

SUSTENABILITATEA UNUI SISTEM DE IZOLARE TERMICĂ CU STRATURI PARALELE DE AER PENTRU CLĂDIRI EFICIENTE ENERGETIC - STUDII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Civilă și instalații

autor ing. Raul Cătălin Ene

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Daniel Dan

luna Februarie anul 2024

Abstract

În cazul clădirilor, eficiența energetică este evaluată pe de-o parte prin prisma consumului energetic și a emisiilor generate în faza de funcționare iar pe de altă parte în funcție de emisiile încorporate în materialele de construcție. În consecință, pe lângă tehnicile de producere și furnizare a energiei cât mai eficiente, punerea în aplicare a materialelor de construcție cu proprietăți de izolare termică superioară a devenit o preocupare tot mai mare pentru ingineri și arhitecți.

Deoarece necesarul de energie al clădirilor foarte eficiente energetic a fost redus drastic, materialele eficiente energetic trebuie evaluate și prin impactul relativ al energiei încorporate în producerea acestora.

În acest context, tematica prezentei teze de doctorat, conține studii teoretice și experimentale privind sustenabilitatea unui sistem performant de izolație termică bazat pe materiale de izolație existente și incinte izolatoare de aer. În cadrul programului de cercetare, pornind de la o configurație propusă, au fost efectuate determinări în condiții de laborator privind conductivitatea termică a sistemului propus, urmând ca mai apoi să se efectueze studii comparative privind utilizarea acestuia la prima școală din România construită în conformitate cu standardele caselor pasive.

Studiile comparative pornesc de la consumurile de energie teoretice estimate pe baza normativelor specifice în vigoare și cele reale măsurate în timpul exploatarei pe o perioadă de 21 luni. Pentru ambele sisteme izolatoare propuse, emisiile generate în timpul etapelor de producție și utilizare a clădirii au fost evaluate în funcție de condițiile specifice ale diferitelor zone climatice naționale.

Rezumatul capitolelor tezei

1.Introducere

1.1 Aspecte generale ale eficienței energetice și ale sustenabilității

Consumul de resurse și emisii de gaze nocive se extinde depășind capacitatea de absorbție a mediului. Sectorul clădirilor va atinge și el rate remarcabile de creștere la nivel mondial [1].

1.2 Acțiuni la nivel politic

Din fericire, pot fi utilizate mai multe alternative pentru a obține soluții eficiente din punct de vedere energetic și cu emisii scăzute de dioxid de carbon în cazul sectorului construcțiilor.

1.3 Perspectiva europeană asupra schimbărilor climatice

Pentru a face față provocării energetice globale și consecințelor schimbărilor climatice, Uniunea Europeană a adoptat în martie 2007 Pachetul "Climă și Energie". Strategia-cadru a UE conține mai multe propuneri, cunoscute și sub denumirea de obiective "20-20-20" care privesc creșterea eficienței energetice și reducerea emisiilor dăunătoare mediului.

1.4 Consumul de energie în sectorul construcțiilor

Pentru a realiza reducerea emisiilor asumate la nivel european, țările membre trebuie să pună în aplicare măsuri naționale de creștere a eficienței fondului construit.

1.5 Principalele caracteristici ale consumului de energie în sectorul construcțiilor din România

Pentru a reduce intensitatea energetică și pentru a atinge obiectivele propuse [2], cele mai importante măsuri privind sectoarele construcțiilor sunt următoarele:

- Reabilitarea anvelopei termice;
- Creșterea eficienței instalațiilor.

În sialul politicilor amintite, metodologiile de calcul a eficienței energetice aplicabile la nivel național [3] [4] [5], devin din ce în ce mai riguroase în ceea ce privește eficiența energetică construcțiilor noi dar și a reabilitărilor.

1.6 Motivația și obiectivele cercetării

Principala provocare în atingerea obiectivelor stabilite de Directiva Europeană "Performanța Energetică a clădirilor" constă în furnizarea de soluții extrem de eficiente din punct de vedere energetic, care să aibă simultan o cantitate cât mai redusă de emisii înglobate.

În încercarea de a reduce emisiile conținute în sistemul de izolație și, astfel, în întreaga clădire, păstrând în același timp eficiența sa energetică, lucrarea își propune să studieze sustenabilitatea unui sistem inovator de izolație. Sistemul se bazează pe panourile existente din vată minerală, dar conține mai multe straturi suplimentare de aer. Scopul straturilor de aer este de a îmbunătății caracteristicile sistemului de izolare, păstrând totuși aceeași cantitate de emisii înglobate. Cercetarea își propune să clarifice următoarele:

să investigheze cea mai eficientă structură a sistemului de izolație inovator;

să investigheze grosimea optimă a stratului de aer;

să investigheze influența straturilor de aer asupra conductivității termice;

să determine influența noului sistem asupra consumului de energie și asupra emisiilor generate de clădirea de referință.

1.7 Prezentarea tezei

Teza este structurată în șase capitole și șase anexe, dezvoltate pe 204 pagini.

