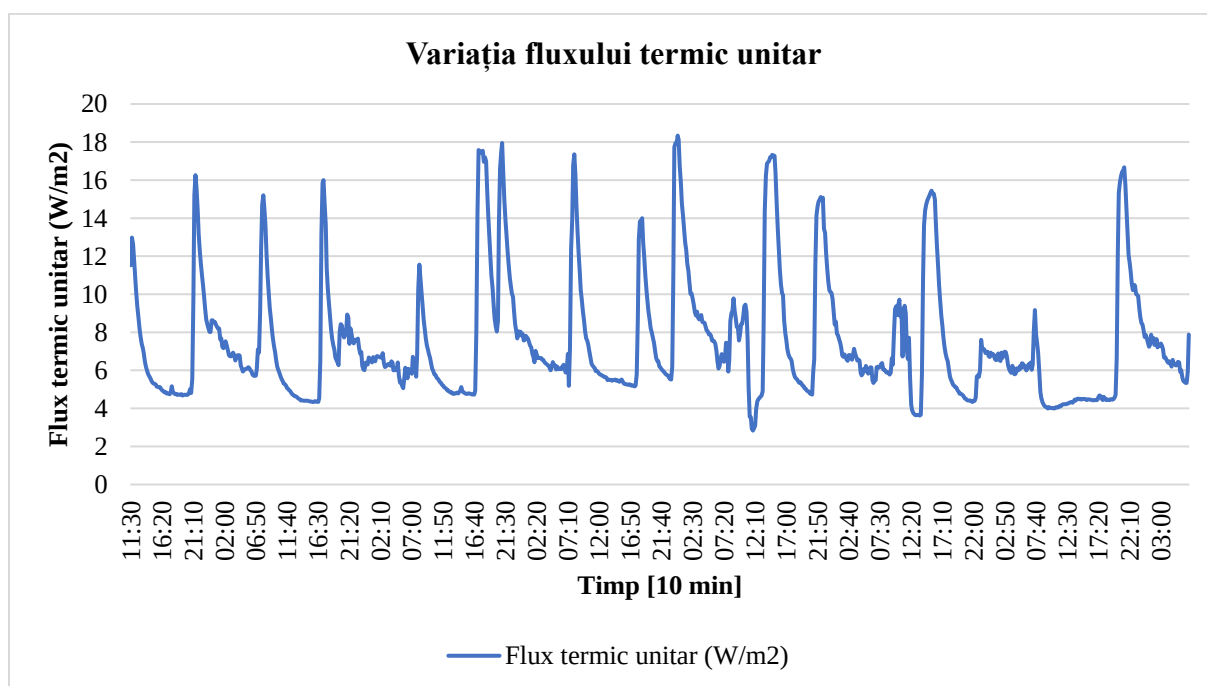


Figura 4.9. – Variația fluxului termic unitar

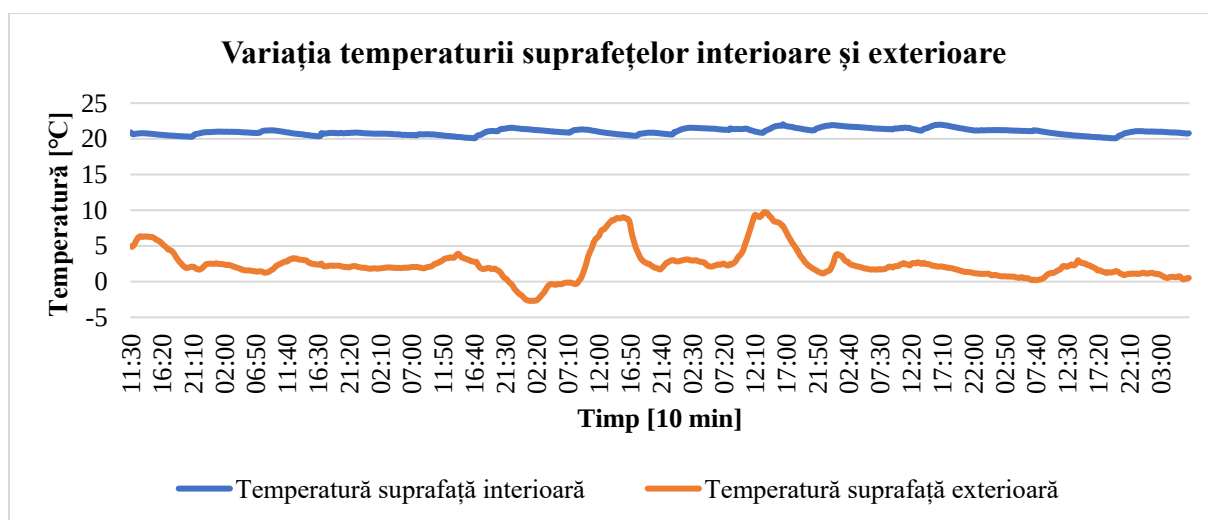


Figura 4.10. – Variația temperaturii suprafețelor interioare și exterioare

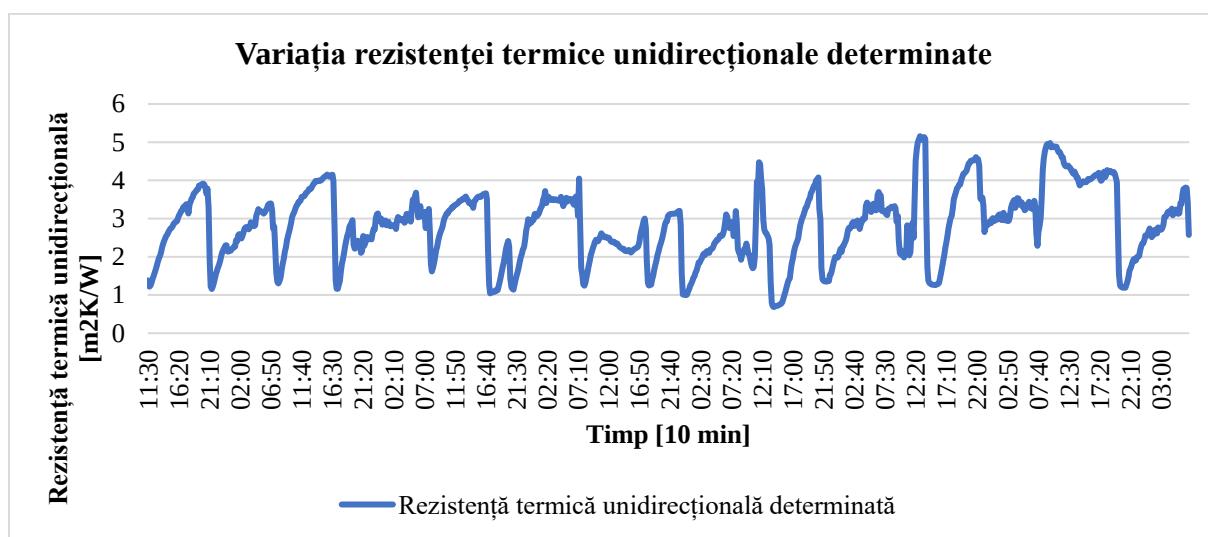


Figura 4.11. – Variația rezistenței termice unidirecționale determinate

Valoarea rezistenței termice unidirecționale teoretice a fost și este prezentată în Tabelul 4.2..

Tabel 4.2. – Calculul rezistenței termice unidirecționale teoretice – Studiu de caz 2

Nr. crt.	Denumire strat material	Grosime strat [m]	Conductivitate termică de calcul [W/mK]	Coeficient de majorare	Rezistență termică strat [m²K/W]
1	Tencuială	0,03	0,93	1,03	0,031
2	Zidărie de BCA	0,25	0,3	1,05	0,794
3	Tencuială	0,03	0,93	1,03	0,031
4	Polistiren expandat	0,1	0,04	1	2,500
5	Tencuială minerală armată	0,005	0,93	1	0,005
Rezistență termică unidirecțională [m²K/W]					3,362

Pentru o înțelegere mai ușoară a datelor, Figura 4.22. prezintă ambele seturi de date sub formă grafică.

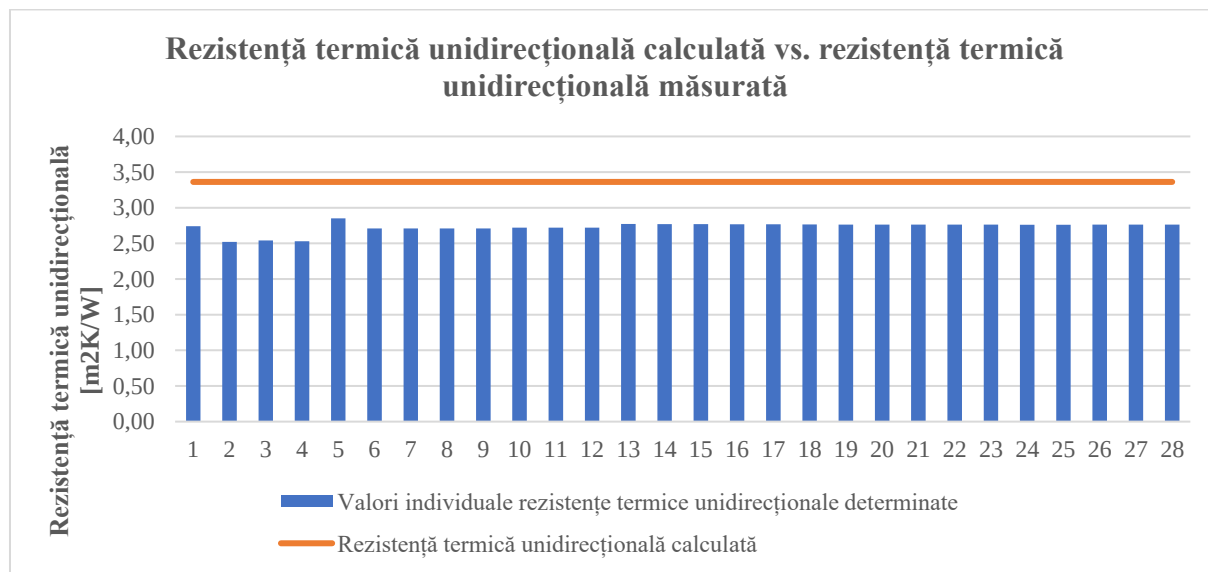


Figura 4.12. – Comparație între rezistența termică unidirecțională calculată și rezistențele termice măsurate

4.1.1.5 Studiu de caz 3 – Element de anvelopă locuință individuală din Bacău

În cadrul studiului de caz au fost realizate măsurători la un element de anvelopă ce face parte din structura unei clădiri de locuit situată pe strada Lunca Bistriței, nr. 20, Bacău. Elementul de anvelopă este reprezentat de un perete exterior, de închidere. Acesta delimitează o încăpere a cărei destinație este de dormitor, iar orientarea acestuia este spre Sud-Est.

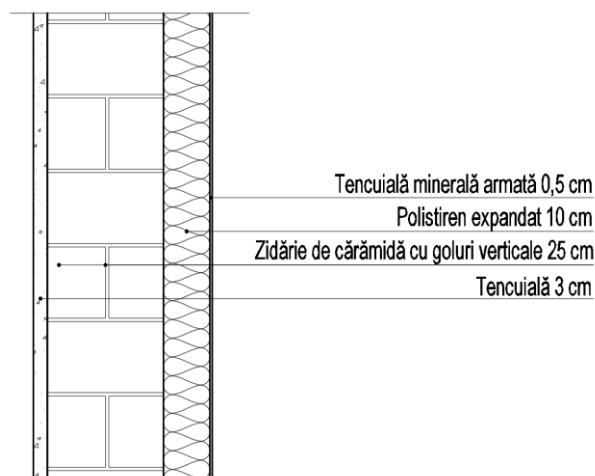


Figura 4.13. – Structură element de construcție studiu de caz 3

În continuare, pentru stabilirea finală a zonei în care s-au efectuat măsurătorile, peretele s-a inspectat cu o cameră termografică. Adiacent zonei de interes nu au fost identificate punți

termice care să poată influența experimentul, distanța în orice direcție până la cea mai apropiată punte termică fiind de minim un metru. În Figura 4.24. se prezintă elementul propus spre analiză iar Figura 4.25. prezintă variația temperaturii pe suprafața elementului, obținută cu ajutorul unei camere termografice.



Figura 4.14. – Element de construcție propus spre analiză

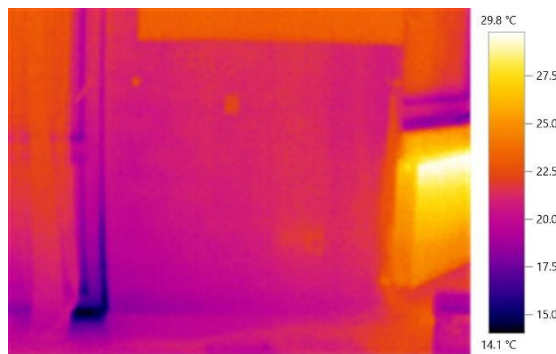


Figura 4.15. – Variația temperaturii pe suprafața elementului

La clădirea care face obiectul studiului de caz 3, după instalarea senzorilor, sistemul de achiziție de date a fost pornit la ora 15:30 în data de 13 februarie 2021, iar datele au fost înregistrate până la ora 14:50 în data de 23 februarie 2021, când sistemul a fost oprit din efectuarea măsurătorilor. Datele măsurate și înregistrate se vor prezenta sub formă unor grafice care evidențiază variația valorilor fluxului termic unitar, a temperaturii suprafeței interioare și a temperaturii suprafeței exterioare cu timpul. Figurile 4.28., 4.29. și 4.30. prezintă această variație.

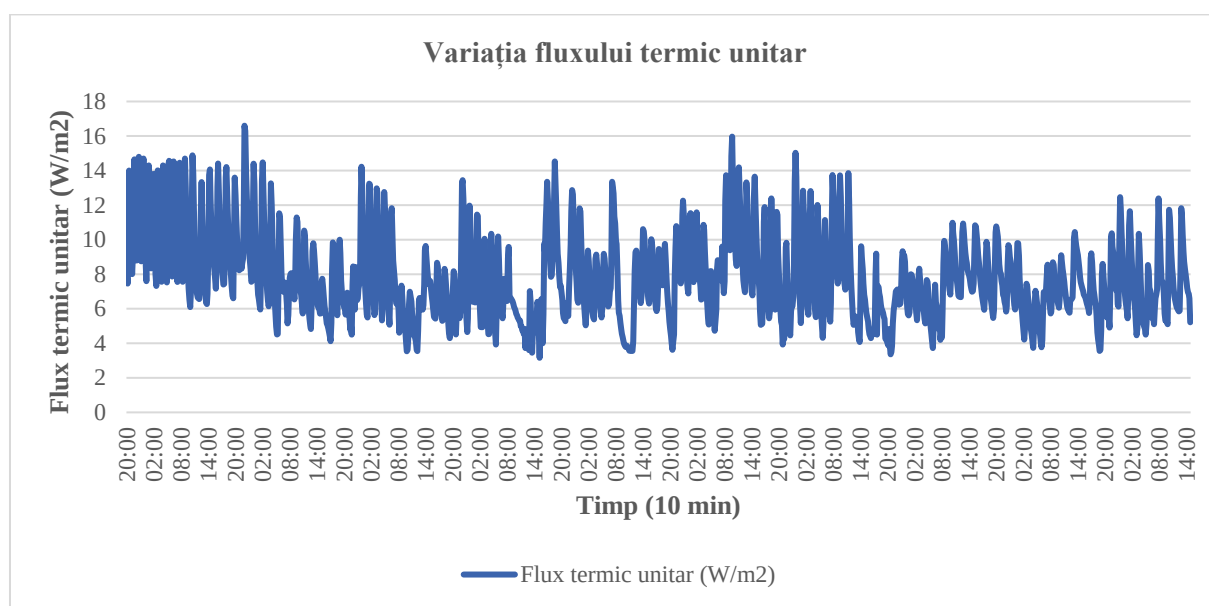


Figura 4.16. – Variația fluxului termic unitar

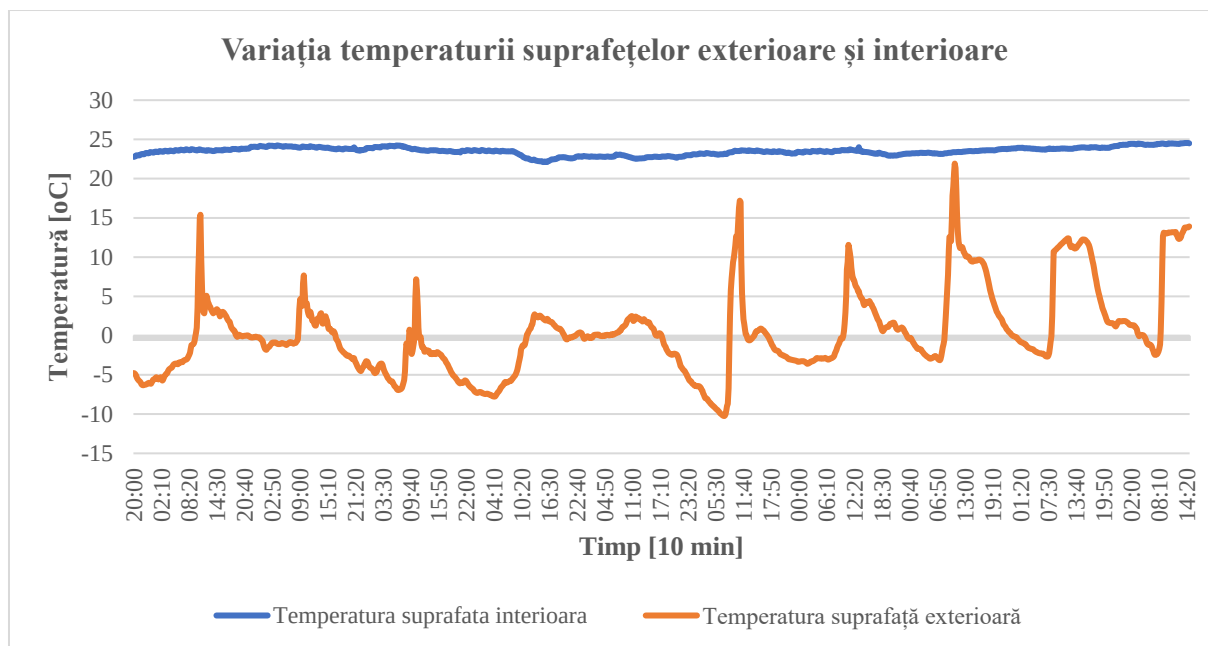


Figura 4.17. – Variația temperaturii suprafețelor

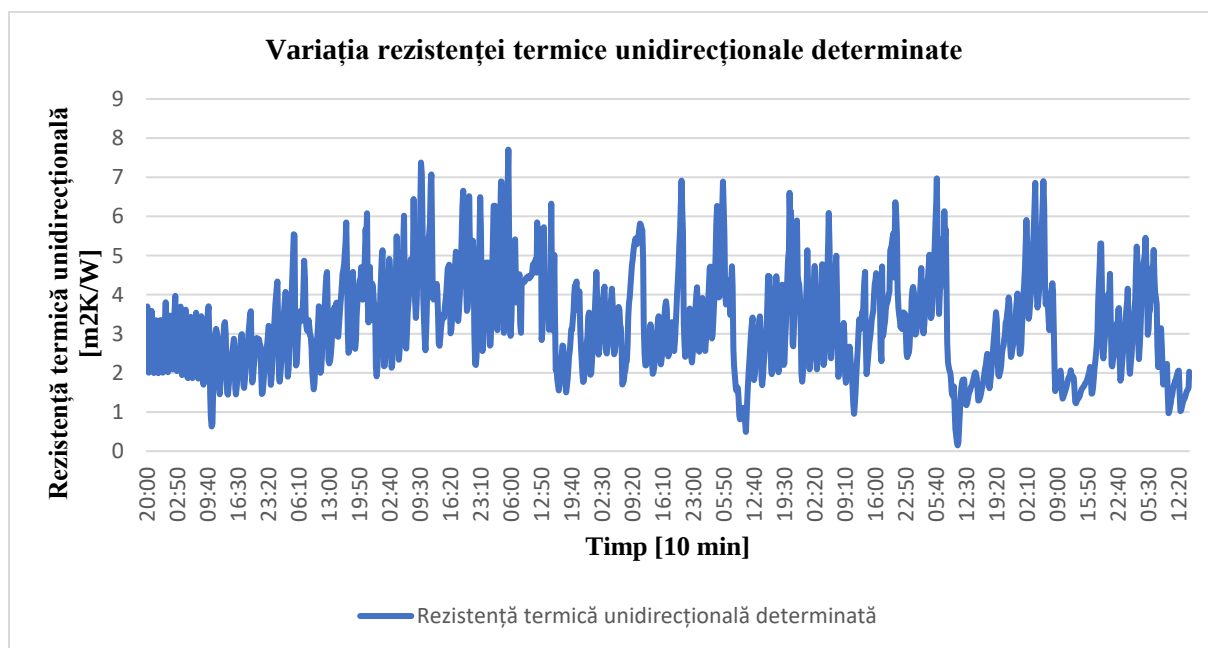


Figura 4.18. – Variația rezistenței termice unidirectionale

Pentru comparație cu valoarea rezistenței termice unidirectionale teoretice, aceasta s-a calculat conform normelor în vigoare în România.

