

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ
Facultatea de Inginerie a Instalațiilor
Departamentul de Termotehnică și Echipamente Termice

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

ASPECTE PRIVIND CONFORTUL INTERIOR ȘI PERFORMANȚELE CLĂDIRILOR CARE UTILIZEAZĂ SISTEME PASIVE

Autor:

Drd.ing. Doru-Daniel SABIE

Conducător științific:

Conf.univ.dr.habil.ing. Adrian-Gabriel GHIAUȘ

BUCUREȘTI
2020

CUPRINSUL REZUMATULUI

1. Introducere	1
2. Termotehnica clădirilor	3
3. Reglementări în domeniul eficienței energetice.....	3
4. Energetica clădirilor pasive.....	4
5. Mișcarea aerului în camere ventilate mecanic.....	6
6. Modelarea numerică a punților termice.....	13
7. Concluzii.....	16
Bibliografie selectivă.....	19

1. Introducere

La nivel mondial, în ultimii douăzeci de ani, creșterea exploatării într-un ritm fără precedent a resurselor naturale convenționale, ca urmare a tendinței de creștere a cererii de utilizare a energiei la consumatorul final, consecință a creșterii populației și gradului de dezvoltare economico-socială, a generat în mediile științifice, economice și decizionale provocări majore cu privire la două aspecte de importanță capitală:

- riscul epuizării resurselor naturale ale planetei;
- impactul masiv pe care îl are asupra mediului consumul de energie primară, prin emisiile de gaze cu efect de seră privind distrugerea stratului de ozon, încălzirea globală, schimbările climatice, etc., (Stowell et al., 2017, Thomas et al., 2014).

La nivelul Uniunii Europene, energia utilizată în clădiri reprezenta în anul 2016 aproximativ 40% din consumul final de energie și aproape 55% din consumul total de energie electrică din care, ponderea cea mai mare este reprezentată de clădirile rezidențiale, aproximativ două treimi din acesta.

O soluție eficientă de creștere a performanței energetice a clădirilor și implicit de reducere a consumului de energie primară în clădiri presupune adoptarea principiilor pasive promovate prin standardul “Casei pasive care a devenit standard de referință, demonstrându-și viabilitatea la nivel mondial și implementarea acestuia în cadrul Strategiei energetice naționale în domeniul construcțiilor de imobile noi și a celor care vor intra în proces de renovare majoră.

Importanța subiectului abordat

Oportunitatea și necesitatea temei abordate a fost generată de cadrul general (sumar) în care se tratează în prezent reabilitarea a fondului de clădiri existente la nivel național, fără a avea un orizont (țintă) al nivelului de performanță energetică care trebuie atins, motiv de a readuce în prim plan modalitățile de îmbunătățire a

performanțelor energetice a clădirilor prin cercetarea și implementarea sistemelor pasive constructive și funcționale.

Scopul cercetării și obiectivele propuse

Obiectivul principal al cercetării științifice în cadrul Proiectului Programului de Cercetare Științifică I-a constituit studierea principiilor pasive care stau la baza proiectării, execuției și evaluării caselor cu consum redus de energie, promovate prin standardul Caselor Pasive, și aplicarea acestor strategii în cazul clădirilor care se construiesc sau reabilitează în vederea îmbunătățirii performanțelor energetice ale acestora.

Conținutul tezei de doctorat

În primul capitol se prezintă aspectele introductive cu privire la situația existentă pe plan mondial privind consumul de energie destinat pentru asigurarea utilităților clădirilor rezidențiale, fiind evidențiate principalele reglementări care stabilesc liniile directoare în domeniul eficienței energetice a clădirilor.

În capitolul 2 sunt prezentate aspectele teoretice care stau la baza proceselor de transfer de căldură întâlnite la nivelul elementelor componente ale anvelopei clădirilor și modul de calcul în regim termic nestaționar.

În capitolul 3 sunt trecute în revistă principalele directive, acte normative și reglementări tehnice la nivel european și național în domeniul eficienței energetice a clădirilor.

Capitolul 4 tratează problematica caselor pasive, fiind prezentate principiile de bază ale caselor pasive, performanțele energetice ale primei clădiri prototip, criteriile de evaluare a acestora, softul de proiectare/evaluare specific caselor pasive precum și rezultate proiectelor de cercetare științifică de validare a acestor principii la nivel internațional și național.

În capitolul 5 se tratează mișcarea aerului în interiorul unei case pasive, prin intermediul simulării numerice a distribuției aerului într-un spațiu de locuit de tip living și bucătărie open space, în situațiile de proiectare inițială și de realizare finală ale imobilului, în scopul optimizării distribuției jeturilor de aer, realizându-se analiza confortului termic interior pentru zonele caracteristice frecventate de ocupanți.

În capitolul 6 sunt prezentate și analizate rezultatele calitative și cantitative obținute în urma simulării numerice a transferului de căldură prin structuri plane de tip punte termică liniară prezente în alcătuirea elementelor anvelopei clădirii examinate, utilizând sisteme pasive de eficientizare termică a acestora .

În ultimul capitol sunt prezentate concluziile generale pentru problematica abordată în capitolele anterioare pe baza rezultatelor obținute, diseminarea acestora și perspectivele cercetării științifice în acest domeniu.

2. Termotehnica clădirilor

Generalități

Termotehnica investighează procesele de transfer căldură și masă (al vaporilor de apă), prin elementele componente ale acestora, precum și efectele pe care aceste procese le au asupra condițiilor de microclimat interior, de igienă și de confort ale ocupanților, dar și asupra stabilității termofizice și mecanice a elementelor constructive ale acestora, (Ștefănescu, 2009).

Noțiuni fundamentale

Principalele noțiuni fundamentale cu care se operează în teoria și aplicațiile legate de studiul fenomenelor de transfer de căldură prin elementele constructive ale clădirilor sunt: temperatura, gradientul de temperatură, câmpul de temperaturi, linia izotermă sau curba de temperatură și suprafața izotermă. Mărimile fizice caracteristice structurilor examinate evaluate în cadrul proceselor de transfer căldură sunt: fluxul termic sau debitul de căldură ($\dot{Q}$), exprimat în W, fluxul termic unitar sau densitatea fluxului termic ($\dot{q}$), exprimat în W/m^2 , rezistența termică globală în câmp exprimată în m^2K/W , coeficientul global de transfer de căldură în W/m^2K , (Ghiaus, 2003).

Punți termice

Zonele din componența elementelor de construcții, care prezintă o permeabilitate termică sporită față de restul elementului, determinând intensificarea transferului de căldură modificând cuantumul fluxului termic unidirecțional transferat datorită alcătuirii structurale sau geometrice, sunt denumite *punți termice* (Ștefănescu, 2012).

La nivelul elementelor componente ale anvelopei clădirilor, punțile termice liniare caracterizate prin *coeficientul liniar de transfer de termic* (transmitanță termică liniară) exprimat în W/mK , produc consecințe directe din punct de vedere higrotermic asupra transferului de căldură, modificând alinura suprafețelor izoterme, a liniilor de flux termic și a temperaturilor superficiale interioare, față de cele în câmp curent.

3. Reglementări în domeniul eficienței energetice

Cadrul legislativ european

Protocolul de la Kyoto, reprezintă primul instrument legal la nivel mondial, prin care au fost stabilite constrângeri legale de monitorizare a emisiilor de gaze cu efect de seră (GES) și reducerea emisiilor poluante pentru țările industrializate cu minim 8% a acestora în perioada 2008-2012 față de anul 1990 fiind urmat de o serie de directive prin care s-au stabilit niveluri țintă privind reducerea emisiilor de dioxid de carbon (CO_2), prin creșterea eficienței energetice la nivelul Uniunii Europene.

La nivel european principalele acte normative elaborate și emise în vederea creșterii performanțelor energetice ale clădirilor au fost: *Directiva 2002/91/CE* (Energy Performance of Building Directive – EPBD), *Directiva 2009/28/CE* (Renewable Energy Directive – RED energia regenerabilă), *Directiva 2010/31/UE*, a („reformare

EPBD” - nearly Zero Energy Buildings - nZEB), *Directiva 2012/27/UE* (Energy Efficiency Directive – EED- renovarea clădirilor la standarde de eficiență energetică ridicată), *Directiva 2015/1513/EU*, - utilizarea energiei obținute din SER), și *Directiva (UE) 2018/844* privind calitatea de prosumator a clădirilor nou construite.