2. Instrumente de certificare și concepte de certificare a clădirilor eficiente energetic

Acest capitol prezintă câteva dintre cele mai cunoscute și utilizate concepte de clădiri eficiente energetic.

2.1 Standarde de certificare

2.1.1 Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

Capitolul prezintă caracteristicile de bază ale standardului LEED.

2.1.1 Building research establishment environmental assessment method (BREEAM)

Capitolul prezintă caracteristicile de bază ale standardului BREEAM.

2.2 Concepte de construcții eficiente din punct de vedere energetic

2.2.1 Nearly zero energy building (NZEB)

Capitolul prezintă conceptul de clădire cu consum aproape egal cu zero NZEB, aplicabil la nivel național inclus în metodologia de calcul a eficienței energetice a construcțiilor. Sunt prezentate modificările introduse prin acest concept NZEB privind necesitatea de producere a energiei la fața locului sau la o distanță < 30 km.

2.2.2 Passive house (PH)

Capitolul prezintă principalele cerințe ale standardului de casă pasivă, detaliind conceptul, orientarea și consumurile energetice maxime acceptate pentru atingerea acestui standard.

2.2.3 Passive house schools (PH)

Capitolul prezintă principalele cerințe care trebuie îndeplinite pentru clădirile de învățământ conform standardului de casă pasivă.

3. Clădirea de referință considerată în studiul de caz

Clădirea de referință care stă la baza cercetării de față este prima instituție publică din România construită conform prescripțiilor caselor pasive. Aceasta este amplasată în municipiul Salonta și are destinația de clădire de învățământ.

3.1 Proprietățile termice ale anvelopei clădirii de referință

Caracteristicile elementelor anvelopei și configurația geometrică sunt prezentate conform datelor primite de la echipa de proiectare [6].

3.2 Structura clădirii de referință

Structura liceului, finisajele interioare și arhitectura clădirii sunt caracteristice unei clădiri de învățământ fiind prezentate, prin includerea unor detalii specifice furnizate de către colectivul de proiectare [6].

3.3 Instalațiile clădirii de referință

Detaliile privind instalațiile clădirii de referință au fost extrase din proiectul tehnic de execuție [6] și prezentate prin prisma eficienței și randamentului soluțiilor adoptate.

3.3.1 Permeabilitatea clădirii de referință

Pentru clădirile cu eficiență termică ridicată, este obligatorie efectuarea unor determinări ale gradului de etanșitate/permeabilitate la aer. Verificarea etanșității a fost realizată la finalul lucrărilor de construcție de echipa de proiectare împreună cu o echipă de cercetare a Universității Politehnica Timișoara, utilizând un echipament specific de tip blower door. Pe baza primelor rezultate obținute au fost efectuate mai multe intervenții de reducere a infiltrațiilor de aer prin identificarea zonelor prin care se produc schimburi de aer și etanșizarea suplimentară a acestora. În urma intervențiilor și a determinărilor efectuate, clădirea a îndeplinit cerința privind numărul maxim de schimburi de aer impus de normativul de clădiri pasive.

3.3.2 Sistemul de monitorizare a clădirii liceului

Acest capitol prezintă un sistem de monitorizare complex utilizat la clădirea de referință, compus din senzori de temperatură, umiditate, CO₂ și contoarele pentru utilități. Sistemul servește atât pentru monitorizarea performanțelor în timp real dar poate fi utilizat și pentru o optimizare a consumurilor energetice în diverse sectoare ale construcției având diferite destinații.

3.3.3 Monitorizarea datelor înregistrate

Următoarea secțiune conține măsurătorile consumului de energie înregistrate în primele 21 de luni de funcționare ale clădirii. Datorită utilizării incomplete a acesteia, capitolul conține și

estimarea creșterilor consumurilor conform unor evaluări ale echipei de proiectare, însușite de autorul tezei.

3.3.4 Observații generale privind ipotezele limitative

Acest capitol cuprinde ipotezele limitative luate în considerare în timpul studiului.

3.4 Analiza inițială a costurilor de operare conform calculelor echipei de proiectare

Conform analizei preliminare a costurilor, diferența costurilor unei clădiri izolate conform cerințelor minime și ale unei clădiri izolate la standarde pasive ar trebui amortizată în 6 ani prin reducerea costurilor de întreținere [6].

3.5 Simulare higrotermică

Pentru a înțelege pe deplin confortul și consumul de energie al clădirilor, simularea răspunsului higrotermic și a proprietăților izolatoare a fost evaluată utilizând software-ul pentru calcul higrodinamic WUFI [7]. Aceasta efectuează calculele higrotermice ținând cont de simulările dinamice ale transferului cuplat de căldură și umiditate.

3.5.1 Model geometric

Simulările higrotermice se bazează pe modelul geometric al construcției, în care sunt definite locația, dimensiunea și toate componentele clădirii și împrejurimilor. Clădirea a fost reprodusă în secțiunea specială a softului-ului de calcul WUFI [7].

3.5.2 Parametrii numerici și datele de intrare ale simulării

Acest capitol cuprinde parametrii clădirii dar și ai împrejurimilor. Toate datele prezentate au fost luate în considerare în cadrul simulării comportării higrotermice.

