

Numerical modeling of thermal transfer through a refrigeration room wall - thermal bridge phenomenon highlighting

Simulare numerică transfer termic prin perete camera frigorifică –
evidențierea fenomenului de punte termică

Mirela Tomoșoiu¹, Grațiana Maria Țârlea¹

¹Universitatea Tehnică de Construcții București
Bulevardul Lacul Tei 124, București 020396, Romania
E-mail: mirela.tomosoiu@phd.utcb.ro

DOI: 10.37789/rjce.2025.16.3.9

Abstract. *The CFD simulations play an important role in heat transfer processes field, enabling heat transfer mechanism the analysis through conduction, convection and/or radiation, identifying critical points in thermal insulation systems, predicting the evolution of certain parameters in systems where heat transfer processes occur, optimizing the heat transfer system design, and improving their energy efficiency. Among the systems based on thermal transfer phenomena, the refrigeration systems require some of the highest energy consumption. Therefore, one of the most effective methods for these systems cost reducing is ensuring an optimal thermal insulation for the walls. CFD simulations can become a very useful tool in cold room parameters evaluation, such as temperature and humidity, as well as for critical areas identifying, where thermal bridges may occur, with results in uncontrolled thermal flows.*

Key words: CFD, computational fluid dynamics, cold room, refrigeration, thermal bridge, Ansys, thermal transfer modeling, convection, conduction

Rezumat. *Realizarea simulărilor CFD are un rol important în domeniul proceselor de transfer termic, permițând analiza mecanismelor transferului de căldură prin conducție, convecție și/sau radiație, identificarea punctelor critice în sistemele de izolație termică, estimarea evoluției unor parametri ai sistemelor în care au loc procese de transfer termic, optimizarea proiectării sistemelor de transfer termic și eficientizarea energetică a acestor sisteme. Între sistemele bazate pe fenomene de transfer termic, sistemele de refrigerare necesită unele din cele mai ridicate consumuri de energie. De aceea, una dintre cele mai utile metode de reducere a costurilor acestor sisteme este asigurarea unei optime izolații termice a pereților. Simulările CFD pot fi un instrument foarte util în evaluarea parametrilor de funcționare ai unei camere frigorifice, respectiv temperatură, umiditate, dar și pentru identificarea zonelor critice în care pot apărea punți termice generând fluxuri termice necontrolate.*

Cuvinte cheie: CFD, camere frigorifice, refrigerare, punte termică, Ansys, transfer termic, flux termic, simulare transfer termic, convecție, conducție

1. Introducere

Refrigerarea este una dintre tehnologiile mari consumatoare de energie, fiind răspunzătoare de aproximativ 35% din energia electrică consumată în industria alimentară [1]. De altfel costul energiei electrice are o pondere importantă în valoarea totală a costurilor operaționale de stocare în industria alimentară [2,3]. De aceea, identificarea unor metode de reducere a consumului de energie aferent funcționării camerelor frigorifice reprezintă un punct de mare interes pentru mulți cercetători din domeniu [4].

Fenomenul de punte termică apare atunci când într-o zonă a anvelopei unei clădiri rezistența termică se modifică semnificativ din diferite cauze: a) o străpungere totală sau parțială a anvelopei de materiale cu conductivități termice diferite și/sau b) o modificare a grosimii materialului și/sau c) o diferență între zonele interioară și exterioară cum sunt joncțiunile dintre perete/pardoseală/tavan [5].

O punte termică este o zonă din anvelopa unei clădiri în care fluxul termic este diferit (de obicei mai ridicat) comparativ cu zonele adiacente. Efectele unei punți termice pot fi: creșterea temperaturii suprafeței interioare, care în cele din urmă poate duce la acumularea umidității în interiorul peretelui și apariția mușgaiului și b) creșterea fluxului termic și prin urmare pierdea căldurii în exterior [6].

Puntea termică este zona în care intră în contact materiale cu conductivități termice diferite și prin care are loc o pierdere de căldură. În cazul camerelor frigorifice prin zonele unde se formează punți termice are loc un aport nedorit de căldură din exterior ceea ce duce inevitabil la afectarea mediului din interiorul camerei frigorifice cu un impact atât în consumul de energie cât și în deteriorarea produselor depozitate.