Cadrul legislativ național

Principalele actele normative în domeniul eficienței energetice la nivel național privind reabilitarea termică a fondului construit existent și stimularea economisirii energiei termice sunt: O.G. nr. 29/31.01.2000 pentru reabilitarea și modernizarea termică a clădirilor și instalațiilor aferente, O.G. nr.174/09.12.2002 pentru instituirea măsurilor speciale pentru reabilitarea termică a unor clădiri de locuit multietajate și a instalațiilor aferente, Legea 372/13 din 2005, privind performanța energetică a clădirilor raportată la condițiile climatice exterioare și de amplasament, Legea nr. 220/2008 pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei din surse de energie regenerabilă, O.U.G. nr. 18/2009 privind creșterea performanței energetice a blocurilor de locuințe, “*Metodologia de calcul al performanței energetice a clădirilor*, Indicativ. Mc 001/1-6-2006-2013, Normativul privind calculul termotehnic al elementelor de construcție ale clădirilor, ind. C107/1-7-2005, precum și o serie de ghiduri și soluții cadru pentru reabilitarea termo-higro-energetică a anvelopei clădirilor de locuit existente.

4. Energetica clădirilor pasive

În acord cu principiile care stau la baza teoriei enunțate de Institutul de Case Passive (Passiv Haus Institut-PHI) din Darmstadt,: “*O casă pasivă* este o clădire pentru care confortul termic, conform ISO 7730, poate fi realizat exclusiv prin post-încălzirea sau post-răcirea masei de aer proaspăt, care este necesară pentru a obține suficiente condiții de calitate a aerului în interior, conform DIN 1946, fără a fi nevoie de recircularea suplimentară a aerului”, (Feist, 1993).

Prima Clădire Pasivă, a fost realizată între anii 1990/91 în orașul Darmstadt Kranichstein, Germania, de către o echipă de specialiști care efectuau cercetări de profil în cadrul proiectului “Passive House Preparatory Research Project”, aflați în strânsă colaborare și consultare cu profesorii Bo Adamson și Gerd Hauser, (passiv.de).

Rezultatele obținute în urma monitorizării consumurilor de energie efectuate în casa pasivă din Darmstadt-Kranichstein, au confirmat faptul că din punct de vedere energetic, în comparație cu o clădire standard proiectată după prevederile codurilor germane din perioada respectivă, cererea anuală de energie pentru încălzire s-a diminuat drastic cu până la 90%, de energie electrică cu 30% ca urmare a utilizării aparatelor de uz casnic eficiente energetic, iar consumul suplimentar de gaze pentru echipamentele auxiliare pentru producere energie termică este mai mic cu 15%, (Ebel și Feist, 1997).

Principiile conceptului Casei Passive

Principiile de proiectare și execuție care stau la baza conceptului sunt: termoizolație eficientă ($k_{op} \leq 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$), ferestre eficiente ($k_{fer} \leq 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$) eliminarea punților termice ($\psi \leq 0.01 \text{ W/mK}$), etanșeitatea elementelor anvelopei ($n_{a(50 \text{ Pa})} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$) și sistem de ventilare cu recuperare de căldură ($\eta_{rec} \geq 80\%$). Pe lângă aceste condiții de bază în cadrul procesului de proiectare al casei pasive sunt adoptate o serie de strategii și măsuri denumite pasive: forma compactă a clădirii, orientarea clădirii, utilizarea sistemelor de umbrire, preîncălzirea sau pre-răcirea pasivă a aerului proaspăt, utilizarea surselor de energie regenerabilă și utilizarea aparaturii electrotcasnice eficiente energetic, (passipedia.org).

Softul de proiectare al Caselor Passive

În cadrul proiectelor de cercetare în etapele de simulare a clădirilor pasive în regim de transfer termic staționar, a fost concepută o procedură calcul a sarcinii termice, care a devenit ulterior un instrument de calcul permanent dezvoltat de PHI, extrem de util în fazele de proiectare, testare, evaluare și certificare a caselor pasive, denumit Pachetul de Proiectare a Casei Passive (Passive House Planning Package - PHPP), pentru asigurarea confortului termic interior al ocupanților.

Criterii de certificare a Caselor Passive

În vederea evaluării performanțelor specifice clădirilor pasive, în conformitate cu principiile conceptului Casei pasive, PHI a stabilit criteriile de certificare corespunzătoare următoarelor standarde: *Passiv House*, pentru clădiri noi rezidențiale și non rezidențiale, *EnerPHit*, pentru clădiri existente care se reabilitează (renovează) și *PHI Low Energy Building*, pentru clădiri cu consum redus de energie care nu respectă în totalitate criteriile standardului Casei Passive, (passiv.de).

Pentru a garanta un nivel ridicat de performanță energetică, un nivel optim de confort, un grad ridicat de satisfacție al utilizatorilor, precum și protecția împotriva daunelor cauzate de condens elementelor structurale și de închidere a clădirii sunt necesare a fi respectate cerințele minime general valabile pentru cele trei standarde privind: *rata de supraîncălzire a clădirii* - temperatura interioară să nu depășească valoarea de 25°C mai mult de 10% din perioada anului, fără răcire activă, iar *rata de supraumiditate a casei* – umiditatea absolută să nu depășească valoarea de 12 g/kg mai mult de 20% din perioada anului, fără răcire activă, respectiv 10% cu răcire activă.

Proiecte naționale de cercetare științifică

În România, până în prezent, au fost inițiate și dezvoltate câteva proiecte educaționale de cercetare științifică în domeniul clădirilor pasive în mediul universitar românesc: în 2011 proiectul “Case pasive adecvate condițiilor climatice din România” cu participarea mai multor instituții, desfășurat în cadrul Universității POLITEHNICA din București, în 2012 în cadrul Universității Politehnice din Timișoara, clădirii “Casa aproape zero energie și casa pasivă – soluții sustenabile pentru clădiri rezidențiale” având ca obiectiv principal validarea principiilor și soluțiilor de proiectare respectiv

construcție a clădirilor din România, la standardul de casă pasivă, respectiv clădire cu consum de energie aproape zero și “Casa pasiva solară independentă energetic EFdeN”, cu o abordare complexă a proiectării pe criterii de independență și eficiență energetică în care strategiile de proiectare ale casei pasive se află în corelație cu strategiile de exploatare a condițiilor bioclimatice, sistemele și strategiile active (consumatoare de energie), (Catalina, 2015).

Metode de ventilare a clădirilor pasive

Pentru clădirile pasive energetic în funcție de condițiile climaterice specifice zonei climatice pot fi adoptate sistemele de ventilare care au la bază metodele de ventilare pasive (naturale) de tip: windcatcher sau higroreglabile care conțin elemente de comandă specializate care permit controlul debitelor de aer, în funcție de nivelul concentrației de poluanți și/sau nivelul de higrometrie (Saadatian, et al., 2012, Jomehzadeh et al., 2017), și sisteme de ventilare descentralizate de ventilare mecanică cu simplu sau dublu flux respectiv centralizat-controlate cu recuperare de căldură.

Utilizarea energiei alternative pentru clădiri pasive

Analiza necesității și oportunității utilizării eficiente a sistemelor de valorificare a potențialului energetic al surselor de energie regenerabilă, a vizat trei aspecte importante: tehnico-economic, privind costurile de investiție necesare implementării sistemelor care utilizează sursele regenerabile de energie pentru încălzire/răcire și preparare a.c.m., costurile de exploatare aferente utilizării acestora, în raport cu cheltuielile de exploatare a surselor clasice de energie disponibile și impactul utilizării acestora asupra mediului înconjurător.

Analiza comparativă a diferitelor sisteme de încălzire cu sistemul care utilizează energia regenerabilă, bazat pe pompa de căldură de tip aer-apă s-a realizat prin intermediul aplicației specializate NIBE DIM SE, având ca obiect de studiu un imobil rezidențial existent, certificat pasiv energetic de PHI.

În urma simulării au rezultat: reducerea anuală a consumului de energie, a costurilor de exploatare, amortizarea investiției pe durata de viața a sistemului și reducerea amprente de carbon a clădirii asupra mediului înconjurător.