3.5.3 Dependența conductivității termice de umiditate

Acest capitol prezintă dependența conductivității termice de conținutul de umiditate al materialelor. Aceasta a fost luată în considerare prin interpolare liniară în funcție de conținutul de umiditate al materialelor.

3.5.4 Factorul de rezistență la difuzia vaporilor (μ)

Algoritmul de calcul utilizat pentru evaluarea rezistenței la difuzia vaporilor de apă a diferitelor materiale de construcție este prezentat în acest capitol, cu aplicabilitate pentru sistemul clasic și sistemul propus.

3.5.5 Grosimea de difuzie a vaporilor, (s_d)

Algoritmul de calcul utilizat de software pentru a simula grosimea de difuzie a vaporilor pentru materialele de construcție utilizate este prezentat în următoarea secțiune.

3.5.6 Permeabilitatea

Subcapitolul prezintă permeabilitatea la vaporii de apă, adică rata de trecere a vaporilor de apă pe parcursul unei ore prin suprafața unitară cu o grosime dată a materialului la o anumită presiune a vaporilor.

4. Sistemul de izolație cu camere de aer paralele (ISPA)

Cerințele în creștere ale rezistenței termice minime implică, de asemenea, preocupări suplimentare cu privire la energia încorporată și emisiile nocive generate în timpul procesului de fabricare a materialelor de construcție [8]. Și în România, metodologia privind eficiența energetică în industria construcțiilor [3] [4] [5] impune cerințe în creștere ale proprietăților de izolare. În speță, performanța minimă necesară a anvelopei termice este mărită cu 68,75% pentru pereții exteriori și cu 42,0% pentru elementul de închidere de la partea superioară a clădirii.

4.1 Analiza literaturii de specialitate existentă în domeniu

În această secțiune sunt prezentate studiile disponibile, care tratează performanța la transfer termic a straturilor de aer neventilate. Acestea se bazează pe cunoștințele teoretice bine-cunoscute conform cărora există patru tipuri de modele ale transferului de căldură (conducție pură, radiație, convecție laminară și turbulentă). Spectrul transferului termic convectiv este delimitat de două puncte de inflexiune. Primul împarte fluxul pur conductiv din fluxul convectiv, iar al doilea împarte fluxul regimului laminar de regimul turbulent.

4.2 Mecanisme ale transferului de căldură

4.2.1 Convecția

Subcapitolul prezintă fenomenul transferului de căldură prin convecție, și modelul de calcul utilizat.

4.2.2 Conducția

Subcapitolul prezintă fenomenul transferului de căldură prin conducție, și modelul de calcul utilizat.

4.2.3 Radiația termică

Subcapitolul următor prezintă fenomenul transferului de căldură prin radiație termică, proprietățile sale și modelul de calcul utilizat.

4.3 Grosimea inițială a straturilor de aer

Calculul preliminar al grosimii stratului de aer a fost realizat folosind software-ul de calcul termotehnic în regim staționar – Antherm [13]. Sunt prezentate principiile care au stat la baza sistemului propus care susțin proiectarea panoului izolator. Originalitatea sistemului de izolare propus (ISPA) constă în transferul unei idei utilizate pentru elemente structurale de rezistență - grinzile ajurate de oțel, la sistemele de izolare termică. Dispunerea straturilor de aer din interiorul panoului de izolație este prezentată în Figura 1:

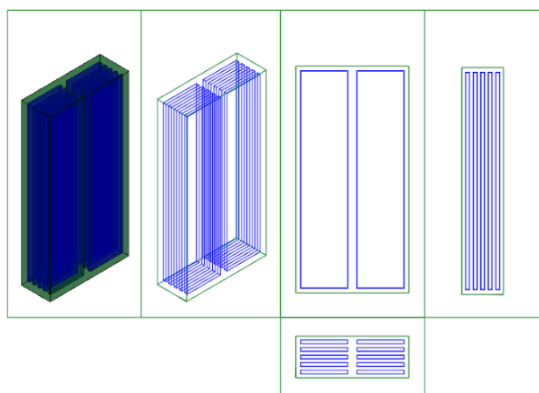


Figura 1. Dispunerea straturilor de aer în panoul de izolație.

4.4 Investigații preliminare efectuate asupra sistemelor de izolație cu camere de aer paralele

4.4.1 Investigații de laborator

Următoarea secțiune prezintă conductivitatea termică medie a izolației măsurată în condiții de laborator. Conductivitatea termică medie determinată cu dispozitivul de măsurare, λ -Meter EP500e [9], este determinată la 0,03907 W/(m·K) pentru panoul de izolație existent (vată minerală bazaltică) și la 0,04196 W/(m·K), cu 6,9% mai mare pentru probele care simulează sistemul ISPA.