Există multe elemente în camerele frigorifice care pot duce la formarea unor punți termice, având ca rezultat fluxuri termice necontrolate cu consecințe în creșterea consumului de energie [7].

Astfel că, identificarea, încă din faza de proiectare, a zonelor în care se pot forma punți termice, poate aduce beneficii importante. Acest lucru poate fi realizat cu ajutorul simulărilor CFD (Computational Fluid Dynamics).

CFD reprezintă o ramură a mecanicii fluidelor care utilizează metode numerice și algoritmi pentru a rezolva și analiza probleme referitoare la curgerea fluidelor și transferul de căldură, permițând cercetătorilor și inginerilor să realizeze “experimente numerice” în “laboratoare virtuale” [8].

Analiza fenomenelor fizice complexe precum dinamica fluidelor, transferul de căldură sau propagarea undelor, se poate face utilizând ecuații diferențiale cu derivate parțiale care uneori pot avea un număr considerabil de variabile. Rezolvarea acestor ecuații sau sisteme de ecuații se face prin intermediul analizei cu elemente finite [9].

Unul dintre cele mai mari beneficii ale softurilor CFD este capacitatea de a rezolva ecuațiile care descriu curgerea fluidelor și transferul de căldură. Acest lucru se realizează prin discretizarea domeniului de lucru, respectiv descompunerea în volume de mici dimensiuni care apoi sunt studiate și asupra cărora se aplică ecuațiile matematice ce descriu fenomenele fizice pentru a se determina proprietățile fizice cum ar fi presiune, viteză și/sau temperatură. Rezolvarea ecuațiilor și determinarea soluției

numerice presupune parcurgerea unui proces iterativ care necesită resurse de calcul importante. Din acest motiv, aplicarea simulărilor CFD a luat o amploare deosebită în paralel cu evoluția capacității de calcul a computerelor [10].

Exemple de programe utilizate pentru realizarea de simulări CFD sunt: Ansys, COMSOL Multiphysics, SimFlow.

2. Metodologie

Lucrarea de față își propune să evidențieze modul în care poate fi evaluat comportamentul unui perete multistrat al unei camere frigorifice în condițiile nominale de lucru, respectiv modul în care realizarea diferită, uneori defectuoasă a îmbinărilor la colțurile pereților poate duce la crearea de punți termice.

Pentru aceasta se utilizează o simulare cu ajutorul software-ului Ansys versiunea 2024 R2 Student, respectiv a modulului Steady-State Thermal.

Se consideră o porțiune dintr-o zonă de colț a unei camere frigorifice realizată din panouri tip sandwich cu grosime de 100mm din poliuretan având la exterior tablă de oțel. Caracteristicile constructive și proprietățile materialelor din care este alcătuit peretele termoizolant sunt prezentate în Tabelul nr.1.

Tabelul 1

Caracteristici perete tip sandwich

Denumire strat	Material	Grosime (mm)	Coefficient conductivitate termică λ (W/mK)
Perete exterior	tablă oțel	1	0,022
Strat izolator	poliuretan	98	50,2
Perete interior	tablă oțel	1	0,022

Pentru a pune în evidență felul în care simularea va arăta zona în care apare fenomenul de punte termică, se iau în considerare două variante de îmbinare a pereților în zona de colț a camerei frigorifice.

Astfel într-o primă variantă, în zona de colț pereții au fost îmbinați fără a îndepărta porțiunea de tablă care intră în contact cu panoul alăturat în zona poliuretanului, iar stratul de poliuretan rămâne expus la exterior, nefiind protejat, așa cum se vede în Fig.1a. Acest tip de îmbinare este deficitară întrucât porțiunea de tablă din interior care ajunge la exteriorul peretelui va permite un transfer de căldură dinspre exterior către interior care va afecta negativ funcționarea camerei frigorifice.

În varianta a doua, îmbinarea s-a făcut după decuparea porțiunii de tablă și lipirea straturilor de poliuretan, asigurând și acoperirea integrală a poliuretanului la exterior Fig.1b.