5. Mișcarea aerului în camere ventilate mecanic

Modul în care arhitectura spațiilor și instalației de ventilare proiectate, precum și dispunerea elementelor de mobilier propuse de proiectant influențează distribuția fluxurilor de aer prin spațiile analizate, cu implicații directe asupra confortului ocupanților, s-a realizat prin intermediul modelării și simulării numerice a distribuției aerului în interiorul unei case pasive în fazele de proiectare inițială și finală ale imobilului. Prin intermediul modelărilor și simulărilor numerice de tip CFD (Computational Fluid Dynamics), cu ajutorul software-ului specializat COMSOL MULTIPHYSICS, s-a propus să se analizeze la nivel global și local curgerea aerului printr-un domeniu de interes stabilit, în scopul verificării soluției de ventilare adoptate în vederea îmbunătățirii distribuției aerului în spațiul analizat.

Descrierea imobilului analizat

Obiectul de studiu al analizei curgerii aerului îl constituie o locuință unifamilială, situată în localitatea Cluj-Napoca, strada Vânătorului, nr 31, alcătuită din subsol, parter și etaj, proiectată cu respectarea principiilor de bază ale standardului Casei pasive.

Elementele componente ale anvelopei clădirii, evidențiate în secțiunea caracteristică a imobilului analizat au următoarele caracteristici: pereți exteriori $k_{op} = 0,125 \text{ W/m}^2\text{K}$, pardoseală: $k_{pard} = 0,111 \text{ W/m}^2\text{K}$, tâmplărie-ramă: $k_r = 0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$, vitraj: $k_v = 0.51 \text{ W/m}^2\text{K}$, acoperiș/terasă: $k_{ter} = 0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Definirea geometriei modelului fizic

Domeniul de interes (zona de calcul/lucru) pentru modelarea și simularea numerică, ce a constituit domeniul de analiză este situat la nivelul parterului imobilului și cuprinde:

- bucătăria amplasată pe N, având: $h=2,40\text{m}$ și șase grile de evacuare,
- sufrageria amplasată pe S, având: $h=3,05\text{m}$, și două grile de introducere
- holul de legătură dintre acestea, având $h=2,70\text{m}$.

Configurarea modelelor fizice ale domeniului analizat s-a realizat pentru două cazuri distincte: cazul 1 - fără obiectele de mobilier propuse de arhitect în domeniul analizat și cazul 2 – cu obiectele de mobilier propus de arhitect în domeniul analizat.

Ipotezele de lucru simplificatoare considerate au fost următoarele: fluidul de lucru prin domeniul de calcul este aerul uscat cu $T_{20} = 293,15 \text{ K}$, jet izoterm, sistem adiabatic (nu există transfer de căldură și masă, ci doar de impuls), fluid incompresibil Newtonian (viteze și presiuni mici - nu intervine factorul de compresibilitate), forțele masice se neglijează (nu există diferențe de presiune determinate de câmpul gravitațional) și fără surse interioare de căldură în domeniul analizat.

Configurarea modelului numeric

Pentru modelarea și simularea curgerii aerului prin domeniul de simulare s-a utilizat aplicația COMSOL MULTYPHISICS modulul „Chemical Engineering”, secțiunea „Turbulence Flow”, modelul “ $k-\varepsilon$ Turbulence”, a cărei ecuație de mișcare este ecuația Navier-Stokes de forma:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \eta \nabla^2 u + \rho \cdot (u \cdot \nabla) u + \nabla p = F, (\nabla \cdot u) \quad (1)$$

unde: η – vâscozitatea dinamică în Ns/m^2 ; ρ – densitatea în kg/m^3 ; u – viteza în m/s ; p – presiunea în N/m^2 ; F - forța volumică – gravitațională în N/m^3 .

Condiții de unicitate

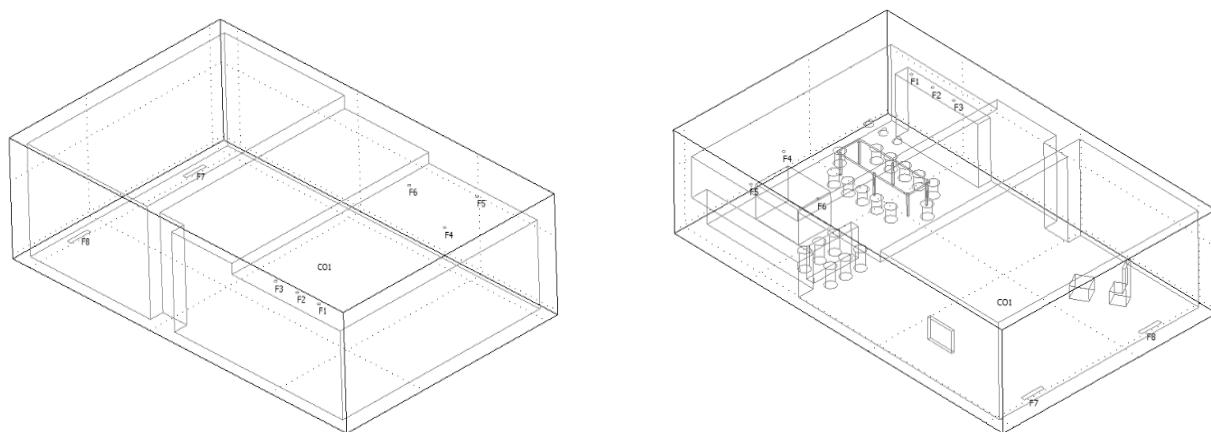
Pentru simularea numerică a curgerii aerului prin domeniile de lucru considerate în faza preliminară procesării datelor de intrare se impun condiții de unicitate: formate la rândul lor din condiții inițiale (temperatura constantă, regim staționar, ventilație echilibrată, $(\dot{V}_{intr} = \dot{V}_{extr})$, debitul volumic de aer proaspăt introdus este egal cu debitul

volumic de aer extras și condițiile de frontieră: elementele delimitatoare ale domeniului au fost considerate graniță închisă, NO SLIP - stratul de aer în contact cu suprafața peretelui, aderent la acesta, $v_0=0$, obiectele de mobilier au fost extrase din domeniul de simulare, în volumul ocupat de acestea s-a considerat numai aer, grilele de introducere și evacuare sunt considerate granițe deschise, vitezele jetului de aer proaspăt introdus au fost: $v_1 = 0,1 \text{ m/s}$ și $v_2 = 0,2 \text{ m/s}$, debitele volumice de aer proaspăt introdus: $\dot{V}_{1int} = 86 \text{ m}^3/\text{h}$ și $\dot{V}_{2int} = 172 \text{ m}^3/\text{h}$.

Domeniul de simulare

Configurația domeniilor de simulare rezultate în urma introducerii datelor de intrare și a condițiilor la unicitate pe frontierele interioare și exterioare ale subdomeniilor de simulare corespunzătoare celor două cazuri considerate este prezentată în figura 1.

Volumele de aer aferente domeniilor de simulare rezultate pentru cele două cazuri analizate sunt: $V_{1,aer} = 278\text{m}^3$ – (pentru cazul 1) și $V_{2,aer} = 271\text{m}^3$ – (pentru cazul 2).



a) Cazul 1 - fără mobilier

b) Cazul 2 - cu mobilier propus de arhitect

Figura 1: Domeniul de simulare

Rețeaua de discretizare

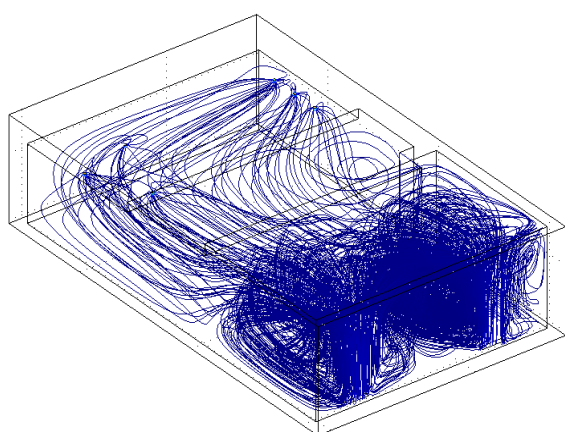
Discreditarea domeniului de simulare, s-a realizat adoptând metoda elementului finit, iar rețelele nodale rezultate au în componere 24.089 elemente în cazul fără mobilier și 34.497 elemente în cazul cu mobilier.