4.4.2 Gradientul de temperatură în secțiunea transversală a elementelor de anvelopă

Gradientul de temperatură în straturile anvelopei a fost determinat de autor și replicat cu ajutorul unui software de calcul – Antherm [13]. Acestea au fost efectuate pentru a confirma ecuațiile termodinamice utilizate în capitolele anterioare. Variația temperaturii prin elementele

secțiunii transversale a anvelopei este prezentată în Figura 2:

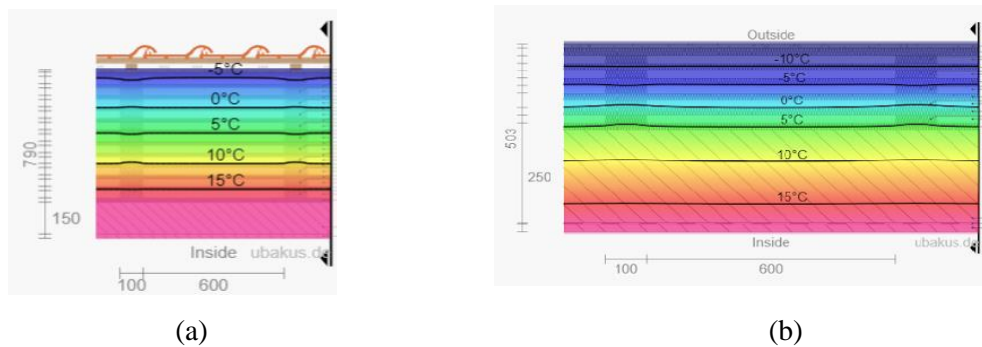


Figura 2. (a) Planșeu superior (b) Perete exterior

4.4.3 Permeabilitatea la vapori a elementelor de anvelopa

Influența straturilor suplimentare de aer asupra conținutului de apă al materialelor izolante a fost determinată cu ajutorul unui software dedicat de calcul termodinamic, WUFI [7], care a ținut cont de clima înregistrată în zona localității în perioada de calcul.

4.4.4 Factorul de rezistență la difuzia vaporilor de apă

Rezistența termică a straturilor suplimentare de aer asupra conținutului de apă al materialelor a fost determinată ținând cont de conținutul de umiditate al materialelor implicate.

4.4.5 Conținutul de umiditate al straturilor de aer

Comportamentul în funcție de umiditatea materialelor de construcție a fost evaluat utilizând software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.6 Umiditatea capilară

La valori ale umidității relative ridicate, izoterma de adsorbție crește dramatic. Regiunile de umiditate capilară au fost evaluate utilizând software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.7 Regiunea suprasaturată

Comportamentul materialelor de construcție în regiunea suprasaturată a fost evaluat utilizând software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.8 Aproximarea funcției de stocare a umidității

Aproximarea funcției cu care s-a simulat stocarea umidității a fost evaluată utilizând software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.9 Mecanismul de transport molecular al lichidelor

Interacțiunea dintre difuzia apei și transportul molecular al lichidului în componentele clădirii a fost evaluată utilizând software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.10 Membrane

Simularea membranelor a fost efectuată pentru a reproduce cât mai bine efectul real în simularea computațională. Informațiile care stau la baza algoritmului de calcul sunt prezentate în acest capitol. Aceasta a fost efectuată cu software-ul dedicat pentru calcul higrodinamic WUFI [7].

4.4.11 Simularea umidității conținute în materiale

Informațiile care stau la baza algoritmului de calcul privind calculul umidității în elementele de anvelopă sunt prezentate în acest capitol. Calculele utilizează date de monitorizare meteorologice reale înregistrate în primul an de utilizare a clădirii. Figura 3 prezintă variația apei din perete pentru perioada analizată:

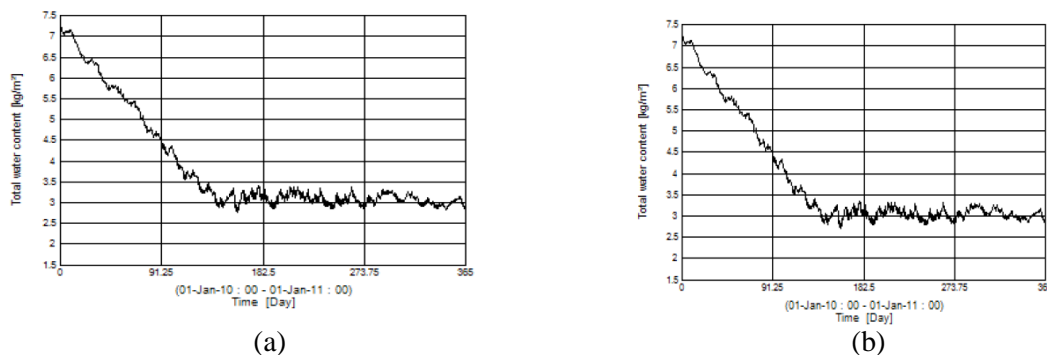


Figura 3. Umiditatea peretelui izolat conform sistemului existent (a) și în ipoteza izolării cu ISPA
Performanța ISPA a fost evaluată ținând cont de diferența de emisii generate de clădirea studiată în comparație cu sistemul de izolație existent.