Simulare numerică transfer termic prin perete camera frigorifică – evidențierea fenomenului de punte termică

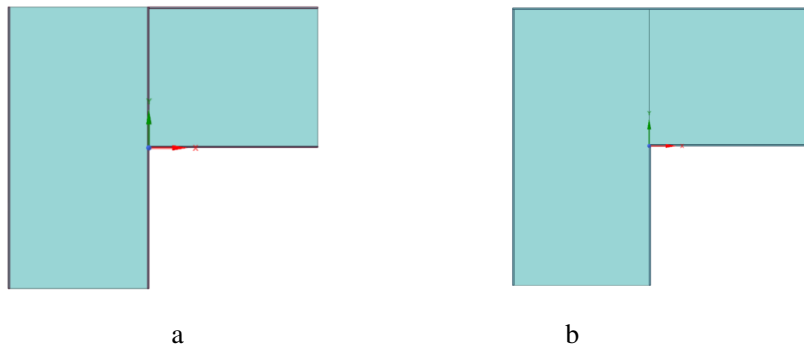


Fig. 1. Îmbinare de colț cameră frigorifică
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Pentru a realiza simularea modului în care se realizează transferul de căldură prin peretele camerei frigorifice într-o zona în care este probabilă apariția fenomenului de punte termică, este necesară parcurgerea mai multor module ale aplicației de simulare.

În prima etapă se definește geometria elementului analizat.

În acest caz, este vorba de o porțiune de colț din peretele unei camere frigorifice așa cum se arată în Fig.2.

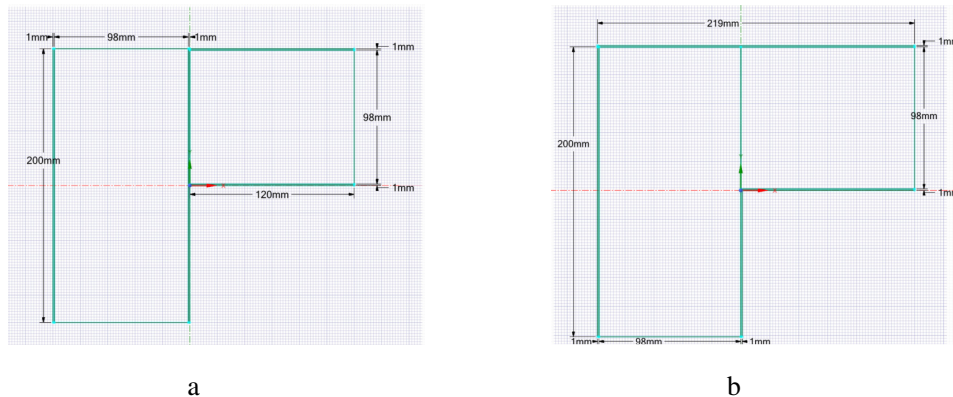


Fig. 2. Geometria elementului de construcție analizat
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

În etapa următoare se definesc materialele componente peretelui multistrat și proprietățile acestora, urmând apoi să fie asociat fiecărei suprafețe materialul și implicit proprietățile aferente (Fig.3).