Simularea curgerii în cazul proiectului inițial

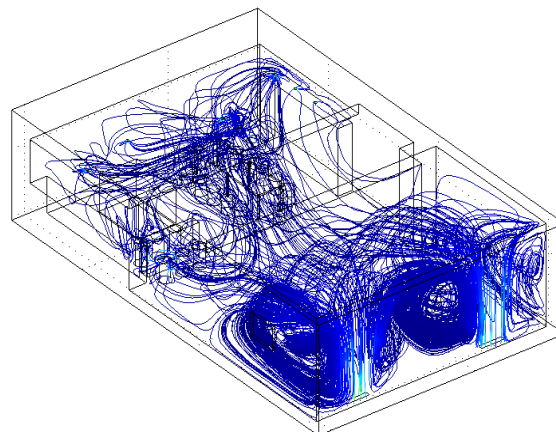
Evaluarea globală și locală a curgerii fluidului de lucru prin domeniul de simulare, în cazul proiectului inițial s-a realizat pentru cele două cazuri considerate, în condițiile vitezelor jeturilor de aer proaspăt introdus cu valorile impuse de $0,1 \text{ m/s}$ și $0,2 \text{ m/s}$, din punct de vedere: **calitativ** prin distribuția liniilor de curent și a vectorilor de viteze și **cantitativ** prin distribuția contururilor de viteze.

Analiza globală calitativă și cantitativă

Analizând curgerea globală calitativă a fluidului de lucru, în faza de proiectare, materializată prin intermediul distribuției liniilor de curent, figura 2, reiese că în zona adiacentă a grilelor de introducere ia naștere o mișcare turbulentă a aerului care se intensifică odată cu creșterea vitezei de introducere a acestuia. Prezența mobilierului propus de arhitect conduce la modificarea configurației turbioanelor de aer, iar în zona bucătăriei are loc o distribuție neuniformă a liniilor de curent datorită prezenței mobilierului din acest spațiu, rezultând în partea superioară a zonei de servire a mesei o mișcare de recirculare a aerului.



Cazul 1 ($v_1 = 0,1 \text{ m/s}$, $\dot{V}_{1\text{int}} = 86 \text{ m}^3/\text{h}$)



Cazul 1 ($v_2 = 0,2 \text{ m/s}$, $\dot{V}_{2\text{int}} = 172 \text{ m}^3/\text{h}$)

Figura 2: Distribuția liniilor de curent

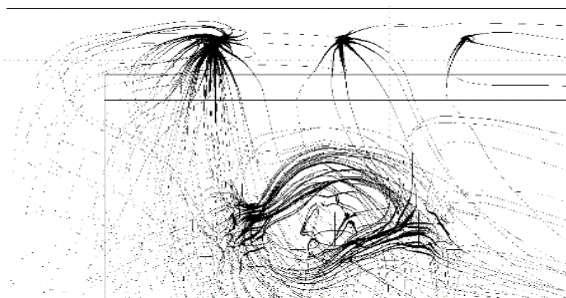
Pentru a pune în evidență existența zonelor în care pot apărea posibile percepții de disconfort local al utilizatorilor, generate de viteza curenților de aer, s-a realizat analiza globală a curgerii fluidului de lucru prin intermediul distribuției vectorilor de viteze prin domeniile de simulare pentru două planuri de secțiune situate la 0,8 m și 1,2 m față de pardoseală. Analiza cantitativă a curgerii prin intermediul contururilor de viteze a pus în evidență prezența jetului de aer ascensional la gurile de introducere care pot genera disconfort termic în zona de sud a domeniului de simulare.

Analiza locală a curgerii izoterme a aerului

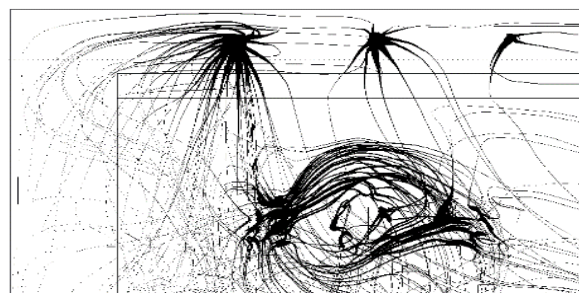
În mod similar din punct de vedere cantitativ și calitativ a fost realizată și analiza locală a mișcării aerului în două planuri de secțiune orizontale de referință corespunzătoare grilelor de admisie a aerului proaspăt și evacuării aerului viciat, pentru vitezele jetului de aer introdus de: 0,1 și 0,2 m/s.

Distribuția contururilor de viteze diferă ca intensitate de la exteriorul la interiorul grilelor, iar în zona centrală a secțiunii de trecere a aerului apar vârfuri ale vitezei mai mari decât viteza medie de introducere, iar în prezența mobilierului “amplitudinea” contururilor de viteze este mai scăzută decât în varianta fără mobilier.

Deasupra mesei din bucătărie, se observă existența unei zone, prezentată în figura 3 în care aerul este recirculat, fapt care poate genera disconfort local ocupanților clădirii pe timpul servirii mesei.



a) ($v_1 = 0,1 \text{ m/s}$, $\dot{V}_{1\text{int}} = 86 \text{ m}^3/\text{h}$)



b) ($v_2 = 0,2 \text{ m/s}$, $\dot{V}_{2\text{int}} = 172 \text{ m}^3/\text{h}$)

Figura 3: Distribuția locală a liniilor de curent la grilele de evacuare – Cazul 2

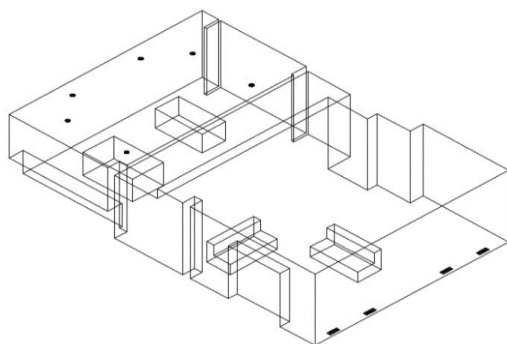
Simularea curgerii în cazul proiectului final

În faza de execuție a imobilului, utilizând datele constructive reale ale construcției și instalației de ventilare reprojectate, s-a realizat modelarea și simularea numerică, în scopul reanalizării curgerii izoterme a aerului în cadrul noului domeniu de interes real, pentru a vedea comparativ cu situația proiectată eficiența soluției de ventilare adoptate.

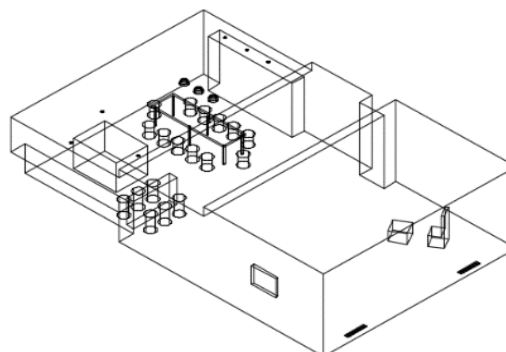
Descrierea modelului fizic real

Prin comparație cu situația proiectată pentru noul domeniu (real) analizat au fost observate diferențe constructive de formă și gabarit care au impus remodelarea acestuia, noul model de simulare numerică rezultat pentru cazul real (situația reală), figura 4, având același volum de aer interior ca și în situația proiectată.

În scopul eliminării turbulențelor din zona grilelor de introducere a aerului proaspăt, a neuniformităților și a zonelor de recirculare din zona bucătăriei s-a reconfigurat instalația de ventilare, modificându-se numărul grilor de refulare a aerului proaspăt introdus, menținându-se secțiunea acestora precum și reamplasarea grilelelor de evacuare a aerului uzat din spațiul destinat bucătăriei luând în calcul dimensiunile și dispunerea noilor piese de mobilier.



a) situația reală

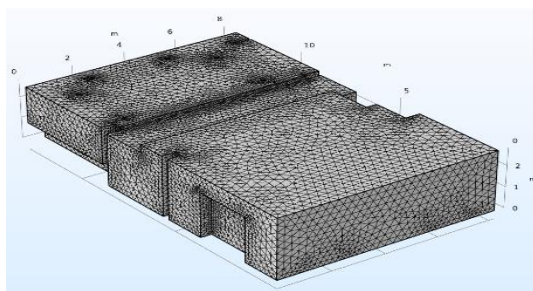


b) situația inițial proiectată

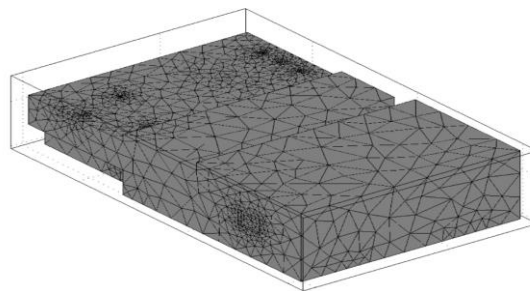
Figura 4: Domeniile de simulare, geometrie 3D, vedere de sus

Rețeaua de discretizare cazul real

Domeniul de simulare numerică real discretizat, utilizând metoda elementului finit, prezentat în figura 5, are în componere 369.662 de elemente față de 34.497 pentru cazul proiectat.



a) situația reală



b) situația inițial proiectată

Figura 5: Rețele de discretizare

Analiza comparativă a curgerii izoterme a aerului

Reanalizând curgerea izotermă a aerului din punct de vedere calitativ și cantitativ la nivel global și local prin compararea rezultatelor simulării curgerii fluidului de lucru prin domeniile de simulare aferente situației inițial proiectate s-a observat că prin soluțiile adoptate au fost remediate inconvenientele generatoare de disconforturi locale datorate vitezelor curenților de aer din spațiul sufrageriei și al bucătăriei.