Valoarea rezistenței termice unidirectionale teoretice a fost calculată conform relațiilor de calcul din C107-2005 „Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor” și este prezentată în Tabelul 4.3..

Tabel 4.3. – Calculul rezistenței termice unidirecționale teoretice – Studiu de caz 3

Nr. crt.	Denumire strat material	Grosime strat [m]	Conductivitate termică de calcul [W/mK]	Coeficient de majorare	Rezistență termică strat [m ² K/W]
1	Tencuială	0,03	0,93	1	0,032
2	Zidărie de cărămidă cu goluri verticale	0,25	0,46	1	0,543
4	Polistiren expandat	0,1	0,04	1	2,500
5	Tencuială minerală armată	0,005	0,93	1	0,005
Rezistență termică unidirecțională [m ² K/W]					3,081

Se poate observa că valoarea teoretică obținută prin calcul este apropiată de intervalul de valori obținut prin efectuarea măsurătorilor, diferența între media valorilor măsurate și valoarea calculată fiind de 10,03%. Pentru o înțelegere mai ușoară a datelor, Figura 4.31. prezintă ambele seturi de date sub formă de grafic.

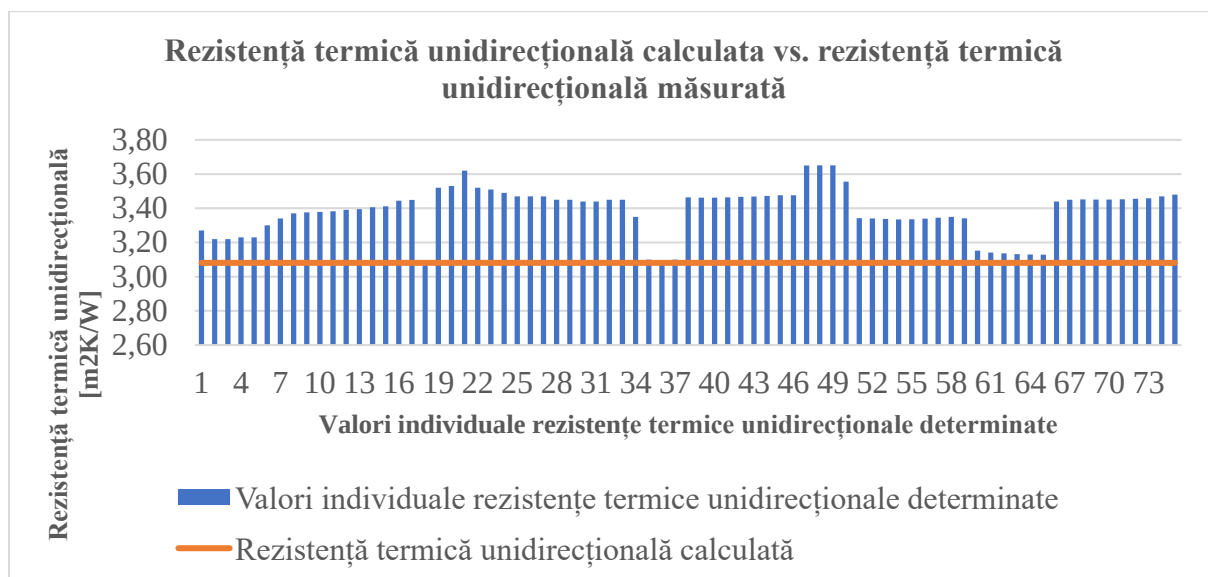


Figura 4.19. – Comparație între rezistența termică unidirecțională calculată și rezistențele termice măsurate

4.1.2 Interpretarea rezultatelor și concluzii

Analizând cele trei studii de caz care includ patru seturi de măsurători efectuate, se poate concluziona că determinarea rezistențelor termice unidirecționale in situ este un proces complex și dificil, din cauza numeroșilor factori care influențează acuratețea rezultatelor. Deși metoda oferă informații relevante privind performanța termică a unui element de construcție, obținerea unui nivel înalt de acuratețe și precizie necesar unor studii de cercetare nu se poate obține decât în condiții ideale care sunt greu de obținut în cazul măsurătorilor in situ.

În ceea ce privește diferența între valorile teoretice calculate și valorile obținute experimental se disting două cazuri, respectiv aferent studiilor de caz 1 și 3 rezistențele termice determinate în urma efectuărilor măsurătorilor sunt mai mari decât cele calculate teoretic iar în studiul de caz 2 rezistența termică calculată este mai mare decât cele determinate experimental.

În primul studiu de caz, valorile rezistențelor termice determinate se înscriu într-un intervalul larg, cuprins între $1,41 \text{ m}^2\text{K/W}$ și $2,67 \text{ m}^2\text{K/W}$, iar valoarea medie este de $2,38 \text{ m}^2\text{K/W}$, mai mare cu 29,96% față de $1,831 \text{ m}^2\text{K/W}$ valoarea calculata analitic. În studiul de caz cu numărul 2 rezistența termică unidirecțională teoretică este cu 23,15% mai mare decât valoarea medie a rezistențelor termice unidirecționale determinate experimental. În studiul experimental cu numărul 3 valoarea rezistenței termice unidirecționale calculata este mai mică cu 10% față de cea determinată în urma prelucrării datelor măsurate in situ.

Având în vedere diferențele obținute între rezistențele termice unidirecționale calculate teoretic și cele determinate în urma efectuării de măsurători in situ, problema evaluării performanței termice reale a clădirilor rămâne și este cu atât mai mult prezentă. Cu toate acestea, cunoscând foarte bine factorii care au influență asupra acurateței rezultatelor și considerându-i în pregătirea efectuării măsurătorilor, izolat se pot observa vicieri ale datelor colectate cauzate de realitatea efectuărilor de măsurători in situ.

4.2 Cercetări experimentale pentru determinarea caracteristicilor termotehnice ale izolațiilor termice

În cadrul proiectului de cercetare, s-a desfășurat un studiu experimental pentru determinarea caracteristicilor termotehnice a materialelor izolatoare termic utilizate în construcții. Acest studiu a avut ca obiectiv măsurarea in situ a performanțelor termotehnice ale izolațiilor termice, în vederea identificării eventualelor modificări a proprietăților acestora, ce pot apărea ca urmare a procesului de îmbătrânire a materialelor

4.2.1 Descrierea metodologiei de cercetare

4.2.1.1 Metodă de măsurare

Metoda utilizată constă în efectuarea de măsurători a caracteristicilor termotehnice ale materialelor izolatoare aflate în exploatare, utilizând un dispozitiv de măsurare portabil pentru evaluarea in situ. Măsurătorile au fost realizate pentru straturile termoizolatoare din polistiren expandat, care au fost puse în operă cu mai mult de cinci ani în urmă.

4.2.1.2 Dispozitivul de măsurare

Pentru efectuarea măsurătorilor a fost folosit dispozitivul ISOMET 2114, un sistem portabil care permite măsurarea in situ a unor caracteristici termotehnice a materialelor de construcție. Pentru măsurarea caracteristicilor materialelor solide dar care permit înțeparea lor, așa cum este cazul polistirenului expandat, aparatul este dotat cu o sondă sub formă de ac, care se poate introduce în probă.

4.2.2 Cercetări experimentale efectuate prin monitorizare in situ

Măsurători in situ ale caracteristicilor termotehnice s-au realizat la 17 clădiri diferite ale căror anvelope au vechimi cuprinse între 7 și 15 ani. Pentru fiecare probă de material s-au efectuat minim trei măsurători consecutive, urmărind ca diferența între valorile măsurate și media aritmetică a valorilor, să nu difere cu mai mult de 5%. Două dintre locațiile în care s-au efectuat măsurători sunt prezentate în Figurile 4.34. a și b.



(a) Fațadă cu expunere S



(b) Fațadă cu expunere SV

Figura 4.20. – Locații efectuare măsurători

Pentru fiecare din măsurătorile efectuate, a fost întocmit un raport de măsurare al caracteristicilor termotehnice. Un exemplu de raport de măsurare a caracteristicilor termotehnice, pentru una din clădirile analizate este prezentat în Figura 4.35..

RAPORT DE MĂSURARE CARACTERISTICI TERMOTEHNICE

DATE DE IDENTIFICARE TERMOSISTEM ANALIZAT				
Adresă clădire:		Bulevardul Profesor Dimitrie Mangeron nr 43, Iași		
Destinație clădire:		Clădire destinată învățământului		
Destinație spațiu:		Birou		
Orientare strat:		SV		
Vechime strat:		11 ani		
Grosime strat:		10 cm		
Degradări vizibile:		-		
DATE PRIVIND EFECTUAREA MĂSURĂTORILOR				
Dată și oră	Începere test	15:10 - 03.03.2021		
	Sfârșit test	16:50 - 03.03.2021		
Locație efectuare măsurători:				
Aparat de măsurare:		ISOMET 2114		
REZULTATE		Coeficient de conductivitate termică [W/mK]	Capacitate de căldură volumetrică 10 ⁶ [J/m ³ K]	Difuzivitate termică 10 ⁻⁶ [m ² /s]
Măsurătoare:	1	0,0412	0,0293	1,4049
	2	0,0408	0,0295	1,3842
	3	0,0414	0,0288	1,4403
Valoare medie:		0,0411	0,292	1,4098
Eroare [%]		0,472%	0,727%	1,163%

Figura 4.21. – Exemplu raport de măsurare

4.2.3 Rezultate obținute în cercetările experimentale

Centralizarea și organizarea datelor experimentale obținute în urma măsurărilor caracteristicilor termotehnice ale clădirilor s-a realizat sub formă tabelară, respectiv Tabelul 4.4. Acest tabel oferă o perspectivă detaliată asupra caracteristicilor termotehnice ale unui set de clădiri analizate, fiecare dintre acestea având diferite orientări, vechimi ale termoizolațiilor și grosimi ale acestora. În tabel sunt incluse valorile medii ale celor trei măsurători efectuate pentru fiecare clădire în parte, măsurători care s-au axat pe determinarea coeficientului de conductivitate termică, a capacității de căldură volumetrică și a difuzivității termice ale materialelor izolatoare, date esențiale pentru evaluarea performanței termice a materialelor termoizolante utilizate în domeniul construcțiilor.

Tabel 4.4. – Centralizator caracteristici termotehnice măsurate (valori medii)

Nr. crt.	Orientare	Vechime [ani]	Grosime [cm]	Coeficient de conductivitate termică [W/mK]	Capacitate de căldură volumetrică 10^6 [J/m ³ K]	Difuzivitate termică 10^{-6} [m ² /s]
Clădire 1	SE	11	10	0,0509	0,036	1,406
Clădire 2	NE	13	5	0,0481	0,042	1,138
Clădire 3	NE	13	5	0,0505	0,038	1,313
Clădire 4	N	11	10	0,0359	0,038	0,939
Clădire 5	SV	11	10	0,0411	0,029	1,410
Clădire 6	NE	13	10	0,0408	0,030	1,366
Clădire 7	S	13	5	0,0441	0,031	1,444
Clădire 8	E	9	10	0,0439	0,028	1,582
Clădire 9	NE	15	5	0,0418	0,033	1,253
Clădire 10	SV	15	5	0,0464	0,029	1,574
Clădire 11	NE	8	10	0,0342	0,033	1,029
Clădire 12	V	7	10	0,0377	0,027	1,385
Clădire 13	NE	8	5	0,0427	0,031	1,362
Clădire 14	NV	8	5	0,0505	0,036	1,406
Clădire 15	NE	7	10	0,0346	0,032	1,072
Clădire 16	SV	12	5	0,0435	0,029	1,499
Clădire 17	N	8	10	0,0409	0,032	1,289

Pentru analizarea și înțelegerea facilă a acestora au fost realizate reprezentări grafice care să prezinte variația valorilor caracteristicilor termotehnice măsurate. Figura 4.36. prezintă variația coeficientului de conductivitate termică pentru diferite clădiri, indicând rezultatele medii ale măsurătorilor individuale realizate în fiecare caz. În continuare, figurile 4.37. și 4.38. prezintă variațiile capacității de căldură volumetrică și difuzivitate termică.

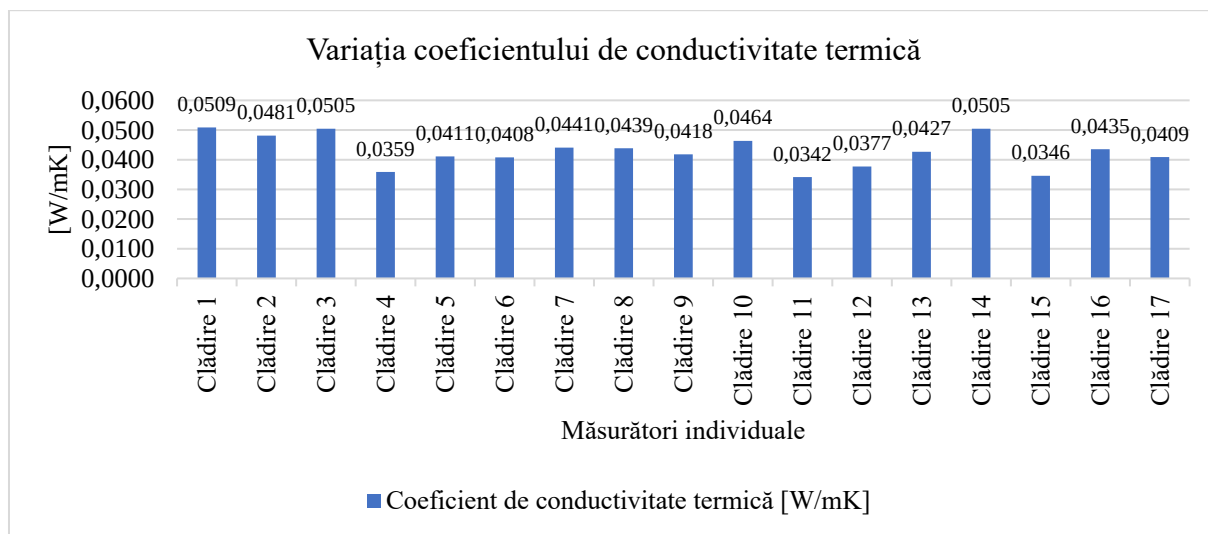


Figura 4.22. - Variația coeficientului de conductivitate termică

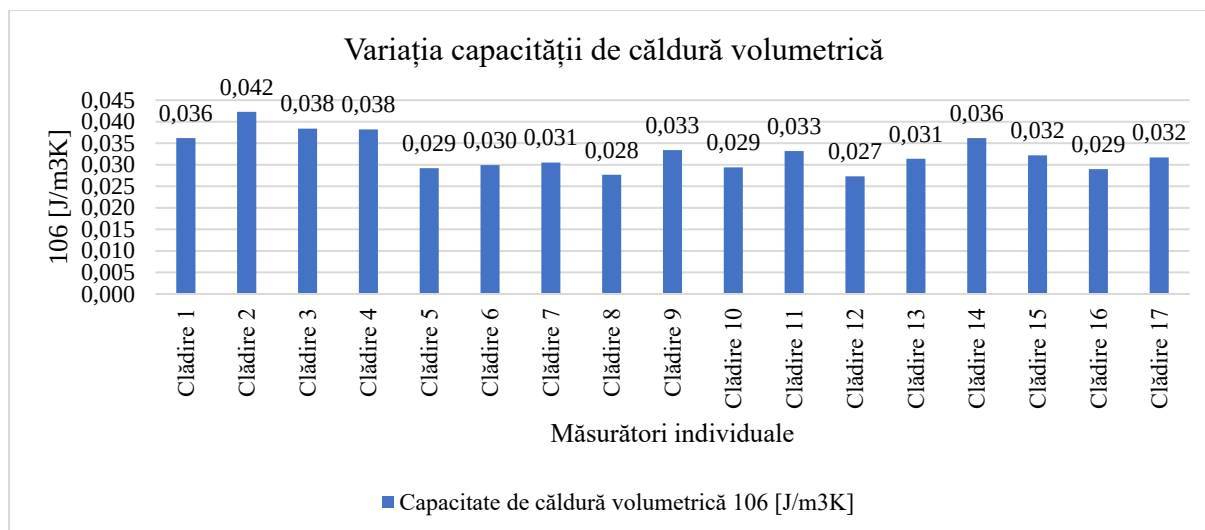


Figura 4.23. - Variația capacității de căldură volumetrică

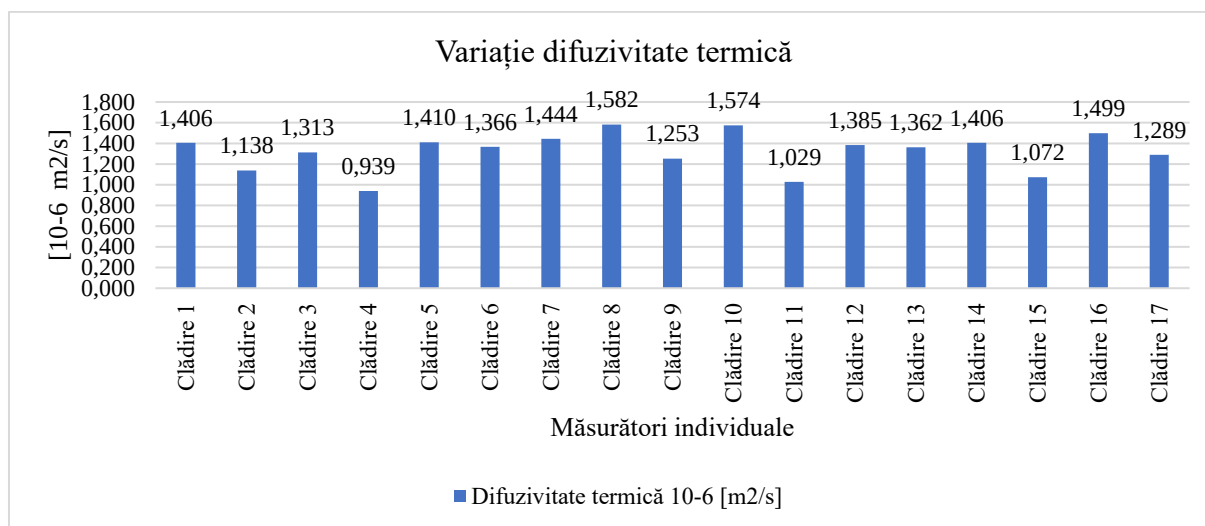


Figura 4.24. - Variația difuzivității termice

4.2.4 Interpretarea rezultatelor și concluzii

Determinarea caracteristicilor termotehnice ale materialelor termoizolante prin măsurători in situ, utilizând dispozitive portabile, poate reprezenta o modalitate eficientă și practică pentru evaluarea performanței termice a unui material la un anumit moment. Această metodă are avantajul de a fi relativ simplu de aplicat și de a oferi rezultate directe asupra caracteristicilor unui material în contextul său de utilizare. Totuși, trebuie subliniat faptul că aplicabilitatea acestei metode nu este universală și poate fi influențată de o serie de factori care limitează acuratețea măsurătorilor.