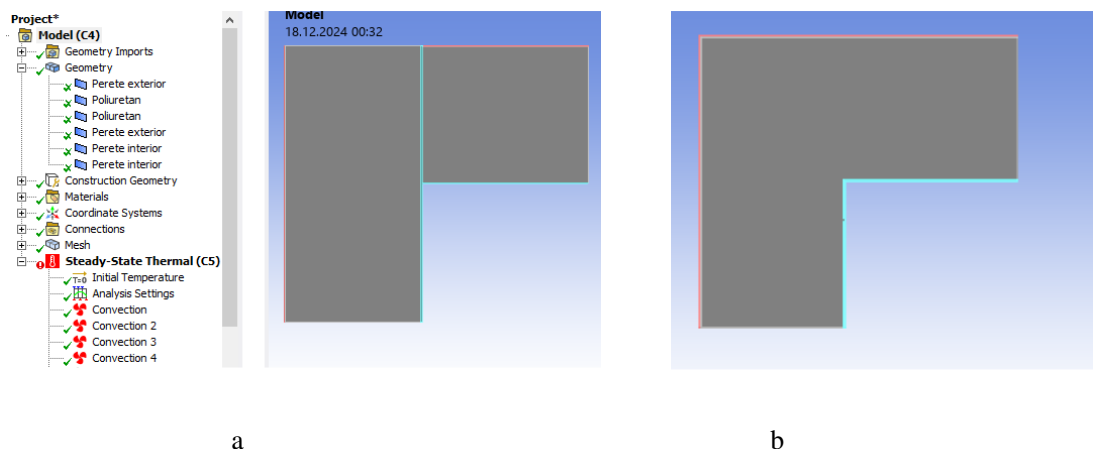


Fig. 3. Atribuirea materialelor și a caracteristicilor pentru fiecare suprafață în parte
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Următoarea etapă presupune stabilirea grilei de calcul, respectiv rețeaua de noduri necesară discretizării fiecărui domeniu în parte pentru aplicarea algoritmilor de calcul. (Fig.4)

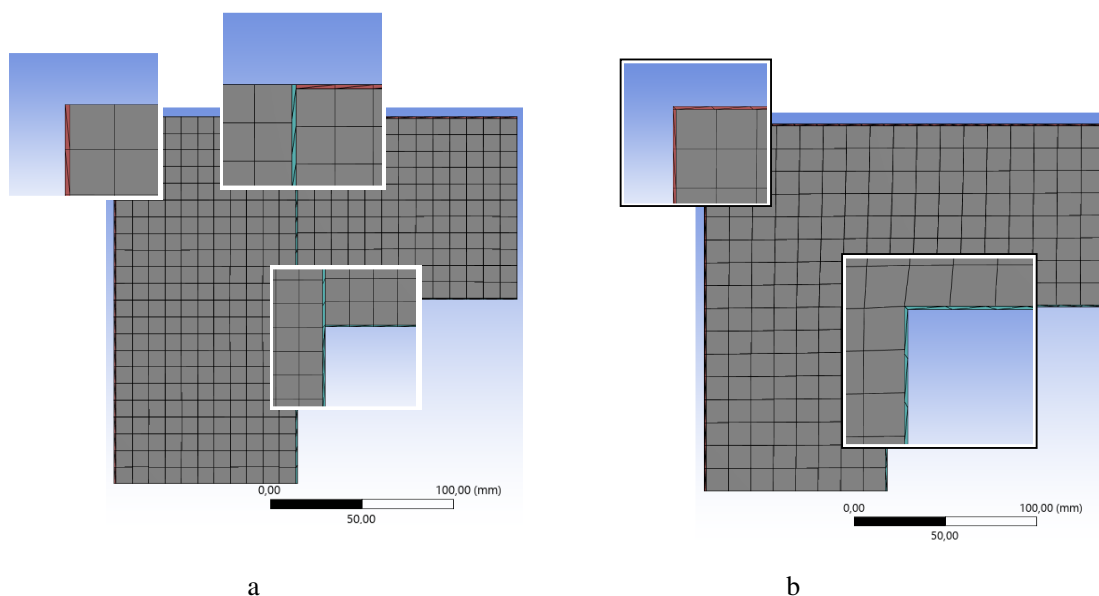


Fig. 4. Construirea rețelei cu nodurile de discretizare
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Este necesar să fie definite condițiile la limită, respectiv să fie definite fenomenele fizice ce se desfășoară la limitele elementului de construcție studiat.

Condițiile la limită (boundary conditions) sunt elemente extrem de importante în simularea numerică deoarece sunt principala modalitate prin care poate fi configurat cazul la care se lucrează prin simulare numerică.

Condițiile la limită descriu parametri/mărimile pe frontiera domeniului de interes, această informație de pe frontieră propagându-se în domeniul de calcul prin intermediul modelului matematic din cadrul programului de simulare numerică.

“Evident că, dacă condițiile la limită nu vor fi suficient de bine configurate/alese, și rezultatele obținute vor avea de suferit. În limba engleză expresia consacrată în domeniul CFD pentru acest lucru este “Garbage IN, Garbage OUT!”. Adică, dacă se vor introduce date de intrare/condiții la limită neconforme și rezultatele obținute vor fi greșite / neconforme / departe de realitate” [11].

Astfel, la interior are loc un fenomen de convecție între peretele interior și stratul de aer din imediata vecinătate a acestuia.