Analiza termo-aeraulică a curgerii neizoterme a aerului

În vederea efectuării analizei termo-aeraulice a curgerii aerului în condiții neizoterme prin domeniul de simulare real s-a realizat modelarea domeniului de interes real și simularea numerică a fenomenelor cuplate de curgere a aerului și transfer de căldură. Analiza termo-aeraulică globală și locală cantitativă a fenomenelor interconectate a fost realizată pentru situațiile de vară și de iarnă prin intermediul distribuției câmpului de temperaturi și a liniilor de curent în cadrul domeniului de simulare.

Analiza termo-aeraulică în situația de vară

Pentru situația de vară a fost analizată distribuția câmpului de temperaturi într-un plan orizontal util situat la înălțimea de 1,2 m față de limita inferioară a domeniului de simulare, prezentată în figura 6, precum și distribuția câmpului de temperaturi într-un plan vertical longitudinal care trece prin centrul domeniului de simulare, figura 7, în scopul identificării zonelor în care sunt prezente variații de temperatură care pot genera disconfort termic local ocupanților.

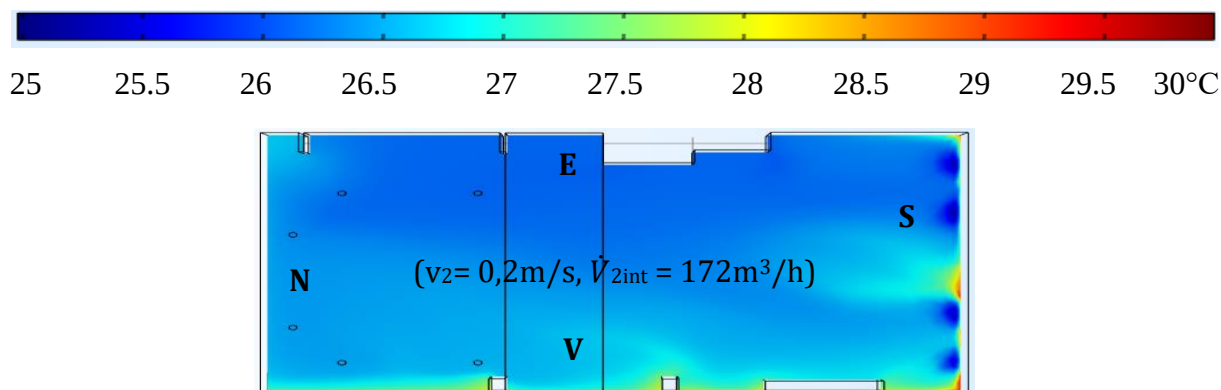


Figura 6: Distribuția câmpului de temperaturi în secțiune orizontală vara

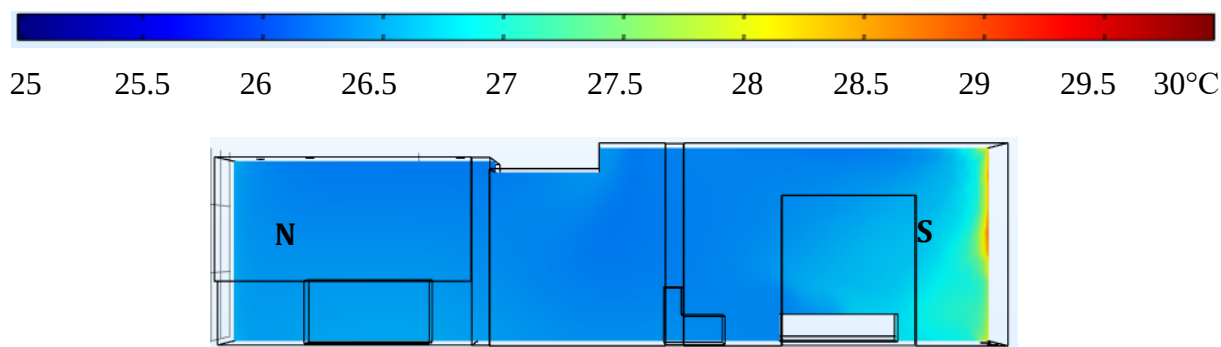


Figura 7: Distribuția câmpului de temperaturi în secțiune verticală vara

Analiza termo-aeraulică în situația de iarnă

Considerând aceleași planuri caracteristice au fost analizate și în cazul situației de iarnă elementele care pot influența confortului termic, prin intermediul distribuției câmpului de temperaturi prezentat, în figurile 8 și 9.

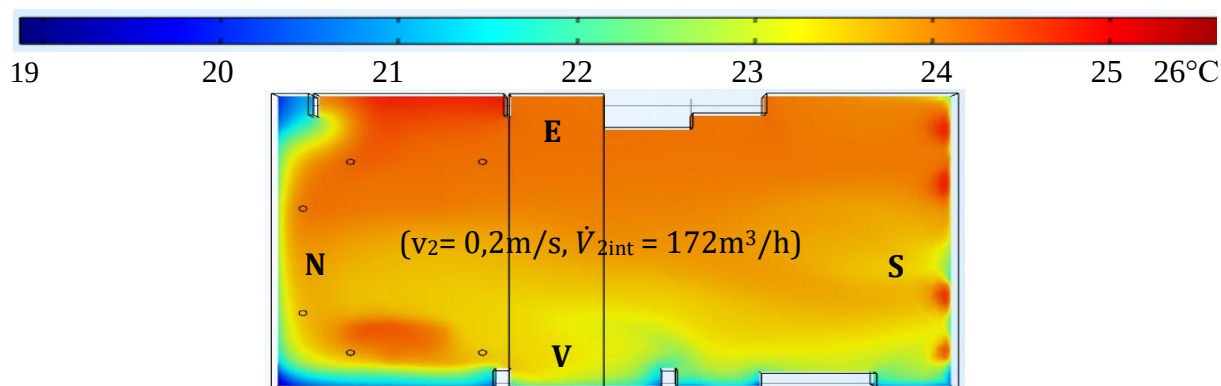


Figura 8: Distribuția câmpului de temperaturi iarna, în secțiune orizontală

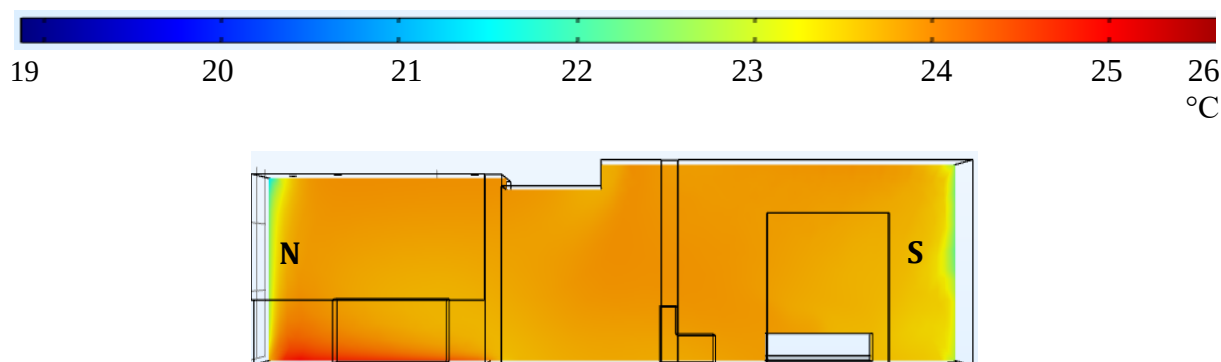


Figura 9: Distribuția câmpului de temperaturi în secțiune verticală iarna

Analiza confortului termic în spațiul ocupat

În scopul stabilirii categoriei de confort termic în care se poate încadra domeniul analizat pentru situațiile de vară și de iarnă s-a realizat determinarea și interpretarea analitică a indicilor de confort termic PMV și PPD, utilizând procedura de calcul pentru evaluarea locală a confortului termic, descrisă în SR EN ISO 7730:2006, pe baza evaluării mărimilor fizice în faza de postprocesare a rezultatelor obținute în urma simulării numerice.