În ceea ce privește rezultatele obținute, s-a observat o variație importantă a coeficientului de conductivitate termică, diferența între valoarea minimă și maximă măsurată

fiind de 47,66%. Media valorilor coeficientului de conductivitate termică măsurat este de 0,0428 W/mK, valoare care este foarte apropiată de valoarea normată de 0,042 W/mK, dacă este considerat un material cu un coeficient de conductivitate termică de 0,04 W/mK afectat cu coeficient de majorare de 1,05 pentru polistiren expandat în stare uscată cu vechime mai mare de 10 ani. Analizând datele nu a putut fi stabilită o legătură de cauzalitate între vechimea materialului și valoarea coeficientului de conductivitate termică. De asemenea, nici între expunerea către o anumită orientare a materialului și valoarea coeficientului de conductivitate termică nu a putu fi stabilită o relație directă. Având în vedere influența semnificativă pe care coeficientul de conductivitate termică o are asupra determinării rezistenței termice unidirecționale, se recomandă ca această caracteristică să fie măsurată înainte de efectuarea oricăror alte analize termotehnice. Astfel, determinarea inițială a coeficientului de conductivitate termică asigură o bază solidă pentru evaluarea corectă a performanței termice a materialelor și contribuie la minimizarea erorilor în interpretarea ulterioară a rezultatelor.

Analiza valorilor difuzivității termice arată o variație procentuală semnificativă între valorile minime și maxime măsurate, diferența fiind de 68,48%, de la un minim de $0,939 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Clădirea 4) la un maxim de $1,582 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Clădirea 8). Media valorilor difuzivității termice pentru ansamblul clădirilor analizate este de $1,322 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

În ceea ce privește capacitatea de căldură volumetrică, diferența procentuală dintre valorile extreme este de 55,56%, variind de la o valoare minimă de $0,027 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ (Clădirea 12) la o valoare maximă de $0,042 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ (Clădirea 2). Media capacității de căldură volumetrică pentru clădirile studiate este de aproximativ $0,033 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$.

Capitolul 5 - CERCETĂRI EXPERIMENTALE PENTRU DETERMINAREA VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ ȘI UMIDITATE RELATIVĂ LA ELEMENTELE DE ANVELOPĂ ALE CLĂDIRILOR

5.1 Metodologie de cercetare

Studiile experimentale pentru determinarea variațiilor de temperatură și umiditate relativă au implicat o monitorizare detaliată a acestor parametri pe mai multe suprafețe ale elementelor de construcție analizate. În mod specific, s-au monitorizat atât temperatura, cât și umiditatea relativă pe suprafețele interioare și exterioare ale elementului, precum și pe suprafața stratului de izolație termică aflat spre interiorul clădirilor.

5.1.1 Metodologia de monitorizare in situ

5.1.1.1 Metodă de măsurare

Metoda de investigare constă în efectuarea unor măsurători succesive și repetate, la intervale de timp regulate de 15 minute, pentru a înregistra variațiile de temperatură și umiditate relativă în timp. Aceste măsurători sunt realizate cu ajutorul unor senzori de înaltă precizie, care sunt montați direct pe suprafețele elementelor de construcție de tip pereți.

5.1.1.2 Dispozitivul de măsurare

Pentru efectuarea măsurătorilor de temperatură și umiditate relativă au fost utilizați senzori de tip LogTag Recorders HAXO-8, care au capacitatea de a înregistra date într-un interval larg de valori. Figura 5.1. ilustrează tipul de senzor utilizat.

5.1.2 Prezentare studiu experimental

Pentru a monitoriza temperatura suprafețelor și umiditatea relativă la elementele de construcție de tip perete, s-au efectuat măsurători în situ folosind câte trei senzori pentru fiecare dintre cele trei elemente de anvelopă analizate, pentru care s-au realizat măsurători de rezistențe termice unidirecționale prin metoda termofluxmetrică. Senzorii au fost amplasați în zone de câmp curent, pe aceeași linie, pentru fiecare dintre pereți, astfel încât să asigure o monitorizare coerentă și reprezentativă a variațiilor termice și de umiditate pe întreaga grosime a elementului de construcție.

La interior, senzori au fost fixați într-un suport special, montat direct pe perete, conform Figurii 5.2.. Pentru montarea senzorilor de măsurare a temperaturii și umidității pe suprafața interioară a stratului de termoizolație, în toate cele trei cazuri studiate, s-a procedat la realizarea unor decupaje în polistirenul expandat care constituie materialul termoizolant. La exterior, pentru a proteja senzorii de influențele directe ale radiației solare și pentru a preveni expunerea acestora la condiții meteorologice extreme care ar putea afecta acuratețea măsurătorilor, s-a utilizat un capac de protecție din plastic.

5.2 Prezentare rezultate studiu experimental

Datele măsurate se vor prezenta sub forma unor grafice, care fac posibilă o înțelegere mai ușoară a fenomenelor higrtermice. În cadrul primului studiu de caz, variațiile valorilor măsurate sunt reprezentate grafic în Figurile 5.5. și 5.6..

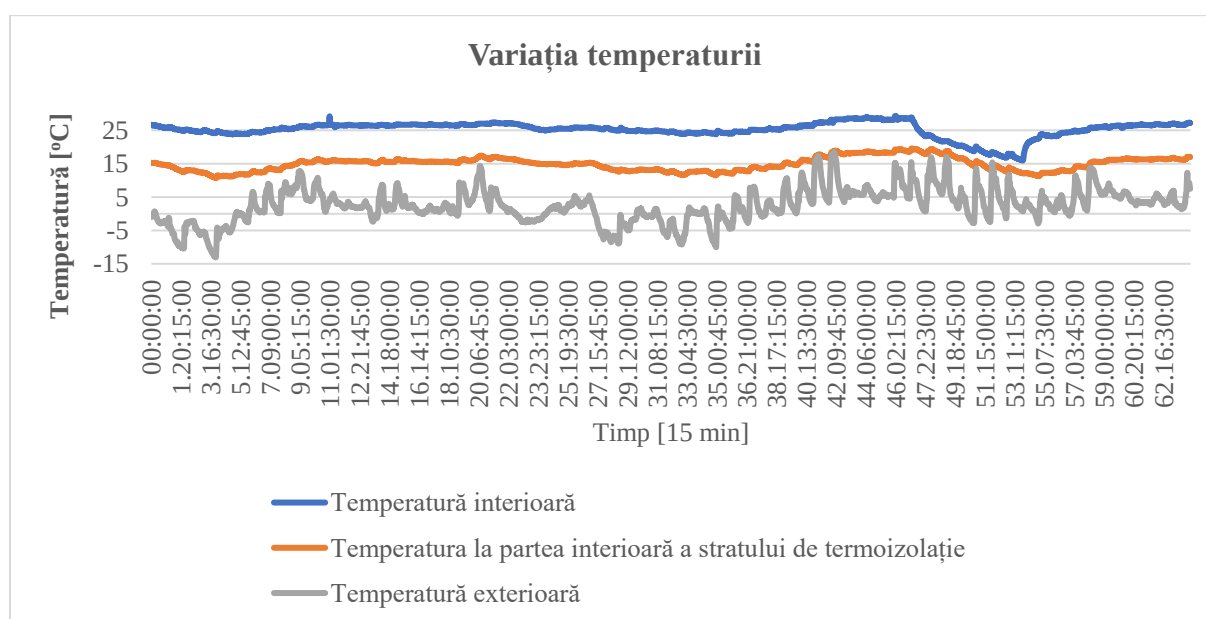


Figura 5.1. - Variația temperaturii – Studiu de caz 1

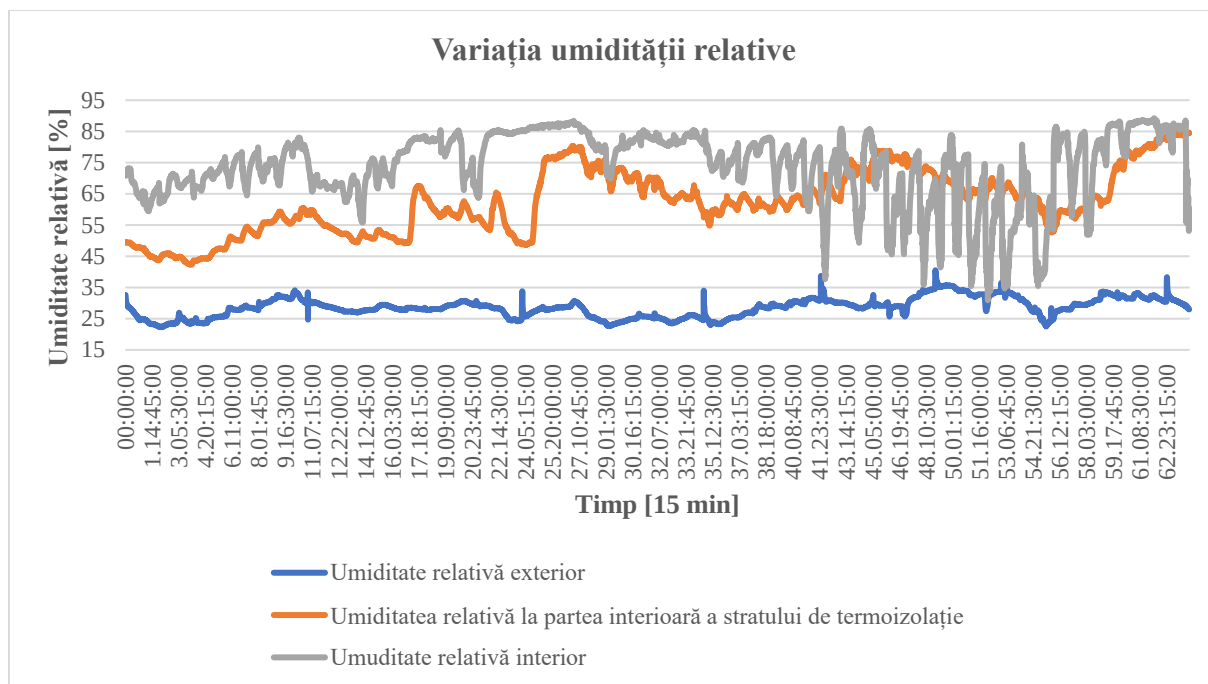


Figura 5.2. - Variația umidității relative – Studiu de caz 1

Pentru studiul de caz numărul doi, variația valorilor temperaturilor și a umidității relative înregistrate în raport cu timpul este prezentată în Figurile 5.7. și 5.8..

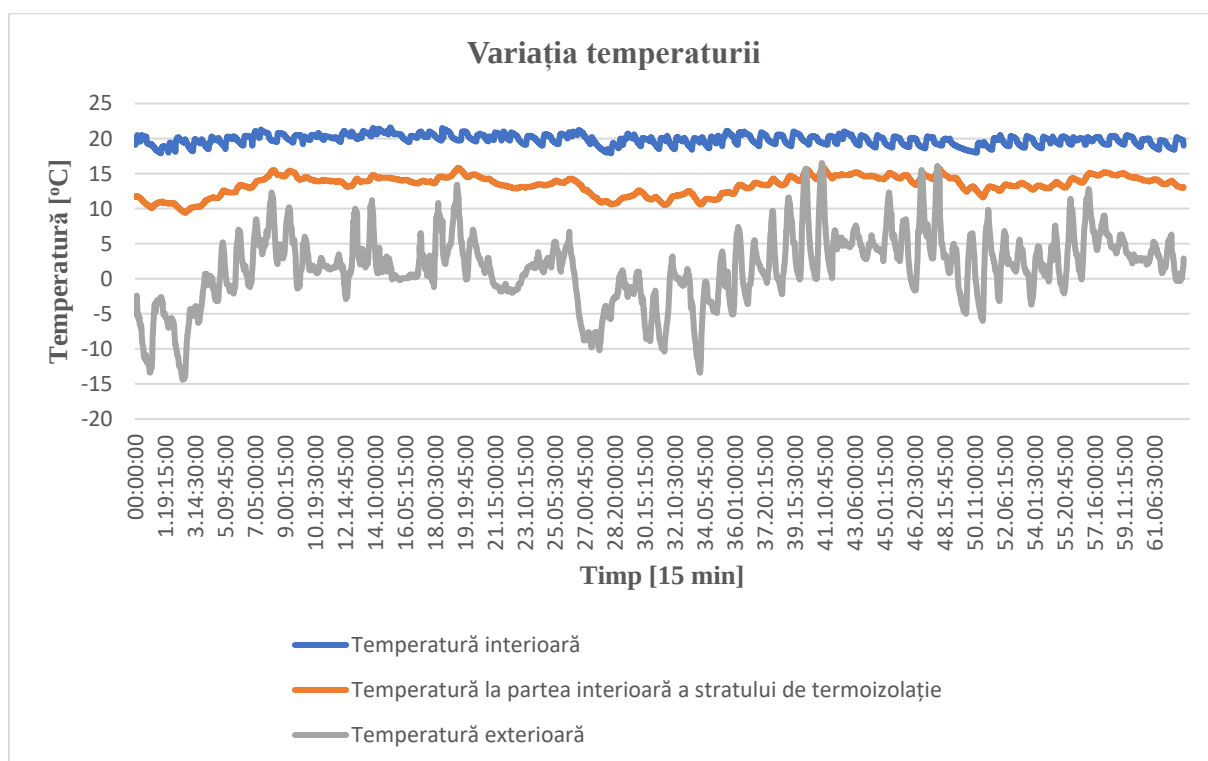


Figura 5.3. - Variația temperaturii – Studiu de caz 2

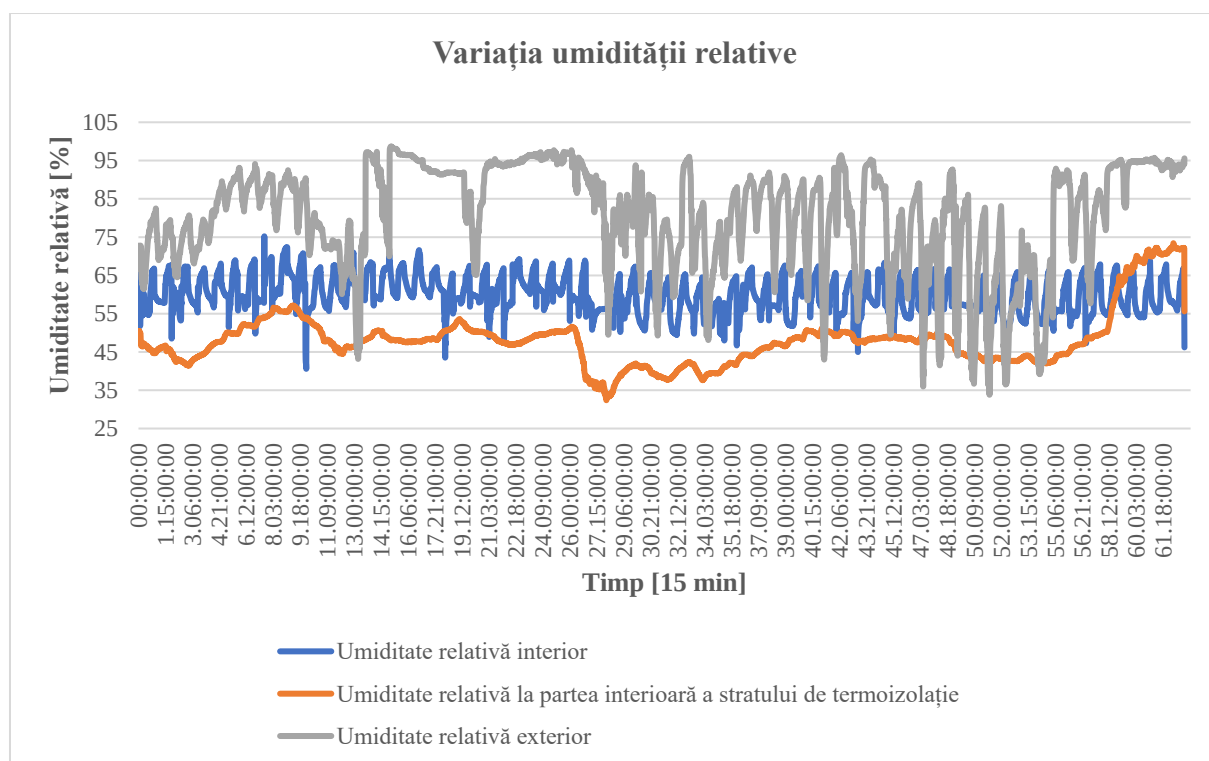


Figura 5.4. - Variația umidității relative – Studiu de caz 2

Pentru studiul de caz numărul trei, variația valorilor înregistrate este prezentată în Figurile 5.9. și 5.10..