Datele necesare pentru configurarea condițiilor la limită pentru peretele rece (interior) sunt: valoarea coeficientului de convecție termică la interior care are valoarea de $8\text{W/m}^2\text{K}$ și temperatura la interior -18°C .

Pentru configurarea condițiilor la limită pentru peretele cald (exterior) sunt: valoarea coeficientului de convecție termică la exterior care are valoarea de $23\text{W/m}^2\text{K}$ și temperatura la exterior 22°C .

Pentru zonele în care elementul de perete este decupat pentru limitarea zonei studiate (evidențiate cu culoare albastră în fig.2) se consideră că valoarea fluxului termic este egală cu 0, transferul de căldură realizându-se numai pe direcția transversală a peretelui, de la temperatura mai mare (peretele exterior) la temperatura mai joasă (peretele interior).

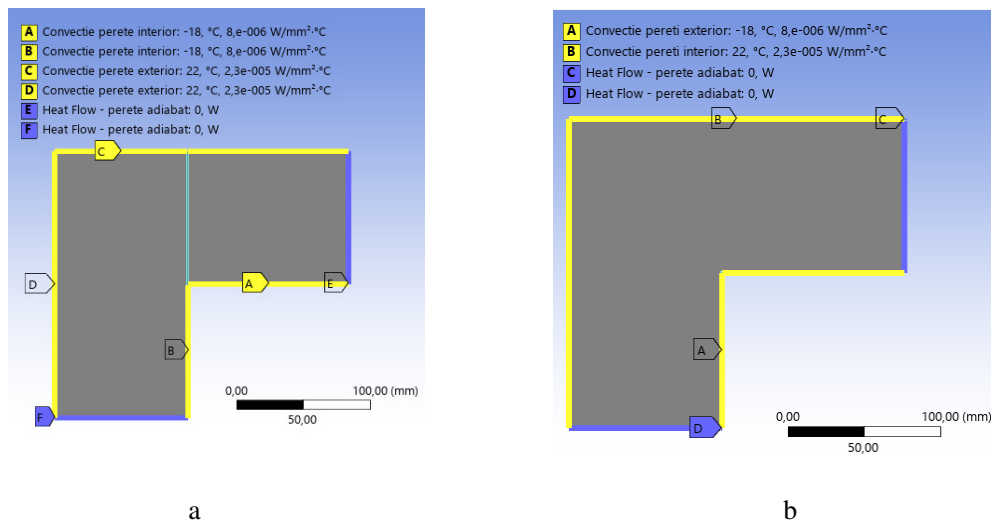


Fig. 5. Stabilirea condițiilor la limita domeniului studiat
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

După definirea condițiilor la limită, se poate trece la aplicarea și rezolvarea modelului matematic și apoi la prelucrarea rezultatelor.

3. Rezultate

Programul permite obținerea mai multor tipuri de informații.

De interes pentru aplicația de față ar fi, în primul rând, distribuția valorilor temperaturii în interiorul peretelui (Fig.6). Pot fi puse în evidență punctele în care temperatura atinge valoarea maximă, respectiv minimă și de asemeni poate fi indicată temperatura într-un anumit punct de interes.