6. Modelarea numerică a punților termice

Pentru a demonstra impactul pe care punțile termice îl au asupra bilanțului energetic al clădirii a fost realizat studiul comportamentului termic al elementelor componente ale anvelopei unei clădirii, în vederea îmbunătățirii performanțelor termice ale acestora, prin intermediul simulării numerice a transferului de căldură cu ajutorul aplicației COMSOL MULTYPHISICS, care permite vizualizarea câmpului de temperaturi bidimensional și evaluarea fluxului termic total transferat și prin elementele detaliilor de punte termică liniară, (Kotti, et al. 2017).

Definirea geometriei modelelor fizice

În etapa de realizare a punților termice liniare au fost definite șapte tipuri de detalii ce pot fi întâlnite la nivelul fațadei unei clădiri adoptându-se o serie de strategii pasiv constructive specifice de diminuare/eliminare a efectului disipativ al fluxului termic transferat (a pierderilor termice) prin închiderea punții termice utilizând sisteme și elemente pasive energetice.

Condiții de unicitate

Pentru domeniile de simulare analizate, pentru fiecare situație în parte s-au atașat o serie de condiții ce definesc particularitățile cazului respectiv, numite condiții de unicitate (inițiale și/sau la limită, pe contur) precum și ipoteze de lucru simplificatoare.

Dintre detaliile simulate și analizate o particularitate aparte o prezintă detaliul de cuplare dintre un element transparent (tâmplăria de fereastră) și un element opac (perete exterior), al cărui model de referință este prezentat în figura 10. În acest caz s-au adoptat măsuri de reabilitare termică a elementelor opace uzuale utilizate în practică gradual până la măsuri pasive energetice și strategii de montare diferite ale elementului transparent existent precum și înlocuirea acestuia cu un sistem vitrat performant energetic.

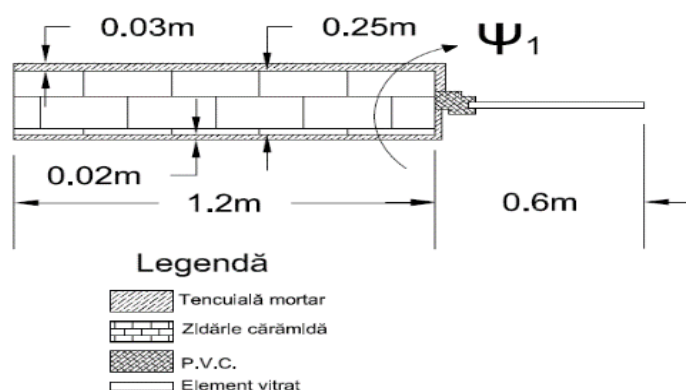


Figura 10: Detaliu de cuplare perete exterior și tâmplărie fereastră în secțiune orizontală

Configurarea subdomeniilor de simulare ale modelului numeric în scopul simulării transferului de căldură prin domeniul de simulare s-a realizat utilizând modulul „General Heat Transfer”, care utilizează bine-cunoscuta lege a conducției căldurii, a lui Fourier, pentru calculul fluxului de căldură, (comsol.com):

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

unde: $\dot{Q}$ – fluxul total de căldură transmis prin conducție în W; λ – conductivitatea termică a materialului în W/mK; A – aria secțiunii transversale în m²; $\frac{dT}{dx}$ – gradientul de temperatură în K/m.

Discretizarea domeniului de simulare

Utilizând metoda elementelor finite s-a realizat discretizarea domeniului de simulare și generarea automată a rețelei nodale, a cărei structură prezentată în figura 11 are în compunere 9776 elemente de formă tetraedrică interconectate.

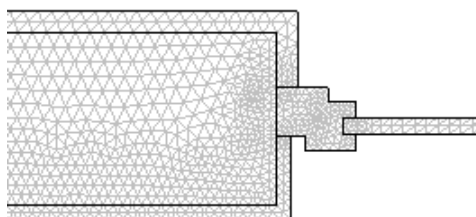


Figura 11: Rețeaua de discretizare

Distribuția câmpului de temperaturi

Distribuția calitativă a câmpului de temperaturi prin detaliile de punte termică liniară specifică cuplajelor analizate, este prezentată comparativ în figura 12 pentru soluțiile: a) modelul fizic de referință (situația existentă), b) perete exterior izolat $\delta_{iz} = 10$ cm, glaf neizolat c) fereastra pasivă montată în câmpul izolației, $\delta_{iz} = 20$ cm.

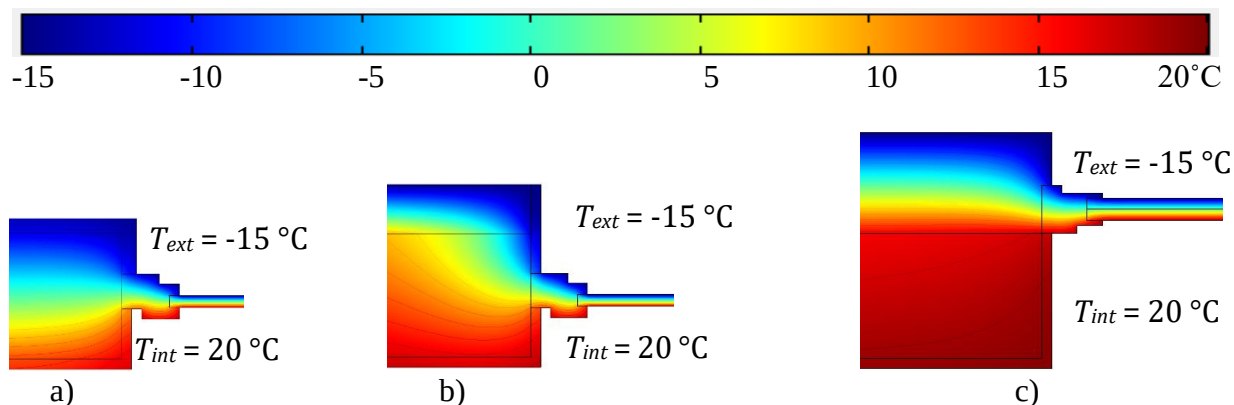


Figura 12: Distribuția câmpului de temperaturi - Cazul peretele exterior și tâmplărie fereastră (în secțiune orizontală)

Distribuția fluxului termic unitar

Distribuția calitativă a fluxului de căldură unitar transferat prin unitatea de suprafață a elementelor din compunerea detaliilor de punte termică liniară, corespunzătoare cuplajului dintre perete exterior și tâmplărie, în secțiune verticală este prezentată în figura 13.