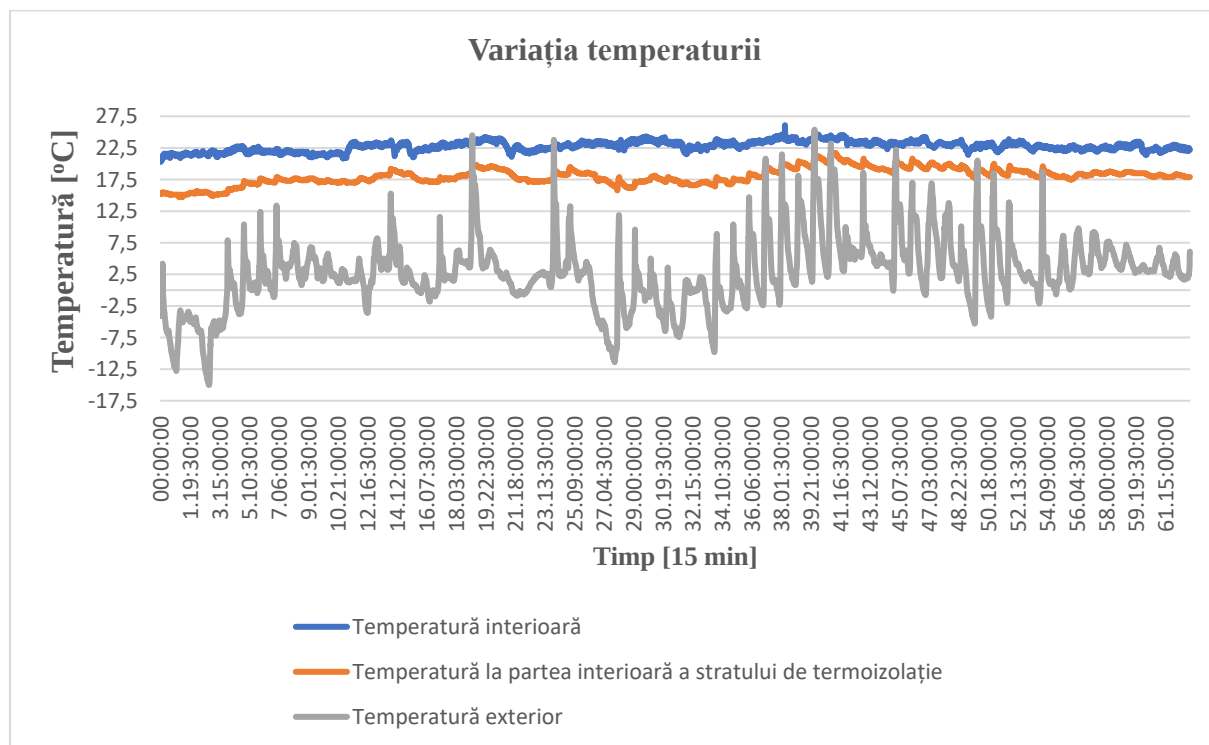


Figura 5.5. - Variația temperaturii – Studiu de caz 3

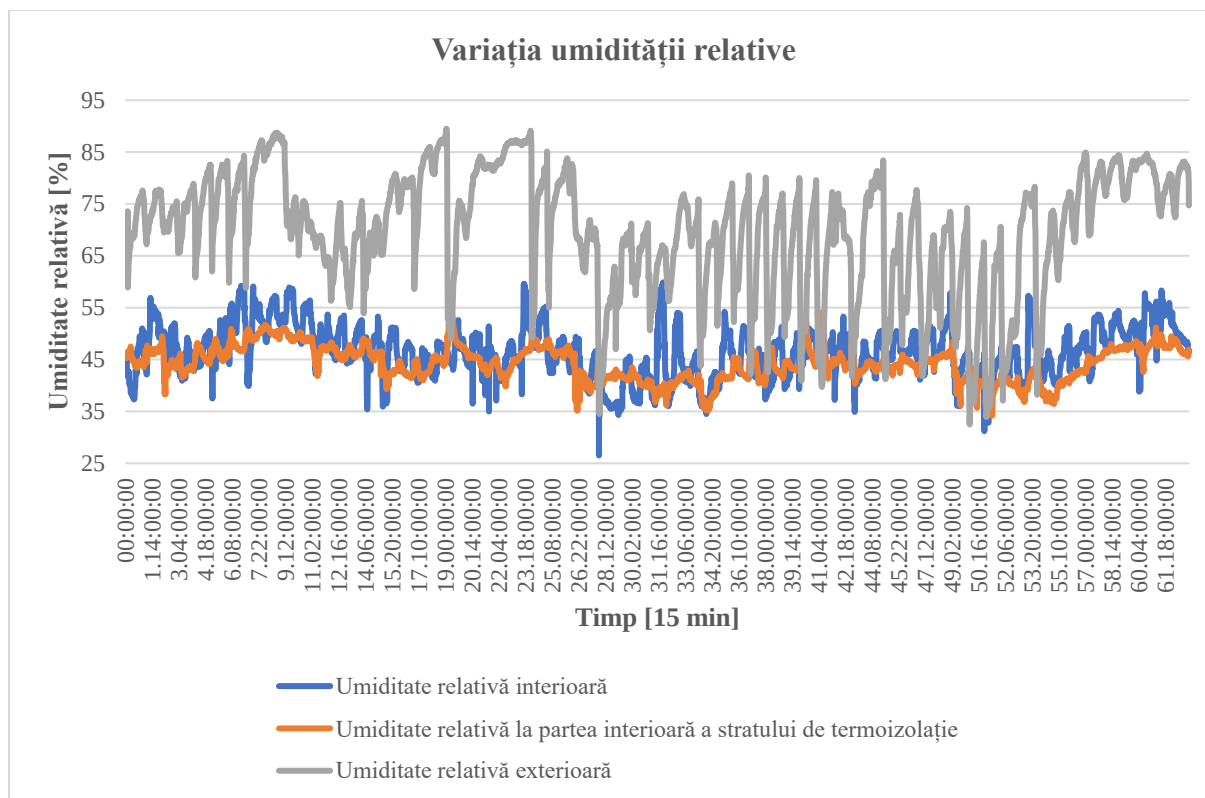


Figura 5.6. - Variația umidității relative – Studiu de caz 3

5.3 Determinarea analitică a temperaturilor suprafețelor

Pornind de la temperaturile determinate experimental ale suprafețelor exterioare și interioare ale elementului și considerând rezistența totală și rezistențele termice ale straturilor determinate teoretic în Tabelele 4.1., 4.2. și 4.3., pentru fiecare set de date de temperaturi de pe suprafața interioară și cea exterioară a fost calculată analitic temperatura pe suprafața interioară a stratului de termoizolație termică. Acest lucru a fost realizat pentru compararea cu datele colectate experimental și identificarea eventualelor diferențe, în vederea înțelegerii comportamentului termic real al elementelor de construcție.

Datele privind temperatura calculată pe suprafața interioară a stratului din polistiren expandat și cea măsurată se vor prezenta separat pentru cele trei studii de caz sub forma unor grafice, care fac posibilă o înțelegere mai ușoară a diferențelor între cele două seturi de valori. În cadrul primului studiu de caz, variațiile valorilor măsurate și calculate sunt reprezentate grafic în Figura 5.11..

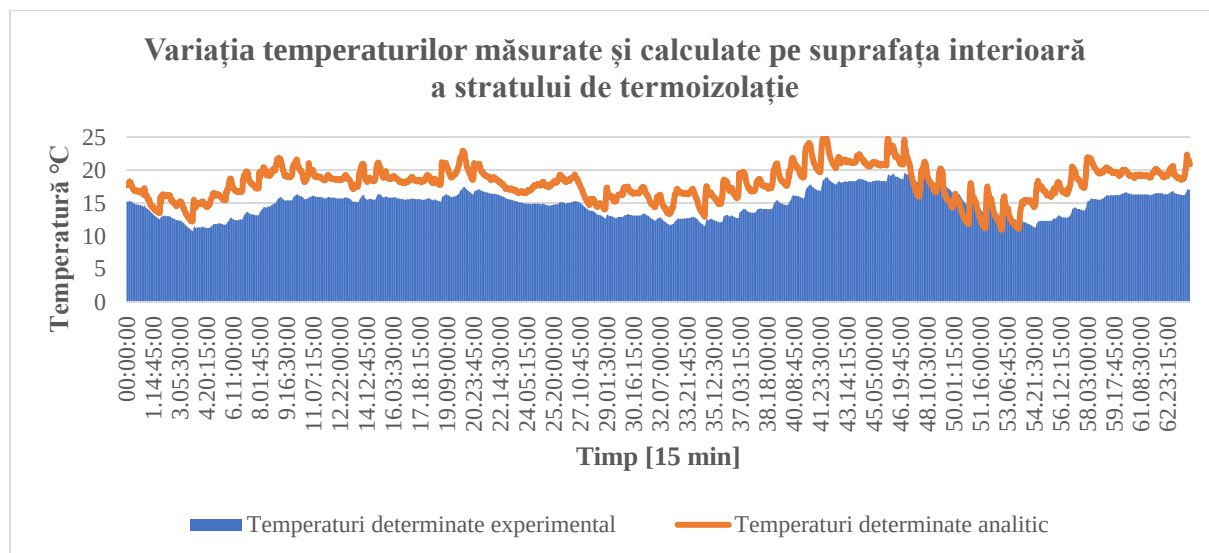


Figura 5.7. Variația temperaturilor măsurate și calculate pe suprafața interioară a stratului de termoizolație – Studiu de caz 1

Variația valorilor măsurate și calculate ale temperaturii suprafeței interioare a stratului de izolație termică pentru studiul de caz 2 este prezentată sub forma unei reprezentări grafice în Figura 5.12..

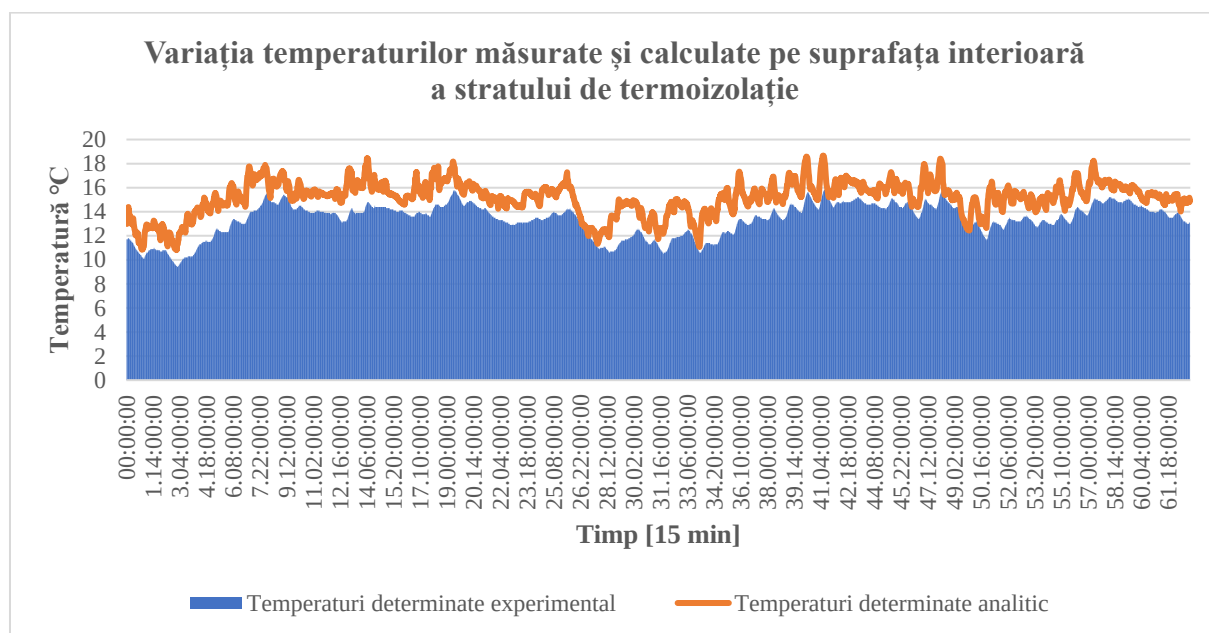


Figura 5.8. Variația temperaturilor măsurate și calculate pe suprafața interioară a stratului de termoizolație – Studiu de caz 2

Variația valorilor măsurate și calculate ale temperaturii suprafeței interioare a stratului de izolație termică pentru studiul de caz 3, este prezentată sub forma unei reprezentări grafice în Figura 5.13..

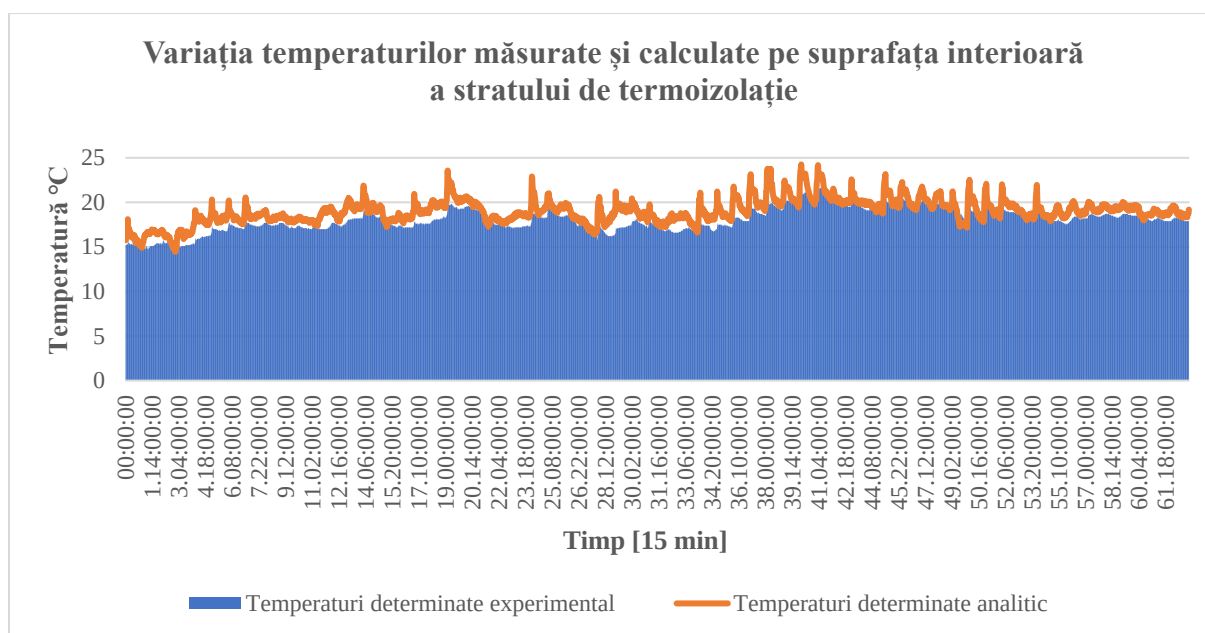


Figura 5.9. Variația temperaturilor măsurate și calculate pe suprafața interioară a stratului de termoizolație – Studiu de caz 3

5.4 Interpretarea rezultatelor și concluzii

Metoda monitorizării variației temperaturii și umidității la nivelul elementelor de construcție in situ poate constitui un mijloc eficient de caracterizare higrotermică și de evaluare a performanței energetice a unui element într-un moment specific al exploatării. Deși aceasta nu se caracterizează printr-o complexitate ridicată, intervențiile necesare asupra elementului de anvelopă o clasifică drept o metodă distructivă, limitându-i astfel o largă aplicabilitate. De asemenea, metoda implică și utilizarea unor echipamente care permit măsurarea și înregistrarea datelor la intervale programabile de timp.

Analiza valorilor arată o variație semnificativă a temperaturilor medii interioare, acestea fiind cuprinse între 19,80°C și 25,20°C, în contextul în care temperatura de referință pentru încăperile studiate este de 20°C. Astfel, în studiile de caz 3 și 1, valorile medii ale temperaturilor interioare depășesc temperatura normată cu 14%, respectiv 26%, în timp ce în studiul de caz 2, temperatura medie înregistrată este cu 1% mai mică decât cea normată. Aceste constatări subliniază din nou dificultatea estimării consumului real de energie și evidențiază necesitatea utilizării unor sisteme inteligente de management al încălzirii, precum și importanța sensibilizării utilizatorilor clădirilor cu privire la impactul lor asupra creșterii consumului de energie și emisiilor de gaze cu efect de seră.

În ceea ce privește diferențele între valorile măsurate și cele determinate analitic, analizând cele trei grafice (Figurile 5.11., 5.12. și 5.13.) care ilustrează variația temperaturilor măsurate și calculate pe suprafața interioară a stratului de termoizolație, se constată existența unor diferențe semnificative între valorile experimentale și cele analitice. În toate cazurile, temperaturile calculate analitic sunt mai mari decât cele măsurate experimental, sugerând posibile limitări ale modelului teoretic de calcul sau o performanță termică mai slabă a izolației în condiții reale decât cea estimată teoretic. Primul grafic, aferent studiului de caz cu numărul 1, indică fluctuații mai mari ale temperaturilor măsurate, sugerând un comportament termic mai instabil, cauzat de grosimea mai mică a termoizolației (5 cm). Al doilea grafic și cel de-al treilea prezintă variații mai mici ale temperaturilor măsurate, ceea ce indică o performanță termică superioară a elementului analizat, straturile de termoizolație având o grosime de 10 cm.

Valorile umidității relative înregistrate pe suprafața interioară a elementelor arată diferențe semnificative între cazuri, acestea fiind cauzate de condițiile diferite de utilizare și ventilare. Media valorilor umidității relative pentru suprafața interioară a elementelor este de 28,60% în cazul primului studiu de caz, de 46,50% în cazul celui de al doilea studiu de caz și de 59,80% în cazul ultimului studiu de caz. Considerând că umiditatea relativă recomandată în cazul birourilor și al dormitoarelor se situează în intervalul 40%-60%, se poate observa că valoarea medie a umidității relative din studiul de caz 1 este în afara intervalului, iar valoarea specifică cazului al doilea este apropiată de limită superioară a intervalului recomandat.