Păstrând volumul de vată minerală relativ constant, grosimea izolației la pereți este mărită de la 150 mm la 235 mm și de la 250 mm la 581 mm în cazul plăcii superioare. Tabelul 1 prezintă proprietățile fizice și termice ale panourilor de izolație conform ipotezelor de calcul:

Tabelul 1. Volumul de izolație și proprietățile termice ale izolației amplasate la pereții exteriori și planșeu superior în cazul unui panourilor de izolație 600 x 1200 mm

sistem de izolație	straturi		d_{iz} (mm)	Volum de izolație per panou (m^3/m^2)	R_{strat} de izolație ($m^2 \cdot K/W$)
	descriere	nr. straturi			
pereți exteriori					
EIS (150mm)	solid	1	150	0.208	3.839
ISPA (235 mm)	straturi solide	6	20	0.167	5.600
	strat cadru suport	5	23	0.040	
planșeu superior					
EIS (250 mm)	solid	1	250	0.347	6.399
ISPA (581 mm)	straturi solide	12	20	0.333	13.840
	strat cadru suport	11	31.0	0.059	

4.4.12 Simularea umidității conținute în materiale

Conform rezultatelor preliminare, influența noului sistem de izolație asupra coeficientului de transmisie termică liniară este între -1,75 și -24,06% în comparație cu izolația existentă. Variația considerabilă este vizibilă la mansardă (24,06%) unde, grosimea izolației este și cea mai mare (250 mm respectiv 581 mm), iar diferența dintre panourile de izolație este mai evidentă. Calculul a fost efectuat utilizând un software dedicat – HEAT3[12].

5. Evaluarea emisiilor corespunzătoare ciclului de viață al clădirii de referință

Capitolul cuprinde prezentarea conceptului de emisii atribuibile întreg ciclului de viață al clădirii de referință. De asemenea sunt prezentate standardele, reglementările și baza de date utilizate în timpul analizei efectuate [14-19].

5.1 Informații de bază privind evaluarea

Pentru îmbunătățirea credibilității rezultatelor, validarea software-ului OneclickLCA [10],

utilizat în cadrul calculelor, este efectuată din punct de vedere tehnic și științific de o entitate independentă certificată.

5.2 Informațiile clădirii de referință utilizate în cadrul evaluării emisiilor încorporate

În acest capitol sunt prezentate datele de intrare utilizate în timpul evaluării privind emisiile generate în întreg ciclul de viață. Capitolul conține informații privind procesele și materialele care înglobează emisii dăunătoare mediului.

5.3 Emisii dăunătoare generate în timpul utilizării clădirii

Capitolul conține estimarea emisiilor generate în timpul etapei de funcționare a clădirii în funcție de cererea de energie determinată teoretic.

5.3.1 Iluminarea clădirii de referință

Caracteristicile energiei electrice consumate, adică acelea ale energiei electrice produse și utilizate în rețeaua electrică din România, sunt prezentate în acest capitol. Alături de acestea, capitolul cuprinde și datele de intrare pentru determinarea necesarului de energie electrică a clădirii de referință.

5.3.2 Încălzirea clădirii de referință

Acest capitol prezintă sistemul de încălzire al clădirii de referință. Tabelul 2 prezintă consumul de energie electrică atribuibil încălzirii clădirii.

Tabelul 2. Emisii generate de consumul de electricitate

resursă	cantitate [kWh]	tCO ₂ eq	comentariu
curent electric Romania	20431	609 t – 18%	IEA2019

5.3.3 Ventilarea mecanică a clădirii de referință

Subcapitolul conține datele de intrare utilizate pentru determinarea necesarului pentru ventilația mecanică a clădirii de referință.

5.3.4 Prepararea apei calde

Subcapitolul conține datele de intrare utilizate pentru determinarea necesarului de apă caldă asociat clădirii de referință.

5.3.5 Lucrări suplimentare aparținând construirii

Subcapitolul conține datele de intrare pentru determinarea emisiilor produse de operațiunile suplimentare atribuibile fazei de construcție.

5.4 Caracteristicile materialelor de construcție

Subcapitolul conține datele care stau la baza calculului emisiilor încorporate în materialele de construcție.

5.4.1 Durata de viață a construcției

Studiul emisiilor dăunătoare ale clădirii de referință a fost realizat în funcție de perioadele de viață utilizate de software-ul de utilizat, OneclickLCA [10].

5.4.2 Cantitatea materialelor de construcție

Subcapitolul conține calculul emisiilor încorporate în materialele de construcție ale clădirii de referință. Creșterea cantității de izolație în cazul sistemului ISPA este atribuită materialului suplimentar conținut de ISPA. Pentru a evidenția volumul suplimentar care trebuie transportat în cazul ISPA, distanța de transport a fost mărită cu 50%.

5.5 Emisii conținute de sistemele de izolare

Compararea emisiilor încorporate ale celor două sisteme de izolație este realizată conform în

conformitate cu EN-15978 [11] și este determinată la 7.623,72 kgCO₂eq pentru EB cu 6,7% mai puțin decât sistemul ISPA, 8.157,38 kgCO₂eq.