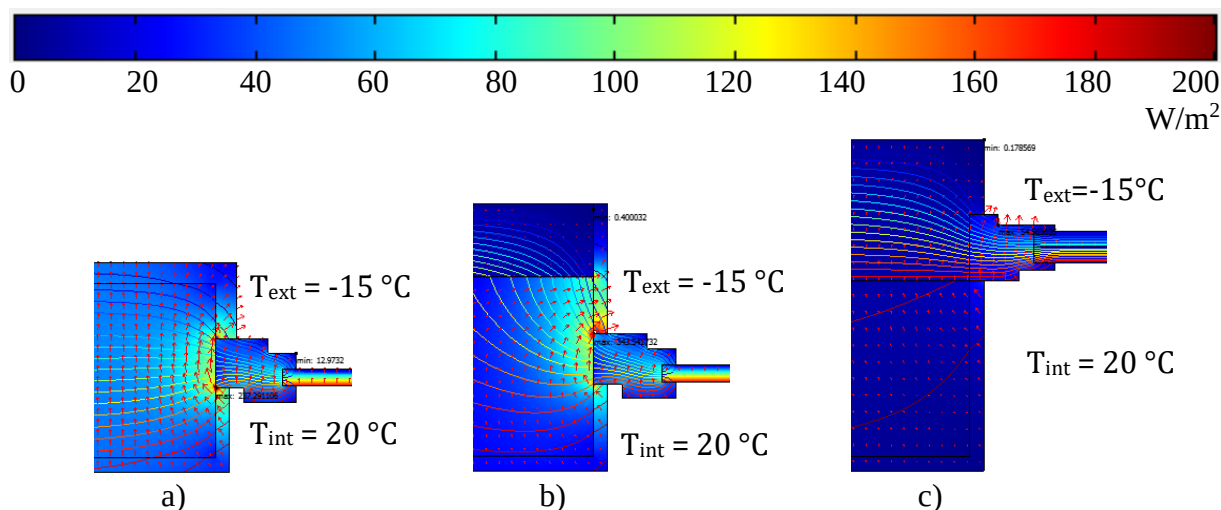


Figura 13: Distribuția fluxului termic unitar

Evaluarea pierderilor de căldură prin transmisie

Evaluarea cantitativă a pierderilor de căldură prin transmisie prin elementele anvelopei fațadei clădirii s-a realizat prin determinarea mărimilor fizice caracteristice transferului de căldură în regim staționar prin elementele componente ale acesteia (Bergero, 2018). Determinarea transmitanțelor termice liniare, specifice punților termice liniare, s-a realizat pe baza fluxul termic estimat în urma procesului de simulare a câmpului termic bidirecțional, cuantificat și furnizat de aplicația Comsol Multiphysics și fluxului termic unidirecțional disipat prin zona de câmp curent a elementelor componente ale fațadei clădirii, utilizând procedura de calcul din normativul C107/3-2005.

Evaluarea pierderilor de căldură prin transmisie la nivelul fațadei principale s-a realizat pentru trei cazuri distincte cazul de referință (situația existentă), cazul uzual de reabilitare termică și cazul utilizării sistemelor constructive pasive (specifice clădirilor pasive).

Analiza termică și energetică a clădirii

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulării numerice a transferului de căldură prin punțile termice liniare fost realizată analiza termică, energetică, economică și de mediu a soluțiilor tehnice de reabilitare termică a clădirii analizate, prin adoptarea sistemelor pasive constructive și implementarea surselor de energie regenerabilă în scopul eficientizării energetice din punct de vedere optim a acesteia, (Kaynakli, 2012) pentru identificarea soluției optime (cea cu cel mai bun echilibru de optimizare pentru toate criteriile), și alegerea variantei cea mai potrivită pentru specificul clădirii modernizate, (Ascione et al., 2017, Shao et al., 2014).

Analizând din punct de vedere energetic performanța clădirii reabilitate constructiv și funcțional prin prisma cantității energiei primare necesare pentru asigurarea necesarului de consum pentru toți consumatorii clădirii utilizând factorii de conversie a energiei finale (la nivelul consumatorului) în energie primară s-a constatat că prin măsurile adoptate s-a atins un nivel minim al consumului total anual specific de energie primară de 79,59 kWh/m²an.

Impactul utilizării sursei de energie regenerabilă din punct de vedere al cantităților de emisii poluante de CO₂ degajate în mediul înconjurător, utilizând factorii de emisie de CO₂, corespunzători fiecărui tip de combustibil utilizat, atribuiți consumurilor anuale specifice de energie primară pentru producerea utilităților, a fost evaluat la 21 kg CO₂/m²an.

7. Concluzii

Cercetările realizate în cadrul studiilor universitare de doctorat asupra metodelor de îmbunătățire a performanțelor energetice a clădirilor demonstrează necesitatea și oportunitatea adoptării de soluții tehnice pasiv constructive și funcționale în vederea conservării energiei termice produsă din surse interioare, diminuarea pierderilor de căldură prin transmisie directă prin elementele anvelopei clădirilor și utilizarea surselor de energie alternativă, pentru clădirile noi și pentru eficientizarea energetică a celor existente care se reabilitează.

Contribuții personale

Contribuțiile personale privind confortul interior și metodele pasive de îmbunătățire a performanțelor energetice ale clădirilor au fost aduse prin cercetarea literaturii științifice privind casele pasive, metodelor de ventilare mecanică cu recuperare de căldură și analiza confortului termic specific acestora, utilizarea energiilor alternative pentru clădiri pasive și analiza termică, energetică și economică a soluțiilor pasiv constructive și funcționale de reabilitare/modernizare a clădirilor.

Energetica caselor pasive

Rezultatele obținute în cadrul proiectelor de cercetare științifică inițiate de PHI, au demonstrat că, principiile standardului caselor pasive sunt viabile în toate zonele climatice, făcând posibilă construcția clădirilor noi și reabilitarea celor existente la cel mai înalt standard de eficiență energetică, cu costuri rezonabile privite pe întregul ciclu de viață a clădirii.

Utilizarea energiilor alternative pentru clădiri pasive

Pentru a demonstra necesitatea și oportunitatea implementării surselor de energie regenerabilă, pentru clădirile pasive energetic, din punct de vedere energetic și economic precum și impactul utilizării acestora asupra mediului înconjurător a fost realizate o serie de simulări prin intermediul aplicației specializate NIBEDIM.

Impactul energetic constă în reducerea anuală a consumului de energie cu valori cuprinse între 73-80%, economic prin scăderea costurilor anuale de exploatare cu valori cuprinse între 66-86%, și ecologic prin diminuarea cantității de emisii anuale de CO₂ cu valori cuprinse între 74-92%.

Analiza ventilării mecanice a spațiilor de locuit

Analizele globale calitative și cantitative în scopul eficientizării distribuției aerului interior în domeniul de simulare în fazele de proiectare inițială și finală a instalației de ventilare au arătat că, soluția reconfigurării instalației de ventilare a condus la eliminarea disconforturilor locale, obținându-se o curgere uniformă a aerului în zonele frecventate de ocupanți.

Simulările numerice ale curgerii neizoterme a aerului pentru situațiile de vară și iarnă prin domeniul de simulare după reproiectarea instalației de ventilare a permis evaluarea mărimilor fizice necesare determinării indicilor de confort termic PMV și PPD, în conformitate cu criteriile de evaluare din SR EN ISO 7730:2006, SR EN 15251:2007, respectiv ale standardului Casei pasive pentru pentru aprecierea categoriilor de confort termic în cadrul domeniului analizat. Analiza indicatorilor de confort a condus la concluzia că în domeniul de simulare nu există disconforturi locale datorate vitezei curenților de aer sau gradientului de temperatură. Totodată s-a remarcat faptul că pentru menținerea unui nivel confort termic optim în domeniul analizat este necesar ca în perioada de vară să se adapteze temperatura aerului introdus în funcție de aporturile de căldură pasive solare prin suprafețele vitrate și degajările de căldură de la sursele interne.

Modelarea numerică a punților termice

Analiza impactului datorat punților termice liniare existente la nivelul fațadei clădirii s-a realizat prin simularea comportamentului structurilor analizate prin intermediul simulării și modelării numerice a transferului de căldură prin acestea, adoptând o serie de strategii pasiv constructive pentru elementele opace și transparente ale anvelopei clădirii, în scopul reducerii/eliminării efectelor punților termice liniare.

Un aspect extrem de important observat în timpul simulărilor a fost că odată cu închiderea punților termice liniare prin asigurarea continuității anvelopei termice aplicată elementelor opace din compunerea detaliilor de punte termică, a condus la creșterea stabilității termice a structurii analizate și diminuarea considerabilă a fluxului termic transferat cu valori cuprinse între 35-87%, respectiv a transmitanței termice liniare cu până la 98%, față de situația existentă.

La nivelul fațadei principale se constată că, pierderile de căldură prin transmisie directă corectate cu efectul acestora se majorează cu 29% față de cazul în care se neglijează prezența acestora, diminuându-se cu 67,84% în cazul reabilitării termice doar a elementelor opace. Soluția reabilitării elementelor opace și transparente conform exigențelor clădirilor pasive a generat reducerea cu 87,48% a pierderilor de căldură prin transmisie directă corectate raportate la cazul de referință.