În ceea ce privește valorile umidității relative înregistrate pe suprafața interioară a polistirenului expandat, se poate observa că în studiul de caz cu numărul 1 acestea sunt mai mari decât valorile umidității relative de la interior, acest fapt sugerând o tendință de acumulare a vaporilor în stratul de termoizolație și un risc crescut de apariție a condensului. În celelalte două studii de caz, valorile umidității relative de pe suprafața interioară a termoizolației sunt mai mici decât valorile umidității relative de la interior, dar cu toate acestea în studiul de caz 3 sunt măsurate vârfuri de valori ale umidității relative care depășesc 60%, ceea ce indică riscul acumulării de apă în stratul termoizolant.

Capitolul 6 - CERCETĂRI DE LABORATOR PRIVIND DETERMINAREA EFECTULUI EXPUNERII LA CICLURILE MEDIULUI EXTERIOR ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FIZICE ALE POLISTIRENULUI EXPANDAT

Prezentul capitol se concentrează pe investigarea influenței pe care o au ciclurile variabile ale mediului exterior asupra proprietăților termice și mecanice ale polistirenului expandat. Studiul experimental urmărește să evidențieze modul în care factorii externi, cum ar fi ciclurile de îngheț-dezgheț, influențează proprietățile fizice și termice ale polistirenului expandat utilizat ca material de izolație termică. Prin aceste cercetări, se urmărește o înțelegere mai profundă a durabilității polistirenului expandat și a modului în care acesta își păstrează sau își pierde anumite proprietăți în condiții de utilizare pe termen lung, sub expunerea la mediul exterior.

6.1 Metodologia de efectuare a cercetărilor de laborator

6.1.1 Metodologia de încercare

În cadrul programului de cercetare, măsurătorile efectuate au fost realizate în acord cu prevederile și procedurile stabilite de standardul ASTM C1512-10 (2020), asigurând astfel acuratețea și relevanța datelor obținute pentru evaluarea performanței termice și a altor caracteristici ale polistirenului expandat sub influența expunerii la ciclurile mediului exterior. Acest tip de cercetare permite o mai bună înțelegere a comportamentului materialelor utilizate

ca termoizolații în condiții de utilizare reale, contribuind astfel la îmbunătățirea durabilității și eficienței acestora.

6.1.2 *Dispozitive și echipamente utilizate*

Pentru realizarea testărilor experimentale, s-a utilizat o cameră climatică dublă de tip Feutron Klimasimulation GmbH – Twin Test Climate Chamber, concepută special pentru a simula diverse condiții de mediu. Această cameră climatică este alcătuită din două compartimente separate, unul destinat menținerii unor temperaturi scăzute (cameră rece) și altul pentru temperaturi ridicate (cameră caldă). Cele două camere sunt despărțite de un perete comun mobil, pe care se montează probele de material supuse testării. Această configurație permite expunerea controlată a probelor la condiții diferite pe fiecare față a acestora, asigurând posibilitatea unei evaluări a performanței materialelor în contextul variațiilor de mediu.

Pentru determinarea coeficientului de conductivitate termică a materialelor testate a fost utilizat un dispozitiv specializat de măsurare, ISOMET 2114, care este un instrument portabil conceput pentru evaluarea caracteristicilor termotehnice ale diverselor materiale. Acest sistem de măsurare se bazează pe o metodă de tip dinamic, efectuând măsurători în regim tranzitoriu, ceea ce permite o analiză detaliată și rapidă a comportamentului termic al materialelor.

Testarea comportamentului la compresiune al probelor a fost efectuată în conformitate cu standardul SR EN 826:2013 – „Produse termoizolante destinate utilizării la clădiri. Determinarea comportării la compresiune.” Standardul oferă metodologia și cerințele necesare pentru evaluarea comportamentului materialelor termoizolante sub sarcină de compresiune. Figura 6.3. prezintă echipamentul utilizat pentru realizarea testării comportamentului la compresiune a materialelor testate.

6.2 **Descrierea studiului experimental de laborator**

Pentru a determina efectul expunerii la condiții de mediu ciclice asupra performanței termice a polistirenului expandat, s-a realizat o testare a materialului în conformitate cu standardul ASTM C1512-10 (2020), intitulat “Standard Test Method for Characterizing the Effect of Exposure to Environmental Cycling on Thermal Performance of Insulation Products”. Studiul a urmărit evaluarea influenței procesului de îmbătrânire a materialului asupra coeficientului de conductivitate termică, precum și analiza altor modificări fizice și structurale ale probelor testate.

Au fost utilizate trei probe de polistiren expandat, fiecare având dimensiunile de 380 x 180 x 30 mm, iar pentru a asigura condiții optime de desfășurare a experimentului, aceste probe au fost montate într-un cadru confecționat din polistiren extrudat, având aceeași grosime ca cea a probelor analizate.

Testarea a fost realizată în conformitate cu standardul specificat, desfășurându-se în două etape distincte: etapa de condiționare și etapa de expunere la condiții climatice ciclice de tip îngheț-dezghet.

6.3 Rezultatele cercetărilor de laborator

6.3.1 Influența expunerii asupra coeficientului de conductivitate termică

În conformitate cu prescripțiile standardului, s-au efectuat măsurători ale coeficientului de conductivitate termică pentru cele trei probe atât înainte, cât și după expunerea la condițiile de mediu. Pentru fiecare probă au fost realizate trei măsurători distincte, după ce acestea au fost supuse unui ciclu de condiționare de 48 de ore la o temperatură controlată de 23°C și o umiditate relativă de 50%. Acest ciclu de condiționare este esențial pentru stabilizarea probelor înainte de testare, asigurând acuratețea rezultatelor. După etapa de condiționare, fiecare probă a fost, de asemenea, cântărită pentru a înregistra eventuale variații de greutate. Pentru o înțelegere mai ușoară a datelor variația valorilor este prezentată și sub formă grafică în Figurile 6.7. și 6.8..

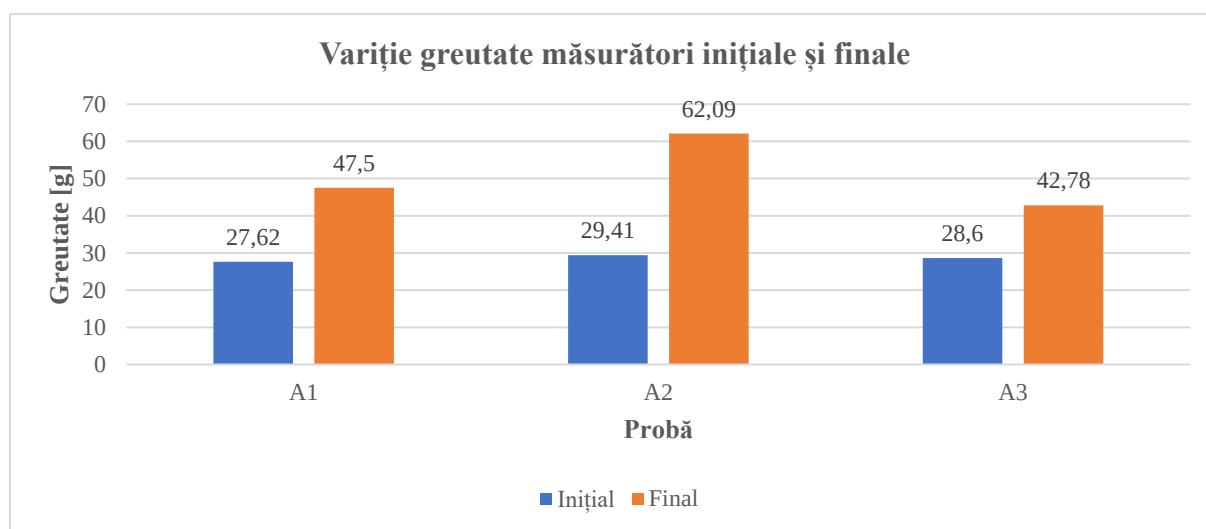


Figura 6.1. – Variație greutate probe măsurători inițiale și finale

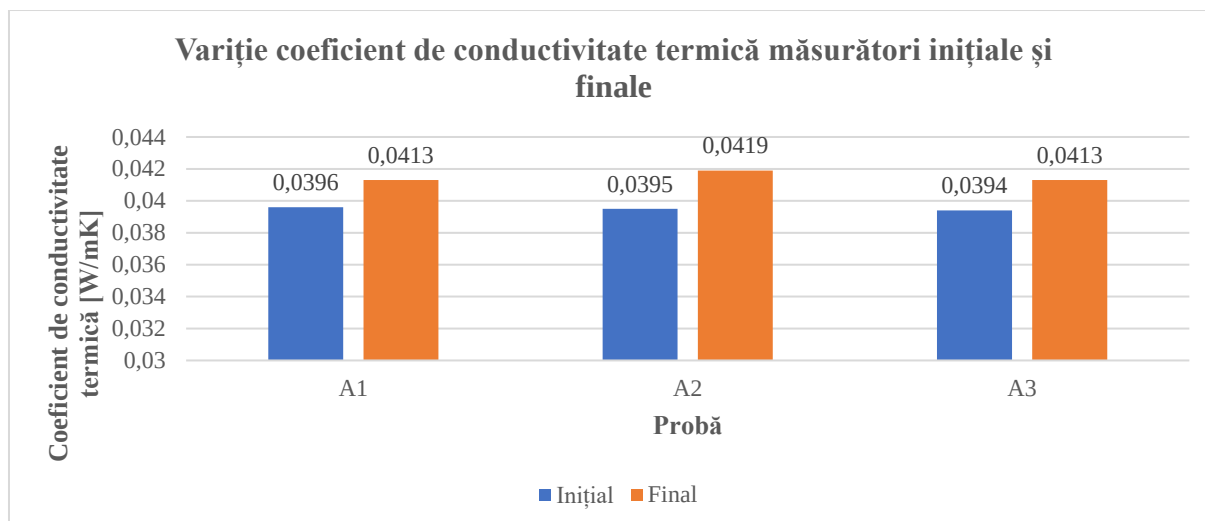
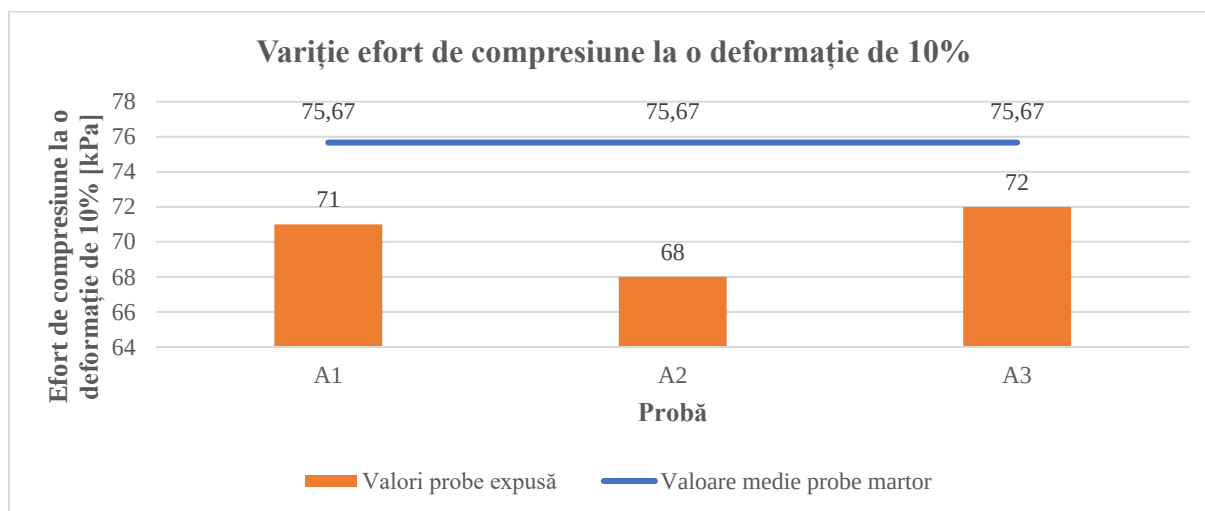


Figura 6.2. - Variație coeficient de conductivitate termică probe măsurători inițiale și finale

6.3.2 Influența expunerii asupra caracteristicilor mecanice

Conform recomandărilor standardului ASTM C1512-10 (2020), au fost realizate încercări pentru determinarea efortului de compresiune la o deformare de 10% pentru cele 3 probe expuse și pentru trei probe martor. Variația efortului de compresiune la o deformare de 10% pentru probele expuse condițiilor ciclice de mediu este reprezentată grafic, comparativ cu media valorilor probelor martor, în Figura 6.9..



Figură 6.3 – Variația efortului de compresiune la o deformare de 10% în cazul probelor expuse condițiilor mediului exterior.

6.3.3 Influența expunerii asupra stabilității dimensionale

Cele trei probe supuse analizei au fost realizate având dimensiuni identice, respectiv 380 x 180 x 30 mm. După finalizarea testării, probele au fost măsurate din nou pentru a identifica eventualele modificări ale dimensiunilor lor. Aceste măsurători au relevat modificări dimensionale, indicând posibile efecte ale expunerii la condițiile experimentale asupra stabilității dimensionale. O sinteză a măsurătorilor efectuate înainte și după testare este prezentată în Tabelul 6.5., oferind o perspectivă asupra modificărilor.

Tabel 6.1. – Sinteza rezultatelor modificărilor caracteristici geometrice

Dimensiuni	Valori inițiale	Valori finale		
		[mm]		
Probă	A1 - A2 - A3	A1	A2	A3
Lungime	380	377	378	380
Lățime	180	176	185	180
Grosime	30	30	30	30

6.4 Interpretarea rezultatelor și concluzii

Metoda de determinare a efectului expunerii la cicluri de condiții de mediu exterior asupra performanței termice a materialelor termoizolatoare constituie o abordare detaliată pentru caracterizarea materialelor termoizolatoare în ceea ce privește capacitatea lor de a-și menține performanța termică în condiții climatice variabile.

Analizând datele, se observă o creștere semnificativă a greutateii probelor după expunerea la condiții ciclice. Valorile inițiale ale greutateii probelor variază între 27,62 g și 29,41 g, în timp ce valorile finale după expunere variază între 42,78 g și 62,09 g. Diferențele procentuale ale greutateii variază semnificativ, de la +49,58% pentru proba A3 la +111,12% pentru proba A2, cu o valoare medie de creștere de +77,56%. Această variabilitate sugerează că răspunsul materialului la ciclurile de îngheț-dezgheț nu este constant și că pot exista diferențe în structura internă a materialului sau în distribuția densității, care ar putea influența absorbția apei.

Valorile coeficientului de conductivitate termică pentru cele trei probe, indică o creștere a acestui coeficient după expunerea la condiții de îngheț-dezgheț. Valorile inițiale ale coeficientului variază între 0,0393 W/mK și 0,0396 W/mK, în timp ce valorile finale variază între 0,0411 W/mK și 0,0420 W/mK. Creșterea valorilor medii ale coeficientului de conductivitate termică după expunere arată că materialul a devenit mai puțin eficient din punct de vedere termic. Această creștere poate fi explicată prin prezența apei în structura materialului.

Diferențele procentuale ale coeficientului de conductivitate termică variază între +4,29% (A1) și +6,08% (A2), cu o creștere medie de +5,06%. Aceste variații, deși relativ mici în comparație cu variațiile de greutate, sunt semnificative în contextul performanței termoizolante.

Rezultatele privind efectul expunerii la condițiile de mediu prezentate în Tabelul 6.4 indică faptul că efortul de compresiune pentru o deformare de 10% pentru probele martor (B1, B2, B3) variază între 75 kPa și 76 kPa, cu o valoare medie de 75,67 kPa. În contrast, pentru probele expuse la condițiile de mediu ciclice (A1, A2, A3), efortul de compresiune scade la intervalul de 68 kPa - 72 kPa, cu o valoare medie de 70,33 kPa. Această reducere a efortului de compresiune mediu cu aproximativ 7,59% după expunerea la condiții de îngheț-dezghet evidențiază o diminuare a rezistenței mecanice a materialului. Expunerea repetată la cicluri de îngheț-dezghet poate cauza microfisuri sau modificări structurale interne în polistirenul expandat, care afectează capacitatea sa de a suporta sarcini de compresiune.

Rezultatele prezentate în Tabelul 6.5 arată că au avut loc schimbări dimensionale pentru două dintre cele trei probe după expunerea la condițiile experimentale. În termeni de lungime, două dintre probe (A1 și A2) au suferit modificări, lungimea lor finală fiind de 377 mm și, respectiv, 378 mm, comparativ cu valoarea inițială de 380 mm. Proba A3 nu a înregistrat nicio modificare în lungime. În ceea ce privește lățimea, variațiile sunt mai semnificative: proba A1 a avut o lățime finală de 176 mm, indicând o reducere de 4 mm, în timp ce proba A2 a prezentat o creștere a lățimii la 185 mm, ceea ce sugerează o extindere. Proba A3 și-a menținut dimensiunea inițială de 180 mm. Grosimea nu a suferit nicio modificare pentru niciuna dintre probe, menținându-se constantă la 30 mm. Expunerea la condițiile de încercare a generat modificări dimensionale, în special în lungime și lățime, sugerând că polistirenul expandat poate fi susceptibil la variații de temperatură și umiditate. Acest lucru subliniază importanța testării stabilității dimensionale a materialelor termoizolante în condiții extreme, mai ales pentru aplicațiile de termoizolații unde integritatea materialului este esențială. Modificările diferite între probe indică o variabilitate a comportamentului materialului, care ar putea fi influențată de factori cum ar fi structura interioară a materialului.

Expunerea probelor de polistiren expandat la condiții ciclice de mediu a determinat creșterea conductivității termice, scăderea efortului de compresiune la o deformare de 10% și modificări ale dimensiunilor acestora, indicând o sensibilitate la condițiile variabile de mediu. Aceste rezultate subliniază necesitatea studierii suplimentare a materialelor utilizate pentru termoizolații și extinderea studiilor și asupra altor materiale utilizate curent.

Capitolul 7 - MODELĂRI NUMERICE PENTRU DETERMINAREA VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ ȘI DE UMIDITATE

7.1 Metodă și program de calcul

7.1.1 Metodă de evaluare

Metoda și ecuațiile conform cărora se realizează simulările numerice ale transferului de căldură și umiditate în mod tranzitoriu prin elemente de construcție, în Uniunea Europeană, sunt prezentate în cadrul următorului standard:

- EN 15026:2007, “Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation”.

7.1.2 Program de calcul utilizat pentru modelare numerică

Pentru realizarea analizelor higrotermice, s-a utilizat software-ul specializat WUFI® Pro, un instrument dedicat acestui tip de evaluări. WUFI® Pro este un software avansat de analiză higrotermică, utilizat pentru a simula transferul de căldură și umiditate prin elementele de construcție. Acesta se bazează pe metoda numerică a diferențelor finite, care implică rezolvarea ecuațiilor diferențiale parțiale care descriu transferul de căldură și masă. WUFI® Pro ia în considerare factorii climatici externi (precipitații, radiații solare, temperatură, umiditate relativă) și condițiile interioare pentru a evalua impactul acestora asupra performanței energetice și durabilității materiale.