5.5.1 Transportul materialelor de izolație

Capitolul cuprinde emisiile atribuite transportului celor două sisteme de izolare. În cazul emisiilor generate de transport, diferența dintre cele două sisteme este estimată la 322,86 kgCO₂eq, cu 60,5% mai multe emisii generate de ISPA.

5.5.2 Manopera și procesul de producție al sistemelor de izolație

Emisiile suplimentare generate de un proces de construcție mai complex nu sunt luate în considerare în timpul acestui studiu. În consecință, emisiile generate de procesul de producție și manopera sistemelor de izolare este considerată egală.

5.5.3 Întreținere și înlocuire

Nu s-au efectuat teste asupra fazelor de întreținere și înlocuire a noului sistem, însă toate studiile efectuate cu privire la caracteristicile fizice prevăd un comportament similar cu sistemul de izolație existent. Prin urmare, se presupune că emisiile generate în timpul întreținerii și înlocuirii materialelor sunt similare.

5.5.4 Consumul de energie pentru încălzire

Consumul de energie al clădirii în ipoteza că este aceasta este izolată cu sistemul de izolare existent dar și cu ISPA este determinat teoretic. Pentru a valida acuratețea consumurilor calculate teoretic, sunt prezentate măsurătorile în timp real efectuate de echipa de proiectare. Aceste date sunt prezentate în Tabelul 3. Conform estimărilor teoretice, în faza de exploatare a clădirii, emisiile generate în cazul ISPA, sunt de 15,05 kWh/(m²·year), cu 35,5% mai mici decât cele generate în cazul EIS, 23,35 kWh/(m²·year).

Tabelul 3. Necesarul de energie pentru încălzire

tip izolație		EIS	EIS	ISPA
tip determinare		măsurători reale	măsurători teoretice	
consum de	kWh/m ² ·an	21.24	23.35	15.05
energie	kWh/an	74,340.00	81,725.00	52,675.00

În continuare, emisiile clădirii au fost estimate în ipoteza în care aceasta ar fi amplasată în cele cinci zone climatice naționale. Estimările sunt prezentate în Tabelul 4:

Tabelul 4. Consumul de energie pentru încălzirea conform amplasării în zonele climatice naționale

tipul izolației		EIS	ISPA
zona climatică II (Salonta)	kWh/m ² ·an	23,35	15.05
	kWh/an	81,725.00	52,675.00
zona climatică I (București)	kWh/m ² ·an	22,70	14.63
	kWh/an	79,448.00	51,202.00
zona climatică III (Cluj-Napoca)	kWh/m ² ·an	23,82	15.35
	kWh/an	83.375,00	53.725,00
zona climatică IV (Brașov)	kWh/m ² ·an	24,16	15.57
	kWh/an	84.574,00	54.495,00
zona climatică V (Miercurea Ciuc)	kWh/m ² ·an	25,07	16.2
	kWh/an	87.752,00	56.700,00

5.5.5 Finalul perioadei de viață a clădirii. Faza de demolare

Emisiile atribuite etapei de demolare sunt similare în cazul celor două cazuri analizate. Efectul limitat al ISPA este cauzat așa cum era de așteptat de conținutul similar de material izolator, adică de vată minerală bazaltică.

5.6 Rezultatele finale ale analizei emisiilor înglobate

Rezultatele finale conform fiecărei categorii de impact în conformitate cu EN-15978 sunt prezentate în acest capitol. Reducerea emisiilor încorporate se majorează odată cu creșterea duratei de viață. Acest lucru este cauzat de faptul că, în cazul unei durate de viață mai lungi, proporția de emisii atribuite fazei de exploatare crește în ceea ce privește emisiile totale încorporate.

De exemplu, dacă luăm în considerare o durată de viață de 50 de ani, reducerea este între 3,21% în cazul utilizării totale a energiei primare și 1,52% în cazul POCP.

5.7 Rezultate finale conform emisiilor produse în timpul producției materialelor și al utilizării clădirii

Conform studiului emisiilor înglobate, pentru o durată de viață de 50 de ani, clădirea are un GWP total de 3 3 556 109,41 kgCO₂eq. Emisiile economisite de sistemul de izolație inovator în comparație cu EIS este estimată la 53.742,50 kgCO₂eq. Conform așteptărilor, în comparație cu alte clădiri școlare, emisiile încorporate în construcția de referință sunt cu până la 34,4% mai mici decât ale clădirilor școlare cu structură și sistem de izolație comune (beton și zidărie).

5.8 Studiul privind sustenabilitatea economică

Calculul costului global implică însumarea tuturor operațiunilor și a costurilor inițiale. Toate valorile însumate se vor referi la aceeași dată de referință, adică primul an de analiză. Vor fi luate în considerare rata de actualizare, evoluția prețurilor și perioada de analiză.

5.8.1 Evaluarea perioadei de amortizare

Perioadei de amortizare economică pentru ISPA a fost determinată la trei ani.