Analiza termică, energetică și economică a soluțiilor de reabilitare

Pentru reabilitarea din punct de vedere constructiv și funcțional a clădirii analizate s-a realizat analiza termică și energetică în care au fost examinate performanțele energetice ale clădirii reale și ale clădirii de referință atașate clădirii reale. În scopul îmbunătățirii performanțelor energetice ale clădirii reale au fost propuse și analizate

din punct de vedere energetic și economic două soluții de reabilitare utilizând sisteme constructive pasive. Analizând rezultatele obținute pentru indicatorii energetici specifici clădirii reale, de referință, ai clădirii reabilitate adoptând soluțiile constructive de reabilitare termică uzuală și cele specifice clădirilor pasive, precum și de modernizare energetică s-a constatat faptul că: cerința energetică pentru asigurarea încălzirii clădirii se diminuează cu până la 80%, în cazul soluției de reabilitare termică uzuală respectiv 87,5% în cazul soluției de reabilitare la standard de casă pasivă.

Pornind de la performanța reală a clădirii în care consumului total anual specific este de 568,02 kWh/m² an, care plasează clădirea reală în clasa energetică F, prin adoptarea măsurilor de reabilitare termică uzuale pentru îmbunătățirea performanțelor termice ale elementelor opace, se ajunge la un consum total anual specific de 175,24 kWh/m² an, specific clasei energetice B. Impunerea măsurilor de reabilitare termică specifice clădirilor pasive pentru îmbunătățirea performanțelor termice ale elementelor opace și transparente ale anvelopei clădirii reale a condus la obținerea unui consum total anual specific de 59,36 kWh/m² an, obținându-se o clădire superioară clădirii de referință din punct de vedere energetic.

Modernizarea funcțională a sistemului de producere a energiei termice prin implementarea sistemului bazat pe pompa de căldură de tip sol-apă, care utilizează de energia regenerabilă a solului, și care furnizează energia termică necesară acoperirii sarcinii termice pentru încălzire și preparare acm a permis reducerea consumului anual de energie termică cu 65 % față de situația reabilitării pasiv constructive (soluția de reabilitare termică uzuală), respectiv cu 92% față de situația reală și a consumului total anual specific de energie primară cu 60% față de soluția de reabilitare termică pasivă respectiv 90% față de situația reală.

Aceste economii de energie primară au în mod direct un impact pozitiv asupra mediului înconjurător prin reducerea cantității de emisii poluante cu 81% față de situația reală și din punct de vedere economic prin reducerea costurilor de achiziție a energiei cu 87%, fapt ce permite recuperarea investiției realizate în prima jumătate a duratei de viață a soluțiilor implementate. Pe baza analizei indicatorilor energetici, economici și de mediu se poate aprecia că prin utilizarea sistemelor pasiv constructive (specifice caselor pasive) de reabilitare termo energetică a clădirii și modernizare a sistemului de producere a energiei termice, utilizând soluții care înglobează surse de energie regenerabilă se obține nivelul maxim de performanță energetică, ce permite certificarea clădirii la nivel de clădire cu consum de energie aproape zero (nZEB), îndeplinindu-se obiectivul general al cercetării realizate.

Diseminarea rezultatelor obținute

În urma cercetării documentare a rapoartelor proiectelor de cercetare dezvoltate de PHI, a materialelor științifice din baze de date internaționale privind problematica caselor pasive, a rapoartelor de diseminare, a rezultatelor obținute pentru clădirilor pasive aflate în fază de monitorizare, a performanțelor energetice și participării la lucrări de execuție a caselor pasive a fost elaborată prima lucrare cu titlul “*Case Passive–Clădiri eficiente și sustenabile*”, publicată în revista Romanian Journal of Building Services, vol.2, nr.1., 2017.

Rezultatele analizei globale prin intermediul modelărilor și simulărilor numerice privind curgerea izotermă a aerului într-un spațiu afrent unei clădiri pasive, aflată în faza de proiectare, au fost diseminate în cadrul primei conferințe a Școlii Doctorale a UTCB, desfășurată în București la data de 26 Octombrie 2018, unde am participat cu lucrarea: “*Influence of furniture arrangement on air flow distribution in open concept passive houses*”, indexată ISI în E3S Web Conferences, vol.85, având codul de identificare DOI: 10.1051/e3sconf/20198501010.

Analiza locală calitativă și cantitativă a curgerii izoterme a aerului prin domeniul de simulare analizat pentru casa pasivă aflată în faza de proiectare au fost diseminate în cadrul conferinței internaționale “Clima 2019”, desfășurată la București în perioada 26-29 Mai 2019, unde am participat cu lucrarea: “*Local analysis of airflow distribution in open concept passive houses*”, indexată ISI în E3S Web of Conferences, vol.111, având codul de identificare DOI: 10.1051/e3sconf/201911101019.

Rezultatele analizelor calitative și cantitative ale impactului punților termice prin intermediul modelării și simulării transferului de căldură prin elementele componente ale anvelopei clădirii asupra necesarului de căldură al clădirii au fost diseminate în cadrul celei de-a doua conferințe a Școlii Doctorale a UTCB, desfășurată în București în perioada 25 Octombrie 2019, unde am participat cu lucrarea: “*Effects of thermal bridges on the heat demand of residential buildings*”.

Perspective de continuare a cercetării

Cercetările efectuate și prezentate în această lucrare pot genera noi direcții de evaluare a performanțelor constructive și funcționale ale clădirilor. O posibilă direcție o poate constitui extinderea analizei simulării și modelării numerice multizonală a distribuției aerului la nivelul întregii clădiri.

De asemenea, un alt orizont de cercetare ar putea fi realizarea prin intermediul simulărilor numerice a unui model de fereastră pasivă energetic capabilă să limiteze aporturile solare și să mențină stabile condițiile de confort pentru toate zonele climatice ale țării.

Un obiectiv de cercetare cu implicații multiple în direcția îmbunătățirii performanțelor energetice a elementelor constructive și funcționale ale clădirii, confortului interior și a impactului asupra mediului înconjurător poate consta în realizarea reabilitării unei clădiri rezidențiale sau publice utilizând principiile de bază ale standardului Casei pasive, cu ajutorul aplicației PHPP dezvoltate de PHI.

Bibliografie selectivă

- Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., Mauro G.M., Vanoli G.P., 2017, Energy retrofit of educational buildings: transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance, Energy Building, vol.144, pp. 303–319;
- Bergero S., Chiari A., 2018, The influence of thermal bridge calculation method on the building energy need: a case study, Energy Procedia, vol. 148, pp. 1042–1049
- Catalina T., Butacu C., Pasti M.T., 2015, Case eficiente energetic de la teorie la practică: Casa solară EFdeN, Ed. Martix Rom;

- Ebel W., Feist W., 1997, "Electricity consumption results in the Passive House in Darmstadt-Kranichstein" in "Saving electricity in the Passive House"; Protocol Volume No. 7 of the Research Group for Cost-efficient Passive Houses, Passive House Institute, Darmstadt-1997;
- Feist W., 1993, Passive Houses in Central Europe through computerised simulations of the energy balance of buildings, Dissertation, University of Kassel;
- Ghiauş A. G., 2003, Transferul de căldură -Note de curs-, Editura CONSPRESS, Bucureşti;
- Jomehzadeh F., Nejat P., Calautit J. K., Yusof M., Badruddin M, Zaki S. A., Hughes B. R., Yazid M. N. A. W. M., 2017, A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol.70, pp 736–756;
- Kaynakli O, 2012, A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16 (1), pp. 415-425
- Kotti S., Teli D., James P.A.B., 2017, Quantifying Thermal Bridge Effects and Assessing Retrofit Solutions in a Greek Residential Building, *International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale*, *Procedia Environmental Sciences* vol. 38, pp. 306 - 313;
- Saadatian O., Haw L. C. , Sopian K. , Sulaiman M.Y. ,2012, Review of windcatcher technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp 1477-1495;
- Stowell J.D., Kim Y., Gao Y., Fu J.S., Chang H.H., Liu Y., 2017, The impact of climate change and emissions control on future ozone levels: implications for human health, *Environ. Int.*, vol.108, pp.41–50;
- Ştefănescu D., 2009, *Higrotermica construcţiilor*, Editura Societăţii Academice "Matei – Teiu Botez", Iaşi;
- Thomas F., Sabel C.E., Morton K., Hiscock R., Depledge M.H., 2014, Extended impacts of climate change on health and wellbeing, *Environ. Sci. Policy*. vol.44, pp. 271–278;
- comsol.com, COMSOL Multiphysics, www.comsol.com/comsol-multiphysics, (17.09.2019);
- passipedia. org, Passipedia - The Passive House Resource, www.passipedia.org. (18.09.2017);
- passiv.de, PHPP – the energy balance and Passive House planning tool, passiv.de/en/04_phpp/04_phpp.htm, (15.10.2017).