7.2 **Prezentare studiu de caz**

Pentru a evalua variația umidității în stratul de termoizolație realizat din polistiren expandat, s-au realizat simulări numerice conform standardului EN 15026:2007, “Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation”. Aceste simulări au fost efectuate utilizând software-ul de analiză higrotermică WUFI® Pro.

Studiul a vizat analiza transferului de căldură și masă pentru un element de construcție de tip perete, în trei configurații diferite, variabila principală fiind grosimea stratului de termoizolație. Astfel, s-au considerat grosimi de 5 cm, 10 cm și 15 cm pentru stratul de polistiren expandat, pentru a evalua impactul asupra comportamentului higrotermic al peretelui în diferite configurații.

Pentru ca analizele efectuate să reflecte cu acuratețe condițiile climatice specifice României, au fost utilizate seturi de date climatice corespunzătoare tuturor zonelor climatice ale țării. Astfel, pentru fiecare dintre cele cinci zone climatice au fost selectate date climatice reprezentative pentru un oraș principal: pentru zona climatică I a fost ales orașul Constanța, pentru zona climatică II – București, pentru zona climatică III – Iași, pentru zona climatică IV – Suceava, iar pentru zona climatică V – Miercurea Ciuc.

Setarea condițiilor de mediu interior a fost realizată conform cerințelor standardului EN 15026:2007, luând în considerare variabilitatea temperaturii și a umidității relative interioare pe parcursul anului.

Având în vedere influența radiației solare, a vântului și a apei provenite din precipitații asupra comportamentului termic și higrotermic al elementelor de tip perete, s-au realizat simulări pentru diferite orientări cardinale. Fiecare dintre cele trei variante structurale ale elementului de perete a fost analizată pentru fiecare dintre cele cinci zone climatice, în funcție de orientarea sa față de punctele cardinale (Nord, Est, Sud și Vest). Aceste simulări au permis evaluarea impactului condițiilor climatice locale și al orientării asupra transferului de căldură și umiditate prin perete.

7.3 **Rezultate obținute pentru studiul de caz**

În continuare, pentru a ilustra în detaliu impactul diferitelor condiții climatice asupra comportamentului stratului de polistiren expandat, sunt prezentate cinci tabele corespunzătoare

fiecărei zone climatice analizate. Tabelele, 7.1. - 7.5. oferă o prezentare a valorilor conținutului de apă în stratul de termoizolație, sintetizate conform condițiilor specifice fiecărei regiuni.

Tabel 7.1. – Sinteza rezultatelor obținute în analizele numerice efectuate – Zona climatică I.

Zonă climatică	Grosime strat termoizolație [m]	Orientare	Conținut de apă – strat de polistiren expandat [kg/m ³]			
			Începutul analizei	Sfârșitul analizei	Minim	Maxim
I (Constanța)	5	N	1.79	1.43	0.89	2.59
		E	1.79	1.44	0.88	2.61
		S	1.79	1.49	0.89	2.65
		V	1.79	1.50	0.91	2.63
	10	N	1.79	1.31	0.91	2.55
		E	1.79	1.32	0.90	2.57
		S	1.79	1.37	0.91	2.60
		V	1.79	1.37	0.97	2.58
	15	N	1.79	1.27	0.93	2.45
		E	1.79	1.28	0.92	2.46
		S	1.79	1.32	0.93	2.49
		V	1.79	1.32	0.99	2.48

Tabelul 7.2. prezintă sinteza valorilor obținute pentru conținutul de apă din stratul de polistiren în cazul expunerii condițiilor climatice specifice zonei climatice II.

Tabel 7.2. – Sinteza rezultatelor obținute în analizele numerice efectuate – Zona climatică II.

Zonă climatică	Grosime strat termoizolație [m]	Orientare	Conținut de apă – strat de polistiren expandat [kg/m ³]			
			Începutul analizei	Sfârșitul analizei	Minim	Maxim
II (București)	5	N	1.79	1.30	0.93	3.76
		E	1.79	1.37	0.90	3.78
		S	1.79	1.25	0.85	3.45
		V	1.79	1.27	0.87	3.47
	10	N	1.79	1.23	0.95	3.41
		E	1.79	1.26	0.93	3.42
		S	1.79	1.17	0.88	3.33
		V	1.79	1.19	0.89	3.34
	15	N	1.79	1.28	1.01	3.18
		E	1.79	1.29	0.98	3.18
		S	1.79	1.21	0.92	3.09
		V	1.79	1.23	0.95	3.11

Tabelul 7.3. prezintă sinteza valorilor obținute pentru conținutul de apă din stratul de polistiren în cazul expunerii condițiilor climatice specifice zonei climatice III.

Tabel 7.3. – Sinteza rezultatelor obținute în analizele numerice efectuate – Zona climatică III.

Zonă climatică	Grosime strat termoizolație [m]	Orientare	Conținut de apă – strat de polistiren expandat [kg/m ³]			
			Începutul analizei	Sfârșitul analizei	Minim	Maxim
III (Iași)	5	N	1.79	2.09	1.06	3.45
		E	1.79	2.10	1.02	3.39
		S	1.79	2.25	1.03	3.40
		V	1.79	2.27	1.11	3.51
	10	N	1.79	1.84	1.08	3.30
		E	1.79	1.84	1.03	3.24
		S	1.79	1.92	1.03	3.25
		V	1.79	1.96	1.13	3.33
	15	N	1.79	1.71	1.11	3.09
		E	1.79	1.72	1.05	3.04
		S	1.79	1.77	1.05	3.04
		V	1.79	1.81	1.16	3.12

Tabelul 7.4. prezintă sinteza valorilor obținute pentru conținutul de apă din stratul de polistiren în cazul expunerii condițiilor climatice specifice zonei climatice IV.

Tabel 7.4. – Sinteza rezultatelor obținute în analizele numerice efectuate – Zona climatică IV.

Zonă climatică	Grosime strat termoizolație [m]	Orientare	Conținut de apă – strat de polistiren expandat [kg/m ³]			
			Începutul analizei	Sfârșitul analizei	Minim	Maxim
IV (Suceava)	5	N	1.79	2.13	1.13	3.63
		E	1.79	2.12	1.12	3.62
		S	1.79	2.13	1.12	3.62
		V	1.79	2.13	1.14	3.63
	10	N	1.79	1.87	1.16	3.39
		E	1.79	1.85	1.15	3.38
		S	1.79	1.86	1.15	3.38
		V	1.79	1.87	1.16	3.39
	15	N	1.79	1.78	1.18	3.13
		E	1.79	1.76	1.17	3.12
		S	1.79	1.76	1.17	3.12
		V	1.79	1.78	1.18	3.13

Tabelul 7.5. prezintă sinteza valorilor obținute pentru conținutul de apă din stratul de polistiren în cazul expunerii condițiilor climatice specifice zonei climatice V.

Tabel 7.5. – Sinteza rezultatelor obținute în analizele numerice efectuate – Zona climatică V

Zonă climatică	Grosime strat termoizolație [m]	Orientare	Conținut de apă – strat de polistiren expandat [kg/m ³]			
			Începutul analizei	Sfârșitul analizei	Minim	Maxim
V (Miercurea Ciuc)	5	N	1.79	1.83	1.56	3.93
		E	1.79	1.67	1.50	3.91
		S	1.79	1.73	1.51	3.94
		V	1.79	1.87	1.62	3.97
	10	N	1.79	1.62	1.50	3.92
		E	1.79	1.51	1.44	3.88
		S	1.79	1.56	1.49	3.92
		V	1.79	1.68	1.60	3.96
	15	N	1.79	1.61	1.56	3.70
		E	1.79	1.51	1.48	3.67
		S	1.79	1.57	1.50	3.70
		V	1.79	1.67	1.59	3.73

7.4 Sinteza și analiza rezultatelor pentru studiul de caz

Pentru a facilita o înțelegere mai aprofundată a variabilității conținutului de apă din stratul de termoizolație, rezultatele obținute în urma simulărilor au fost supuse unei analize detaliate, care a inclus prelucrarea datelor și aplicarea a două metode distincte de interpretare.

Prima abordare a fost orientată spre evidențierea diferențelor în ceea ce privește conținutul maxim de apă în funcție de cele trei configurații ale elementului de construcție. Aceste configurații au fost analizate în raport cu grosimea stratului de termoizolație, oferind o imagine detaliată a comportamentului termoizolației în diferite condiții climatice, specifice fiecărei zone.

În particular, variația conținutului maxim de apă din stratul de termoizolație, având în vedere cele trei configurații ale elementului și expunerea acestuia către cele patru puncte cardinale pentru zona climatică I, este ilustrată în figura 7.34..

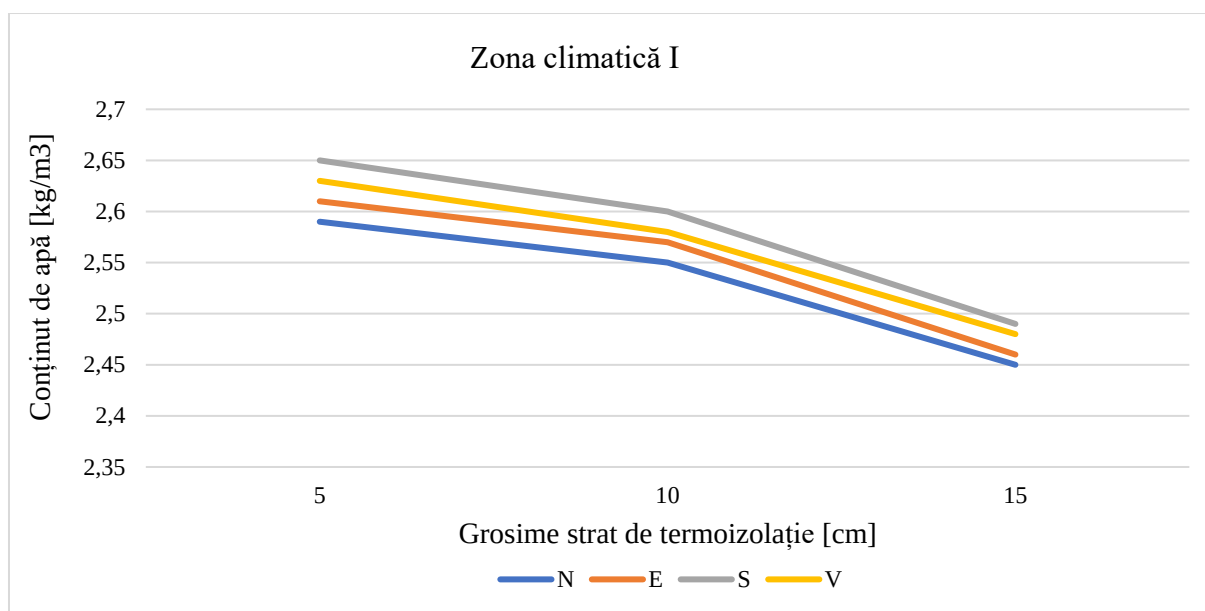


Figura 7.1. – Variație conținut de apă – specific zonă climatică I

Variația conținutului maxim de apă din stratul de termoizolație, pentru cele trei alcătuiuri și pentru expunerea către cele patru puncte cardinale pentru zona climatică II este prezentată în figura 7.35..

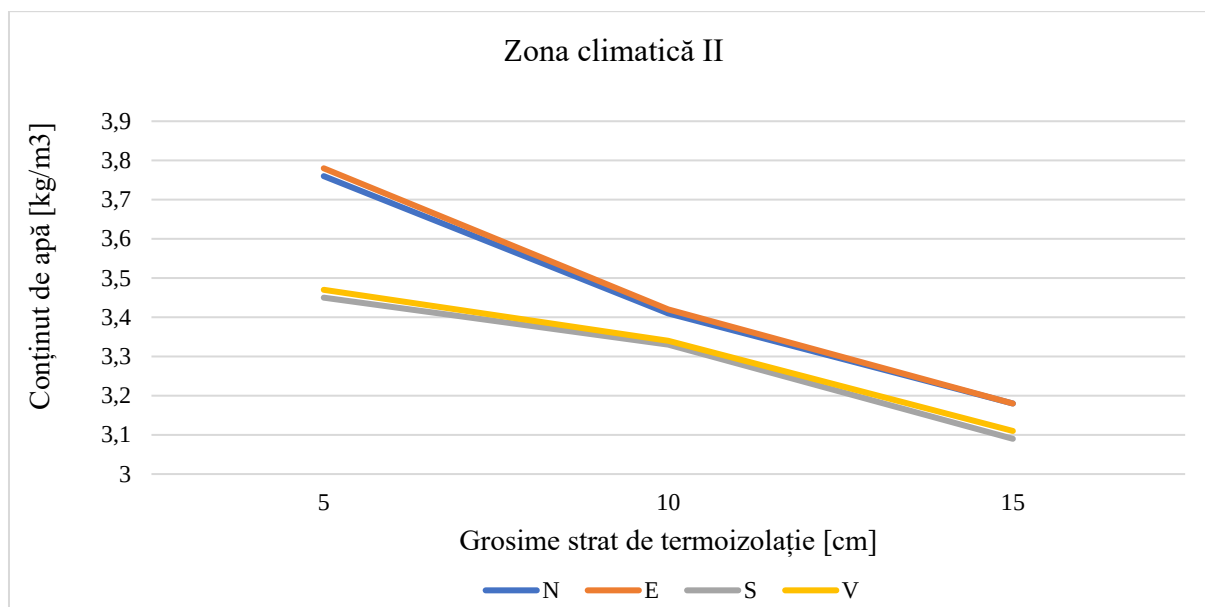


Figura 7.2. – Variație conținut de apă – specific zonă climatică II

În ceea ce privește zona climatică III, variația conținutului maxim de apă din stratul de termoizolație, pentru cele trei configurații ale elementului și pentru expunerea către cele patru puncte cardinale, este prezentată detaliat în figura 7.31..

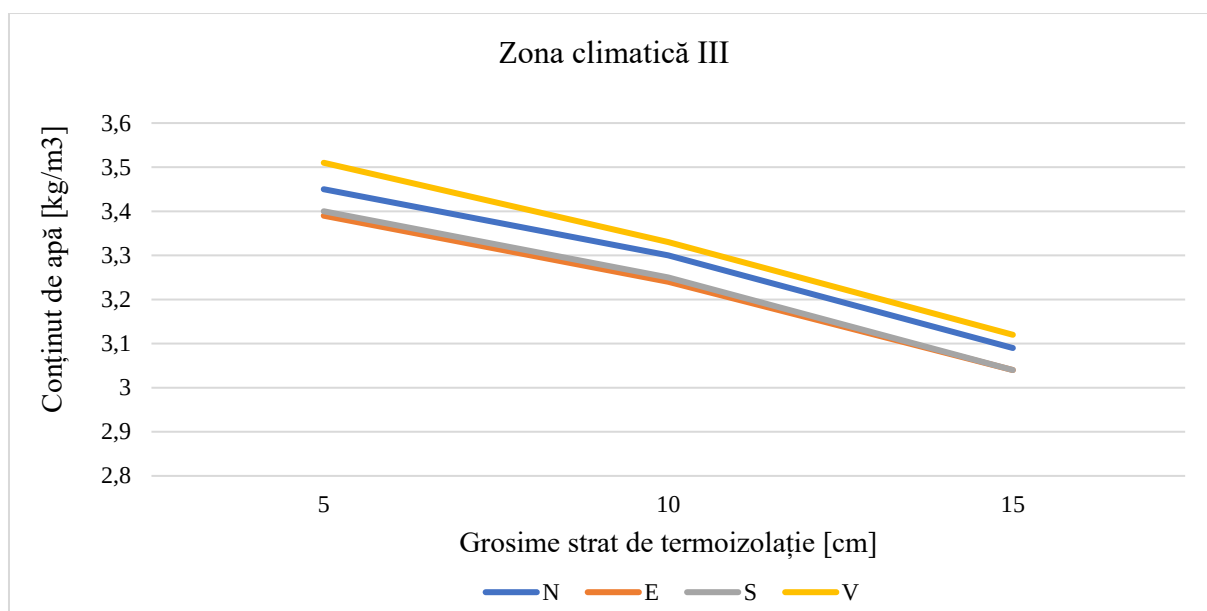


Figura 7.3. – Variație conținut de apă – specific zonă climatică III

Pentru zona climatică IV, variația conținutului maxim de apă din stratul de termoizolație, având în vedere cele trei configurații ale elementului și expunerea către cele patru puncte cardinale, este detaliată în figura 7.32.

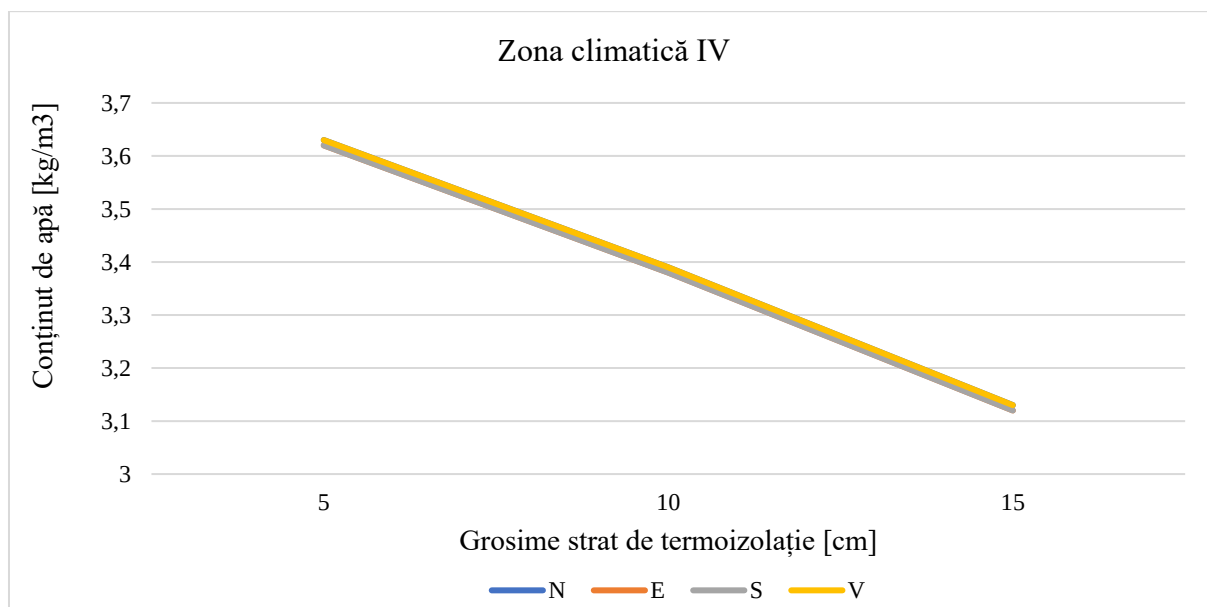


Figura 7.4. – Variație conținut de apă – specific zonă climatică IV

Pentru zona climatică V, variația conținutului maxim de apă din stratul de termoizolație, pentru cele trei alcătuiuri și pentru expunerea către cele patru puncte cardinale este prezentată în figura 7.33..