6. Concluzii. Contribuții personale și direcții de cercetare

6.1 Concluziile programului de cercetare

Concluziile care au fost formulate pe baza studiilor teoretice și experimentale sunt următoarele:

1. Grosimea optimă a izolației cu straturi de aer este atinsă atunci când numărul lui Rayleigh se apropie, dar nu scade sub limita de 1200 pentru straturile verticale de aer și 1500 pentru straturile orizontale de aer.
2. Rezultatele încercărilor de laborator au determinat o conductivitate termică ușor mai mare a sistemului ISPA comparativ cu sistemul de izolație existent cu aproximativ 6,9%, de la 0,03907 W/(m·K) la 0,04196 W/(m·K).
3. Rezistența termică a pereților exteriori este îmbunătățită cu peste 45,32% de la 4,28 la 5,67 (m²·K)/W și în cazul plăcii superioare cu mai mult de două ori de la 5,3 la 11,6 m²·K/W. Aceste îmbunătățiri ale proprietăților de transfer termic au fost realizate cu un consum similar de material izolator. Emisiile de CO₂ încorporate generate în timpul etapei de fabricație au fost estimate la 7.623,72 kgCO₂eq pentru izolația existentă și la 8.157,38 kgCO₂eq pentru sistemul de izolație experimental.
4. Utilizarea noului sistem (cu straturi de aer) determină o creștere a grosimii izolației cuprinsă între 63% (la perete) și 232% (la placa superioară) comparativ cu sistemul existent de izolație.
5. În comparație cu sistemul existent de izolație din vată minerală al unui liceu construit la standarde pasive, folosind sistemul de izolație bazat pe straturi de aer paralele, consumul de energie este redus cu aproximativ 35%, de la 23,35 kWh/m²an la 15,05 kWh/m²an.

6. Se preconizează că procesul de fabricație mai complex poate produce emisii de CO₂ suplimentare.
7. Se estimează că emisiile suplimentare generate în faza de producție vor fi economisite în primul an de funcționare din cauza reducerii semnificative a necesarului de energie.

6.2 Contribuții personale

Pe baza rezultatelor și evaluărilor efectuate autorul își aduce următoarele contribuții originale:

- prezentarea concluziilor unui amplu studiu bibliografic, cuprinzând, lucrări de cercetare care se referă la situația internațională actuală privind consumul de energie și performanța energetică a clădirilor;
- participarea la anumite faze de execuție a unei clădiri de referință utilizată ca studiu de caz; participarea la implementarea unui sistem de monitorizare aplicat pe elementele de construcții și instalații ale acesteia;
- dezvoltarea unei strategii și proceduri de procesare a unei cantități mari de date înregistrate de sistemul de monitorizare și pentru prezentarea concluziilor relevante după o perioadă de măsurare de 21 de luni;
- efectuarea de cercetări experimentale în laborator, pentru determinarea conductivității termice echivalente a sistemului ISPA propus; confecționarea unor specimene pentru efectuarea determinărilor, analiza rezultatelor experimentale obținute și formularea unor concluzii fundamentate științific;
- generarea unor modele de calcul utilizând instrumente de calcul avansate pentru optimizarea sistemului de izolare termică cu goluri de aer propus și a unor modele complexe, cu 4 zone diferite, pentru studiul comportării clădirii de referință în ipoteza utilizării unui sistem clasic de izolare și sistemului de izolare de tip ISPA;
- stabilirea unei proceduri de calibrare a analizelor privind simularea comportării clădirii în concordanță cu temperaturi reale de operare și cu rezultate obținute din monitorizarea reală a comportării clădirii de referință;
- efectuarea unui studiu comparativ privind emisiile de gaze cu efect de seră și impactul asupra mediului pentru sistemele de izolare analizate.

6.3 Recomandări

Autorul propune următoarele direcții viitoare de cercetare:

1. Prelucrarea statistică și analiza datelor de monitorizare înregistrate suplimentar
2. Aplicarea și monitorizarea sistemului de izolație ISPA în condiții reale
3. Inventarierea reducerii consumului de energie și a emisiilor generate în timp
3. Extinderea studiilor pentru implementarea noului sistem de izolație și la alte clădiri
4. Continuarea studiului privind opțiunile de îmbunătățire a noului sistem de izolație
5. Evaluarea influenței asupra costurilor de producție, transport și dezafectare

6.4 Lista lucrărilor publicate

Rezultatele studiilor și cercetărilor experimentale au fost diseminate prin publicarea următoarelor lucrări științifice:

- **R. C. Ene**, S. Brata, I. Boros, D. Dan, "Effect of inserted parallel air chambers in rockwool

and polystyrene insulation panels”, Journal of Environmental Protection and Ecology, Vol. 21, Pag 202-210, May 2020 (ISSN 1311-5065), WOS:000531885700024

- **R. C. Ene**, S. Brata, I. Boroş, R. Chendeş, D. Dan, "Theoretical Study on the Effect of Parallel Air Chambers Embedded in Rockwool Panels on the Energy Consumption of a Low-Energy High School." Sustainability 14.12 (2022): 7425, WOS:000816824100001