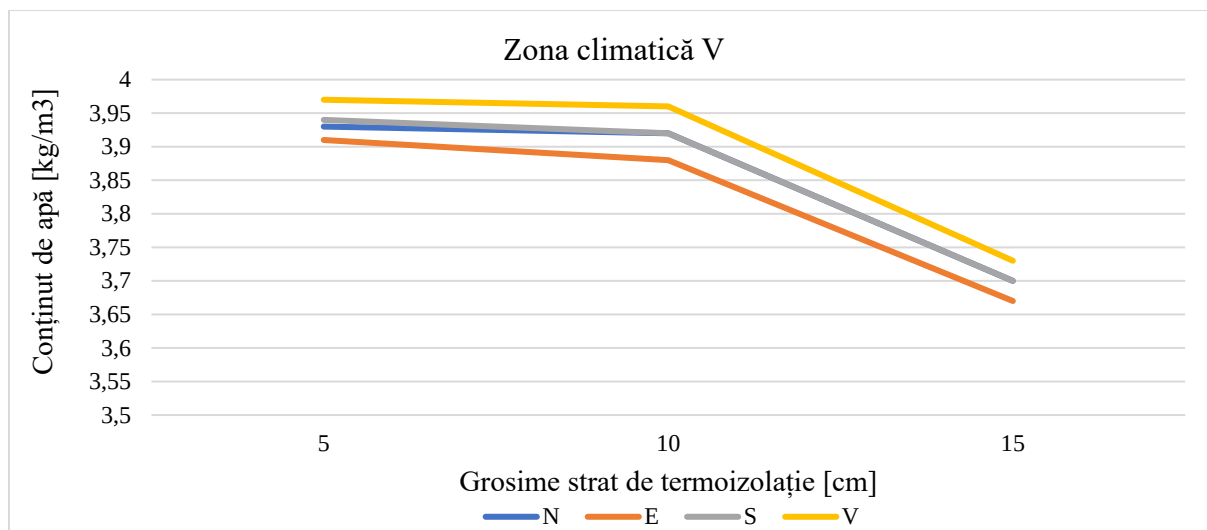


Figura 7.5. – Variație conținut de apă – specific zonă climatică V

A doua abordare analitică a fost orientată spre evidențierea diferențelor în conținutul maxim de apă din stratul de termoizolație, având ca principal criteriu de analiză expunerea elementelor de construcție față de punctele cardinale. Rezultatele acestei analize sunt prezentate printr-o serie de reprezentări grafice în figurile 7.34., 7.35., 7.36. și 7.37., fiecare figură ilustrând impactul expunerii la un anumit punct cardinal. Fiecare figură evidențiază variabilitatea conținutului de apă în funcție de orientare, subliniind diferențele între zonele climatice și efectul orientării asupra eficienței izolației.

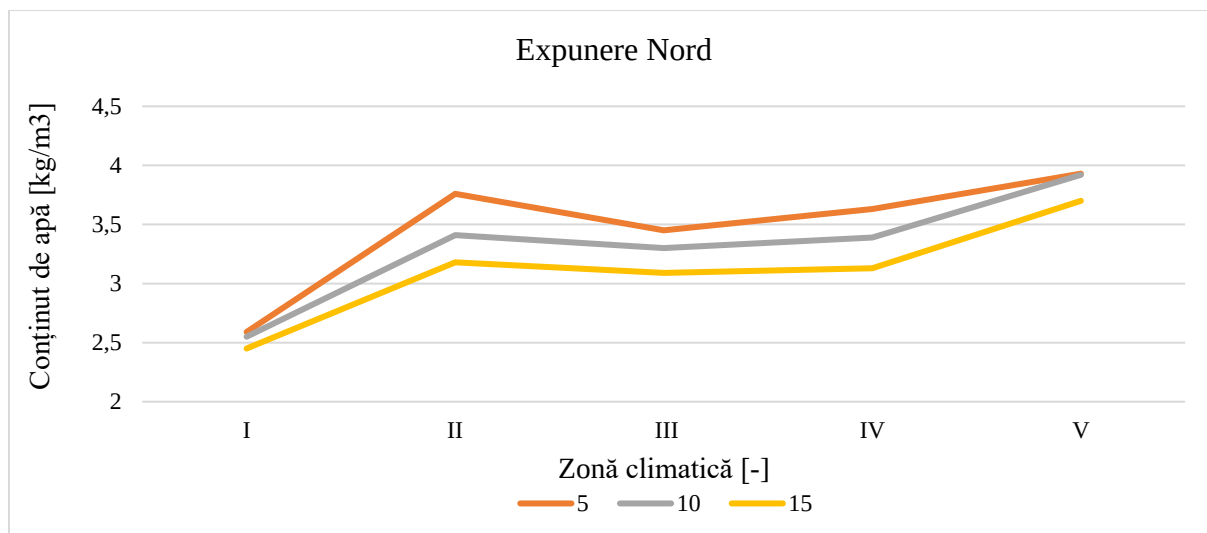


Figura 7.6. – Variație conținut de apă – specific expunere Nord

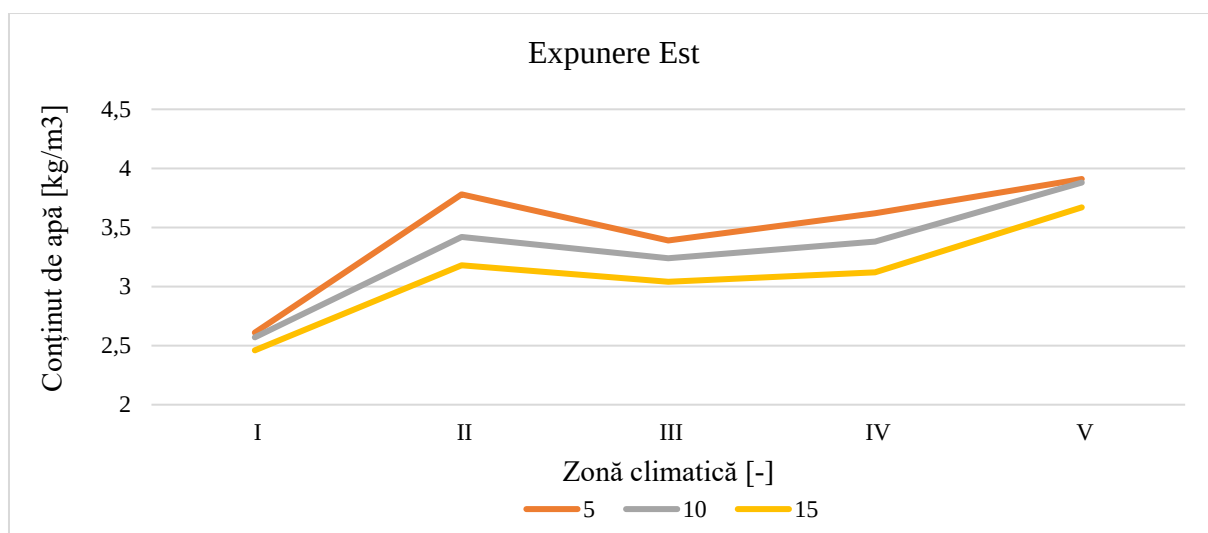


Figura 7.7. – Variație conținut de apă – specific expunere Est

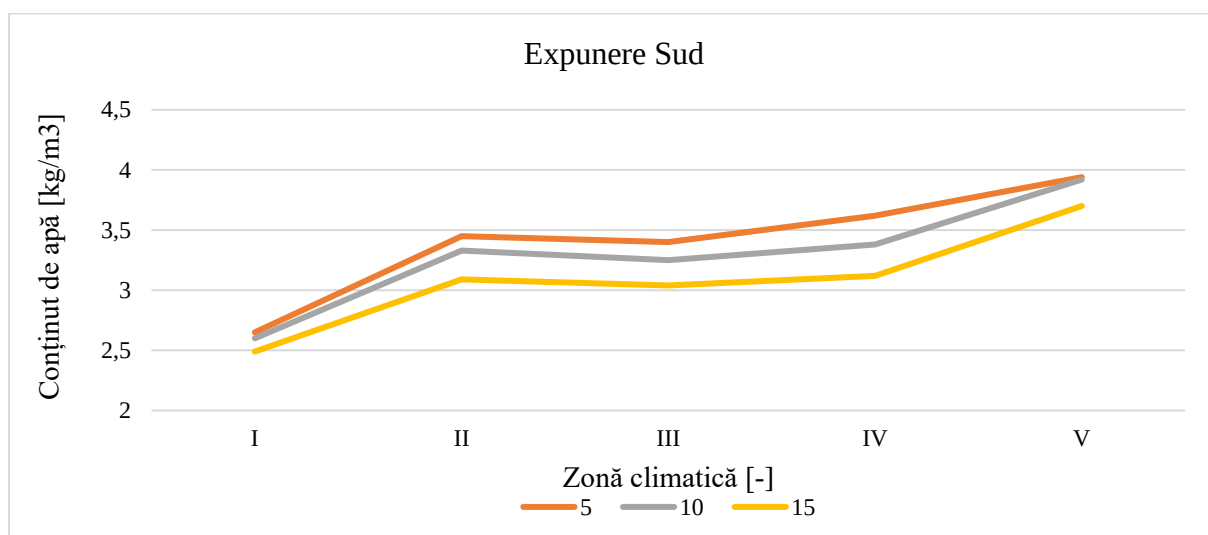


Figura 7.8. – Variație conținut de apă – specific expunere Sud

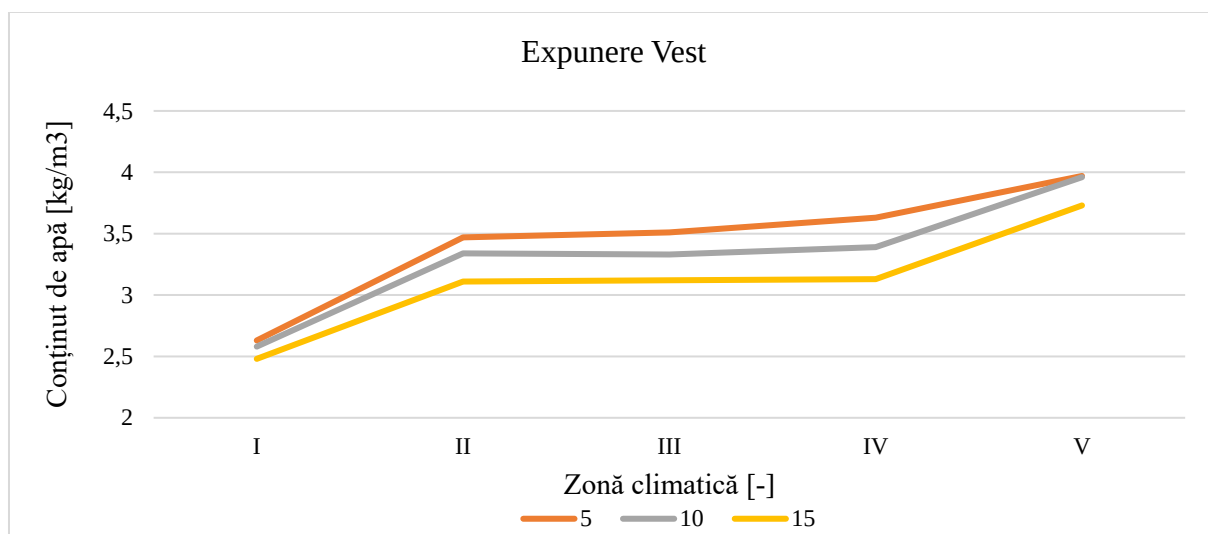


Figura 7.9. – Variație conținut de apă – specific expunere Vest

7.5 Interpretarea rezultatelor și concluzii

Evaluarea variației umidității și a riscului de acumulare de apă în grosimea elementelor de anvelopă reprezintă un aspect esențial în proiectarea și alcătuirea corespunzătoare a elementelor de construcție. Această evaluare este crucială pentru asigurarea integrității structurale și a durabilității pe termen lung a elementelor de construcție, prevenind problemele asociate cu umiditatea excesivă.

În cadrul studiului experimental au fost analizate un total de 60 de cazuri, variind alcătuirea elementului, încărcarea acestuia și expunerea față de punctele cardinale. A fost analizat, în special, conținutul de apă și variația acestuia în stratul de termoizolație. Valorile minime ale conținutului de apă au fost situate în intervalul $0,85 \text{ kg/m}^3$ - $1,62 \text{ kg/m}^3$ iar valorile maxime au fost situate în intervalul $2,45 \text{ kg/m}^3$ - $3,97 \text{ kg/m}^3$. În toate zonele climatice analizate, grosimea mai mare a termoizolației a condus la reducerea acumulării de apă, ceea ce subliniază din nou importanța alegerii unei grosimi a termoizolației, ținând cont și de transferul de masă care se realizează prin elementele de anvelopă. Media scăderii conținutului de apă din stratul de termoizolație este de 9,84% cu valoarea minimă (5,72%) specifică zonei climatice I și valoare maximă specifică zonei climatice IV (13,79%).

Au fost observate diferențe considerabile, de aproximativ 30%, ale conținutului de apă în cazul aceluiași element expus condițiilor de mediu specifice diferitelor zone climatice ceea ce arată că impactul pe care îl au condițiile diferitelor zone climatice este semnificativ. În ceea ce privește diferențele între conținutul de apă din stratul de termoizolație a aceluiași element cu expunere diferită către punctele cardinale (Nord, Est, Sud, Vest), analizând datele obținute se poate observa că diferențele sunt mici, de sub 3%.

Considerând valorile conținutului de apă din stratul de polistiren expandat, se poate concluziona că pentru alcătuirile de element analizate și pentru un climat specific României influența pe care o are umiditatea asupra coeficientului de conductivitate termică al polistirenului expandat este minimă, dar nu poate fi neglijată în contextul dezvoltării clădirilor sustenabile. În contextul rezultatelor obținute în cercetările realizate, este esențial să fie cunoscută în profunzime influența condițiilor de mediu asupra performanței fiecărui material utilizat ca izolație termică. Aceste informații sunt necesare pentru a evalua corect eficiența și durabilitatea materialelor, asigurând astfel că metodologiile de calcul utilizate în proiectare sunt precise și adaptate la realitățile de teren. De asemenea, o înțelegere detaliată a modului în care fiecare material se comportă în diferite condiții climatice permite optimizarea soluțiilor de izolație și îmbunătățirea performanței energetice a clădirilor.

Capitolul 8 - CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI DE CERCETARE DOCTORALĂ. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1 Concluzii generale

Conceptul de sustenabilitate pentru mediul construit subliniază integrarea echilibrată a dimensiunilor economice, sociale și de mediu pentru a asigura un viitor viabil. În construcții, aceasta presupune eficiența energetică, utilizarea resurselor regenerabile, economia circulară și asigurarea confortului utilizatorilor, contribuind astfel la reducerea impactului asupra mediului și la crearea unor spații reziliente și durabile. Durabilitatea materialelor, influențată de factori precum condițiile climatice, expunerea chimică, agenții biologici și activitățile umane, este esențială pentru longevitatea și durabilitatea clădirilor. Utilizarea materialelor durabile și implementarea măsurilor adecvate de protecție pot prelungi ciclul de viață al construcțiilor și reduce impactul asupra mediului. Existența unor certificări ale sustenabilității clădirilor contribuie la reducerea impactului negativ asupra mediului și la promovarea construcțiilor sustenabile pe termen lung. Metodele de evaluare a impactului construcțiilor asupra mediului, prin diverse sisteme de certificare precum BREEAM, LEED, DGNB și altele, stabilesc standarde clare de sustenabilitate, evaluând clădirile pe baza eficienței energetice, utilizării resurselor și impactului ecologic sau social.

Cercetările experimentale pentru determinarea rezistențelor termice unidirecționale in situ, analizând cele trei studii de caz, au arătat că metoda este complexă și dificilă, din cauza condițiilor stricte necesare pentru obținerea unor rezultate precise. Studiile au arătat variații semnificative între valorile teoretice și cele experimentale: în studiul de caz 1, valorile măsurate

sunt cu 29,96% mai mari decât cele teoretice, în studiul de caz 2, valorile experimentale sunt cu 23,15% mai mici decât cele teoretice, iar în studiul de caz 3, valorile măsurate sunt cu 10% mai mari decât cele teoretice. Aceste discrepanțe evidențiază dificultățile asociate cu măsurătorile în condiții reale, influențate de variabile precum factorii climatici, intervenția omului și condițiile de instalare a echipamentelor. Deși metoda termofluxmetrică poate oferi informații valoroase, aplicabilitatea sa practică este limitată de cerințele stricte și variabilitatea condițiilor, ceea ce poate afecta evaluarea precisă a performanței termice și a degradării acestora în timp.

Determinarea caracteristicilor termotehnice ale materialelor termoizolante prin măsurători in situ folosind dispozitive portabile este o metodă practică și directă de evaluare a performanței termice, dar prezintă anumite limitări în unele condiții. Erorile pot apărea din cauza variațiilor de temperatură, contactul imperfect între sondă și probă și din expunerea directă a zonei de încercare la radiația solară. S-au observat variații importante ale coeficientului de conductivitate termică, cu o diferență de 47,66% între valorile minime și maxime măsurate. În ceea ce privește valoarea medie obținută ($0,0428 \text{ W/mK}$) în urma realizării de măsurători la 17 materiale diferite, se constată că aceasta este apropiată de valoarea normată de standardele românești ($0,042 \text{ W/mK}$). Difuzivitatea termică a variat cu 68,48%, iar capacitatea de căldură volumetrică a prezentat o diferență de 55,56% între valorile extreme. Aceste rezultate subliniază importanța măsurării precise a coeficientului de conductivitate termică pentru evaluarea corectă a performanței termice a materialelor, având în vedere influența semnificativă asupra determinării rezistenței termice unidirecționale reale.

Metoda monitorizării variației temperaturii și umidității la nivelul elementelor de construcție in situ reprezintă un instrument util pentru caracterizarea higrotermică și evaluarea performanței energetice, dar este limitată de natura sa distructivă și necesitatea echipamentelor specializate. Analiza temperaturilor interioare a relevat variații semnificative, cu abateri de până la 26% față de temperatura normată, subliniind necesitatea unor sisteme de management al încălzirii și conștientizarea utilizatorilor asupra impactului pe care aceștia îl pot avea. De asemenea, diferențele între valorile măsurate și cele analitice sugerează posibile limitări ale modelelor teoretice de calcul. În ceea ce privește umiditatea relativă, valorile variază semnificativ, indicând posibile probleme de acumulare a vaporilor și riscul de apariție a condensului, în special în contextul unor valori mai mari de 60% în stratul termoizolant. Aceste rezultate subliniază importanța unui control atent al condițiilor de mediu pentru evaluarea corectă a performanței energetice a clădirilor.

Metoda de determinare a efectului expunerii la cicluri de condiții de mediu exterior asupra caracteristicilor materialelor termoizolatoare oferă o evaluare detaliată a capacității acestora de a menține performanța în condiții climatice variabile. Rezultatele testelor au demonstrat o creștere semnificativă a greutateii probelor, variind de la +49,58% până la +111,12%, ceea ce sugerează o absorbție semnificativă de umiditate care afectează negativ performanța termică a materialului. Coeficientul de conductivitate termică a crescut în urma expunerii la condițiile de mediu cu aproximativ 5,06%, reflectând o scădere a eficienței termice, iar efortul de compresiune la o deformare de 10% a scăzut cu 7,59%, indicând o diminuare a rezistenței mecanice a materialului.

Modificările dimensionale observate, în special în lungime și lățime, subliniază sensibilitatea materialului la variații de temperatură și umiditate. Aceste rezultate subliniază importanța testării riguroase și a studierii suplimentare a materialelor utilizate pentru termoizolații, pentru a asigura performanța și durabilitatea acestora în condiții climatice extreme. Variabilitatea rezultatelor între probe sugerează că structura internă a materialului sau distribuția densității poate influența absorbția de apă și comportamentul în condiții de mediu schimbătoare. Aceste observații sunt esențiale pentru selectarea materialelor adecvate și pentru proiectarea sistemelor de izolație care să reziste la condiții variate de mediu pe termen lung.

Evaluarea variației umidității și a riscului de acumulare de apă în grosimea elementelor de anvelopă este crucială pentru durabilitatea construcțiilor și performanța termică. Modelările numerice au cuprins un total de 60 de cazuri, observând valori ale conținutului de apă între 0,85 kg/m³ și 3,97 kg/m³. Grosimea mai mare a termoizolației a redus acumularea de apă, cu o scădere medie de 9,84% a umidității, variind de la 5,72% în zona climatică I la 13,79% în zona climatică IV. Diferențele de conținut de apă pentru aceleași elemente expuse la diferite condiții climatice au fost de aproximativ 30%, indicând un impact semnificativ al expunerii la diferite condiții de climat. În schimb, diferențele între orientările cardinale au fost minime, de sub 3%. În concluzie, pentru polistirenul expandat și condițiile climatice din România, influența umidității asupra coeficientului de conductivitate termică este minimă, dar nu poate fi neglijată în contextul dezvoltării clădirilor sustenabile.

Sustenabilitatea în construcții necesită integrarea echilibrată a dimensiunilor economice, sociale și de mediu, asigurând eficiență energetică, utilizarea resurselor regenerabile și durabilitate. Evaluarea performanței energetice și a durabilității materialelor, inclusiv prin analiza umidității și a impactului climatic, este esențială pentru optimizarea clădirilor. Studiile au subliniat importanța testării riguroase a materialelor termoizolante pentru

a garanta performanța pe termen lung, iar metodele avansate, cum ar fi modelarea numerică și măsurătorile in situ, sunt critice pentru realizarea unor soluții eficiente și sustenabile în construcții.

8.2 Contribuții personale

Contribuțiile personale aduse prin realizarea programului de cercetare, includ:

- sinteza stadiului actual al cunoașterii privind conceptul de sustenabilitate în construcții, durabilitatea materialelor de construcție și metodele de evaluare ale impactului construcțiilor asupra mediului;
- sinteza cerințelor reglementate privind eficiența energetică, a materialelor termoizolatoare, a metodelor analitice și a modelărilor numerice pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor;
- conceperea unui program de cercetare complex, în scopul atingerii obiectivelor propuse, prin organizarea acestuia în etape de cercetare in situ, în laborator și efectuarea de modelări numerice;
- realizarea programului de cercetare experimentală pentru măsurători in-situ;
- expunerea provocărilor realizării de cercetări experimentale pentru determinarea rezistențelor termice unidirecționale in situ și prezentarea discrepanțelor între valori determinate prin măsurare și cele determinate analitic;
- dezvoltarea și implementarea unei metode de măsurare a caracteristicilor termotehnice ale materialelor termoizolatoare in situ, folosind echipamente portabile;
- prezentarea unui set de măsurători ale caracteristicilor termotehnice ale polistirenului expandat pus în operă cu o vechime mai mare de cinci ani;
- dezvoltarea și implementarea unei metode de monitorizare in situ a variației temperaturii și umidității relative în elementele de construcție pentru caracterizarea higrtermică;
- identificarea și prezentarea diferențelor dintre temperaturile interioare normate și cele măsurate;
- expunerea riscului de apariție a condensului în straturile termoizolante în urma analizei datelor măsurate;

- prezentarea diferențelor între valorile temperaturii suprafețelor straturilor termoizolante determinate analitic și cele măsurate experimental;
- conceperea programului de cercetări de laborator, realizarea conceptuală originală a probelor pentru testare;
- prezentarea influenței expunerii la ciclurile de mediu exterior a polistirenului expandat asupra absorbției de apă, a coeficientului de conductivitate termică, a rezistenței mecanice la compresiune și a stabilității dimensionale;
- realizarea unei analize detaliate a variației umidității și a riscului de acumulare a apei în grosimea elementelor de anvelopă în condiții de mediu specifice zonelor climatice din România;
- sinteza rezultatelor, elaborarea concluziilor și propunerilor pentru direcții viitoare de cercetare;
- realizarea unor studii de transfer tehnologic al rezultatelor către mediul de afaceri din domeniu construcțiilor prin implicarea în proiectul de cercetare SMIS 105524 și promovarea rezultatelor cercetărilor prin publicații și participarea la conferințe.

8.3 Valorificarea rezultatelor

Rezultatele obținute în cadrul programului de cercetare doctorală au fost valorificate după cum urmează:

2 Lucrări publicate în reviste cotate ISI, cu factor de impact

Cojocaru, A., Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., & **Petre, S. G.** (2023). Assessment of thermal and mechanical properties of Cement-Based Materials—Part 1: Crumb Rubber concrete. *Buildings*, 13(2), 324. <https://doi.org/10.3390/buildings13020324> (FI=3,1)

Petre, S. G., Isopescu, D. N., Pruteanu, M., & Cojocaru, A. (2022). Effect of exposure to environmental cycling on the thermal conductivity of expanded polystyrene. *Materials*, 15(19), 6921. <https://doi.org/10.3390/ma15196921> (FI=3,1)

2 Lucrări publicate în reviste indexate BDI

Petre, S. G., Isopescu, D. N., & Pruteanu, M. (2021). Study on the factors affecting in situ measurement of the thermal resistance of building elements. *Buletinul Institutului Politehnic*

“Gheorghe Asachi” Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură, 67(4), 87–94.
<https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0036>

Petre, S. G., Isopescu, D. N., & Pruteanu, M. (2020). The study of methods for determining thermal conductivity of building materials. *Buletinul Institutului Politehnic “Gheorghe Asachi” Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură*, 66(70) (2), 55–66.

1 Lucrare publicată în volumele unor manifestări științifice indexate ISI

Petre, S. G., Isopescu, D. N., & Pruteanu, M. (2022). The impact of building occupant habits on heating energy consumption: a case study. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1242(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1242/1/012028>

1 Lucrare în curs de publicare în volumele unor manifestări științifice indexate BDI

Cojocar, A., Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., **Petre, S. G.**, & Baci, I. R. (2024). The influence of perlite on concrete properties. Case study, *Ovidius University Annals Series: Civil Engineering*

3 Lucrări în curs de publicare în reviste indexate BDI

Petre, S. G., Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., & Cojocar, A. (2023). Moisture variability in hemp fiber heat insulation layer under environmental conditions in Romania: an assessment, *Buletinul Institutului Politehnic “Gheorghe Asachi” Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură*

Cojocar, A., Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., **Petre, S. G.**, & Baci, I. R. (2024). Characteristics of ventilated facades and facade anchors for passive house buildings, *Buletinul Institutului Politehnic “Gheorghe Asachi” Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură*

Cojocar, A., Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., **Petre, S. G.**, & Baci, I. R. (2024). State of art on passive house standards analysis in terms of energy performance, *Buletinul Institutului Politehnic “Gheorghe Asachi” Din Iași. Secția Construcții. Arhitectură*

Participări în cadrul conferințelor

Petre, S. G., Isopescu, D. N., & Pruteanu, M. (2022). Study on the moisture conditions assessment in the rehabilitated envelope of buildings prefabricated concrete panels,

”Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi, Romania 5th International Conference of the Doctoral School May 18 - 20, 2022, Iași, România

Participări în calitate de membru în proiecte de cercetare-dezvoltare națională

Proiect POC 2014-2020, Axa prioritară 1, Acțiunea 1.2.3, „Produse și tehnologii ecoinovatoare pentru eficiență energetică în construcții - EFECON”, ID P_40_295/MySMIS 105524, contract 131/23.09.2016, 2016-2021

8.4 Direcții viitoare de cercetare

Având în vedere preocupările actuale, direcțiile viitoare de cercetare se pot axa pe multiple aspecte esențiale pentru dezvoltarea sustenabilă a mediului construit, cu accent pe optimizarea materialelor termoizolante și a metodelor de evaluare a performanței energetice.

Un prim domeniu de cercetare este reprezentat de optimizarea performanței materialelor termoizolante în condiții climatice variabile, având în vedere influența semnificativă a umidității și a condițiilor climatice asupra comportamentului acestora. Extinderea studiilor asupra polistirenului expandat, pentru a analiza diferite grosimi și calități ar oferi o înțelegere mai profundă a modului în care aceste variabile influențează performanța termică și mecanică pe termen lung. Este important să se examineze modul în care diversele densități și grosimi ale polistirenului contribuie la rezistența la absorbția de apă, la modificările dimensionale și la degradarea caracteristicilor termice și mecanice în medii climatice extreme. Cercetările viitoare ar trebui să investigheze în profunzime modul în care reacționează polistirenul expandat și alte materiale convenționale la variațiile sezoniere accentuate și la factorii climatici extremi. Acest lucru ar oferi soluții pentru construcții rezistente în medii dificile și ar contribui la realizarea unor sisteme termoizolante eficiente pe termen lung.

Studii extinse asupra materialelor termoizolatoare sunt esențiale pentru identificarea unor soluții care să reducă amprenta construcțiilor. Materialele alternative sau cu eficiență foarte ridicată oferă potențial de a fi utilizate pe scară largă, dar este nevoie de mai multe cercetări pentru a evalua performanța acestora în medii variate și a determina în ce măsură pot înlocui materialele convenționale. Compararea acestor materiale cu cele convenționale în ceea ce privește eficiența energetică, rezistența mecanică și durabilitatea este vitală pentru a oferi soluții de viitor pentru clădirile sustenabile.

O altă direcție importantă este îmbunătățirea metodelor de măsurare a performanței termoizolațiilor in situ. Metodele actuale, deși utile, pot fi influențate de foarte multe variabile

externe. Dezvoltarea unor metode mai precise, care să minimizeze erorile, ar contribui la evaluarea corectă a performanței materialelor termoizolante în condiții reale. Cercetările ar putea explora metode inovatoare de măsurare pentru a reduce variabilitatea datelor colectate și a îmbunătăți exactitatea rezultatelor.

În ceea ce privește modelarea numerică a performanței energetice a clădirilor, este necesară extinderea cercetărilor asupra unei game mai largi de materiale și condiții climatice. În plus, modelele numerice ar trebui să fie aplicate și în evaluarea materialelor aflate în dezvoltare, pentru a determina eficiența acestora în diferite scenarii de utilizare și pentru a optimiza soluțiile constructive. Utilizarea simulărilor complexe ar permite analiza detaliată a comportamentului higrotermic și ar facilita proiectarea unor clădiri eficiente energetic și durabile în orice zonă geografică.

În final, este necesară o extindere a cercetărilor asupra materialelor termoizolante, pentru a evalua durabilitatea acestora în contextul economiei circulare. Investigarea posibilității de re folosire și reciclare a materialelor termoizolante ar contribui la crearea unor soluții durabile și prietenoase cu mediul. Aceste cercetări vor permite optimizarea ciclului de viață al materialelor și vor susține tranziția către un mediu construit durabil.

Aceste direcții de cercetare sunt esențiale pentru consolidarea cunoștințelor despre performanța termică și durabilitatea materialelor termoizolante și pentru dezvoltarea unor soluții constructive inovatoare, eficiente energetic și rezistente la provocările mediului înconjurător.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

Abu-Jdayil, B., Mourad, A., Hittini, W., Hassan, M., & Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102>

Active house.. <https://www.activehouse.info/>

Akadiri, P. O., Chinyio, E. A., & Olomolaiye, P. O. (2012). Design of a Sustainable Building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*, 2(2), 126–152. <https://doi.org/10.3390/buildings2020126>

Alliance HQE-GBC. (2024, May 16). *Accueil de l'Alliance-HQE-GBC*. <https://www.hqegbc.org/>

Angst, U. M. (2018). Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Materials and Structures*, 51(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>

Anh, L. D. H., & Pásztor, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>

ASTM C1046-95 (2013), “Standard Practice for In-situ Measurement of heat flux and temperature on building envelope components.”.

ASTM C1155-95 (2013), “Standard Practice for Determining Thermal Resistance of building envelope components from the in-situ Data”;

ASTM C1512-10 (2020), “Standard Test Method for Characterizing the Effect of Exposure to Environmental Cycling on Thermal Performance of Insulation Products”..

Atam, E. (2017). Current software barriers to advanced model-based control design for energy-efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1031–1040. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.015>

Benachio, G. L. F., Freitas, M. D. C. D., & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>

Berardi, U. (2019). The impact of aging and environmental conditions on the effective thermal conductivity of several foam materials. *Energy*, 182, 777–794. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.022>

Bruno, A. W., Gallipoli, D., & Perlot, C. (2022). Effect of freezing-thawing cycles on the physical and mechanical properties of fired and unfired earth bricks. *Journal of Building Engineering*, 52, 104501. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104501>

C107-2005, „Normativ privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor”

Cascione, V., Marra, E., Zirkelbach, D., Liuzzi, S., & Stefanizzi, P. (2017). Hygrothermal analysis of technical solutions for insulating the opaque building envelope. *Energy Procedia*, 126, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.141>

D’Agostino, D., & Mazzarella, L. (2019). What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *Journal of Building Engineering*, 21, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>

Debrah, C., Chan, A. P., & Darko, A. (2022). Artificial intelligence in green building. *Automation in Construction*, 137, 104192. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104192>

Di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The Effect of atmospheric corrosion on steel structures: A State-of-the-Art and Case-Study. *Buildings*, 11(12), 571. <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>

Directive 2010/31/EU, European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), Official Journal of the European Union, 2010, pp. 13–35

Eberhardt, L. C. M., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2020). Building design and construction strategies for a circular economy. *Architectural Engineering and Design Management*, 18(2), 93–113. <https://doi.org/10.1080/17452007.2020.1781588>

Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D’Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>

EPB Center.. *The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) — EPB Standards — EPB Center | EPB Standards*. <https://epb.center/epb-standards/energy-performance-buildings-directive-epbd/>

Gámez-Espinosa, E., Bellotti, N., Deyá, C., & Cabello, M. (2020). Mycological studies as a tool to improve the control of building materials biodeterioration. *Journal of Building Engineering*, 32, 101738. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101738>

- Gao, D. (2019). Design and Implementation of Intelligent Control System for Green Building. *2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Qiqihar, China, 2019*. <https://doi.org/10.1109/icmtma.2019.00013>
- Grazieschi, G., Asdrubali, F., & Thomas, G. (2021). Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems*, 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100032>
- Grubeša, I. N., Vračević, M., Ranogajec, J., & Vučetić, S. (2020). Influence of Pore-Size distribution on the resistance of clay brick to Freeze–Thaw cycles. *Materials*, 13(10), 2364. <https://doi.org/10.3390/ma13102364>
- Hu, F., Wu, S., & Sun, Y. (2018). Hollow-Structured materials for thermal insulation. *Advanced Materials*, 31(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201801001>
- Islam, S., Bhat, G., & Mani, S. (2024). Life cycle assessment of thermal insulation materials produced from waste textiles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(2), 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01882-7>
- ISO 9869-1:2014, “Thermal Insulation – Building elements – In-situ Measurement of thermal resistance and thermal Transmittance – Part 1: Heat Flow Meter Method”;
- ISO 9869-2:2018, “Thermal Insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal Transmittance– Part 2: Infrared Method for frame Structure dwelling”;
- ISO 10880:2017, “Non-destructive Testing – Infrared Thermographic Testing– General Principles”;
- Jami, T., Karade, S., & Singh, L. (2019). A review of the properties of hemp concrete for green building applications. *Journal of Cleaner Production*, 239, 117852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>
- Kohler, N. (2017). From the design of green buildings to resilience management of building stocks. *Building Research & Information*, 46(5), 578–593. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1356122>
- Martínez, B., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2023). Applications and Properties of Hemp Stalk-Based Insulating Biomaterials for Buildings: review. *Materials*, 16(8), 3245. <https://doi.org/10.3390/ma16083245>
- Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor.. *Mc 001 – 2022*.

Murtagh, N., Scott, L., & Fan, J. (2020). Sustainable and resilient construction: Current status and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122264>

Nearly-zero energy and zero-emission buildings.. Energy. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en

Niu, F., Jiang, H., Su, W., Jiang, W., & He, J. (2021). Performance degradation of polymer material under freeze-thaw cycles: A case study of extruded polystyrene board. *Polymer Testing*, 96, 107067. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107067>

Ogunmakinde, O. E., Egbelakin, T., & Sher, W. (2022). Contributions of the circular economy to the UN sustainable development goals through sustainable construction. *Resources Conservation and Recycling*, 178, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106023>

Passive House Institute Dr. Wolfgang Feist.. *Passivhaus Institut*. Passive House Institute. https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

Petre, S. G., Isopescu, D. N., Pruteanu, M., & Cojocaru, A. (2022). Effect of exposure to environmental cycling on the thermal conductivity of expanded polystyrene. *Materials*, 15(19), 6921. <https://doi.org/10.3390/ma15196921>

Plank, R. (2008). The principles of sustainable construction. *The IES Journal Part a Civil & Structural Engineering*, 1(4), 301–307. <https://doi.org/10.1080/19373260802404482>

Said, R., Bhatti, M. I., & Hunjra, A. I. (2022). Toward Understanding Renewable Energy and Sustainable Development in Developing and Developed Economies: A review. *Energies*, 15(15), 5349. <https://doi.org/10.3390/en15155349>

Sharma, S., & Sharma, N. K. (2022). Advanced materials contribution towards sustainable development and its construction for green buildings. *Materials Today Proceedings*, 68, 968–973. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.394>

Wen, B., Musa, N., Onn, C. C., Ramesh, S., Liang, L., & Wang, W. (2020). Evolution of sustainability in global green building rating tools. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120912. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120912>