- S. Brata, **R. C. Ene**, D. Dan, "Low-energy school building – Effect of 2D vs. 3D steady-state simulation of thermal bridges”, CONFERINȚA NAȚIONALĂ TEHNICO-ȘTIINȚIFICĂ (cu participare internațională) “Tehnologii Moderne pentru Mileniul III” - a 18-a ediție - ORADEA, ROMANIA, APRIL 05-06, p123-128, 2019 (ISBN: 978-88-87729-41-2). WOS:000617030100021

- S. Brata, **R. C. Ene**, D. Dan, "Analysis of the linear thermal coefficients according to multiple insulation systems”, CONFERINȚA NAȚIONALĂ TEHNICO-ȘTIINȚIFICĂ (cu participare internațională) “Tehnologii Moderne pentru Mileniul III” - a 18-a ediție - ORADEA, ROMANIA, APRIL 05-06, p167-172, 2019, (ISBN: 978-88-87729-41-2). WOS:000617030100028

- **R. C. Ene**, S. Brata, D. Dan, "Life Cycle Assessment, an integrated vision to energy efficiency in the building industry” Chapter for "Energetics Perspective on the Environmental and Human Impact of Buildings" - Echivalat din capitol de carte in Springer Tracts in Civil Engineering ISBN 978-3-030-57418-5/ ISSN 2366259X, p313-340, BDI- SCOPUS doi:10.1007/978-3-030-57418-5_12

- **R. C. Ene**, S. Brata, D. Dan, "The insulating façade system with parallel air chambers”, Global and Regional in Environmental Protection (GLOREP) 2018 Conference, Timisoara 15-17 November, Timișoara, (Conference Proceeding Editura Politehnica, Available online: [https://glorep.upt.ro /resource/Glorep2018.pdf](https://glorep.upt.ro/resource/Glorep2018.pdf)) pp. 63-67.

The research was partially funded by a grant from the Romanian Ministry of Research, Innovation and Digitalisation, project number PFE 26/30.12.2021, PERFORM-CDI@UPT100 - The increasing of the performance of the Polytechnic University of Timișoara by strengthening the research, development and technological transfer capacity in the field of „Energy, Environment, and Climate Change” at the beginning of the second century of its existence, within Programme 1 - Development of the national system of Research and Development, Subprogram 1.2 - Institutional Performance - Institutional Development Projects - Excellence Funding Projects in RDI, PNCDI III

Bibliografie (selectivă)

1. Agenția Europeană de Mediu EEA (2017). Tendințe și proiecții din Europa 2017. . Urmărirea progreselor înregistrate în direcția atingerii obiectivelor în materie de climă și energie ale Europei în domeniul tutunului, Raportul AEM nr. 17/2017.
2. Directiva 2006/32/EC a Parlamentului European din 5 April 2006 privind eficiența energetică la utilizatorii finali. Disponibil online pe site-ul: www.eur-lex.europa.eu
3. Mc 001/2006 - Metodologia de calcul al performanței energetice a clădirilor.
4. Ordin nr. 2641/2017 privind modificarea și completarea reglementării tehnice "Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor", aprobată prin Ordinul ministrului transporturilor, construcțiilor și turismului nr. 157/2007
5. Mc001-2022, Metodologia de calcul al performanței energetice a clădirilor.. Disponibil online pe site-ul: www.aaecr.ro
6. Evaluarea performanței energetice și a ciclului de viață a clădirilor. 02.2020. dr. ing. Iosif

Boros.

7. Institutul de cercetări Fraunhofer IBP. Disponibil online pe site-ul: www.wufi.de.
8. Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C., & Garcia-Martinez, A. (2016) "Use of natural-fiber bio-composites in construction versus traditional solutions: Operational and embodied energy assessment." *Materials*, 9(6), pp. 465.
9. Disponibil online: www.lambda-messtechnik.de.
10. Disponibil online: www.oneclicklcaapp.com.
11. Program de calcul. AllEnergy. IPCT București & Algorithm+" Disponibil online: www.algorithm.ro
12. Program de calcul. - Heat3. Available online: www.buildingphysics.com
13. Program de calcul. Disponibil online: www.antherm.at/
14. "ISO 14040:2006. Management de mediu. Environmental management. Evaluarea ciclului de viață." Disponibil online: www.iso.org
15. "ISO 14044:2006. Management de mediu. Environmental management. Evaluarea ciclului de viață. Cerințe și instrucțiuni de aplicare," Disponibil online: www.iso.org
16. "EN 15978:2011. Sustenabilitatea lucrărilor de construcție – Evaluarea sustenabilității clădirilor – metode de calcul," Disponibil online: www.standards.iteh.ai
17. "ISO 21929-1:2011. Sustenabilitatea clădirilor. Indicatori de sustenabilitate. Part 1: Metode cadru pentru dezvoltarea indicatorilor în cazul construcțiilor," Disponibil online: www.iso.org
18. "ISO 21931-1:2022. Sustenabilitatea construcțiilor civile. Sustainability in buildings and civil engineering works. Metode cadru pentru evaluarea performanței de mediu, sociale și economice a lucrărilor de construcții ca bază pentru evaluarea durabilității Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment" Disponibil online: www.iso.org
19. "ISO 14025:2006. Declarații de mediu. Type III Principii și proceduri," Disponibil online: www.iso.org