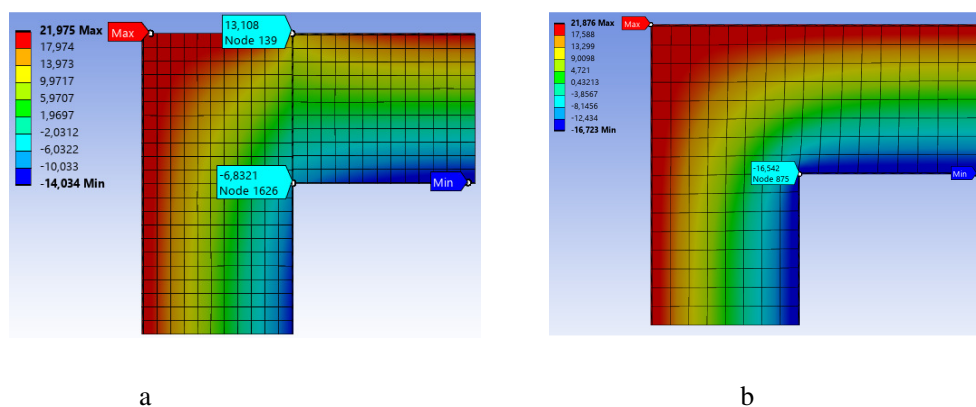


Fig. 6. Distribuția temperaturii în perete
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Pentru situația studiată se observă în primul rând o afectare evidentă a profilului temperaturilor în zona în care în interiorul peretelui a rămas stratul interior de tablă, față de situația în care acest strat a fost îndepărtat. De asemeni se evidențiază faptul că există o diferență importantă între valorile temperaturilor în colțul interior al peretelui în cele două cazuri: $-6,8^{\circ}\text{C}$ față de $-16,5^{\circ}\text{C}$.

Informații de interes pot fi obținute și prin evidențierea distribuțiilor fluxului termic prin perete. Cum era ușor de intuit, în zona stratului de tablă rămas în interiorul peretelui, fluxul termic are valori mult mai mari comparativ cu restul peretelui, putând fi determinate și valorile numerice ale acestuia. (Fig.7)

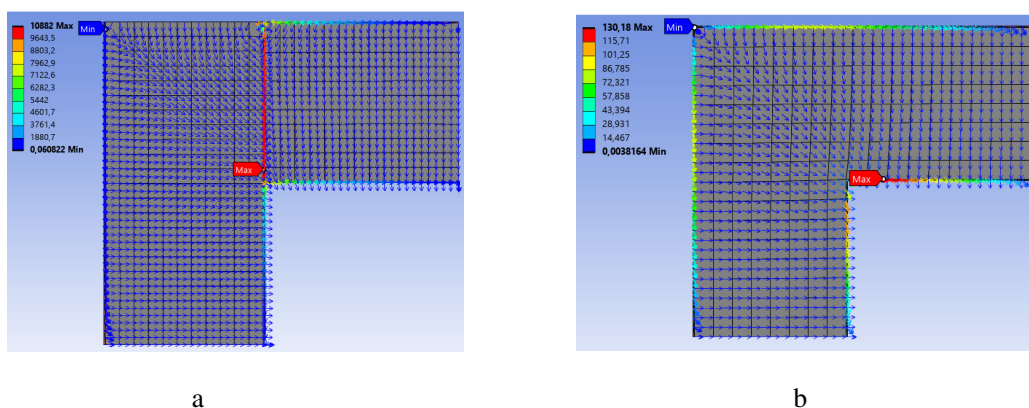
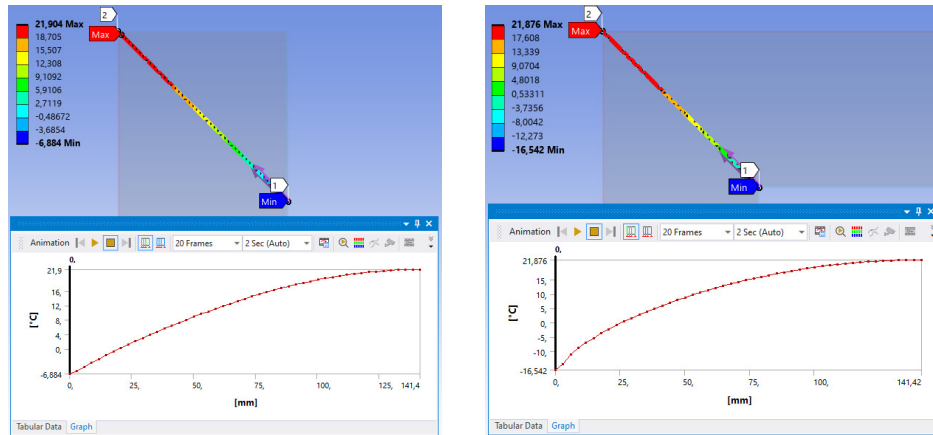


Fig. 7. Distribuția fluxului termic prin perete
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Simulare numerică transfer termic prin perete camera frigorifică – evidențierea fenomenului de punte termică

O altă variantă de extragere a unor informații utile permite stabilirea unei anumite secțiuni a peretelui în care să poată fi studiat în detaliu profilul unui anumit parametru, în cazul de față profilul de temperaturi. (Fig.8)



a b
Fig. 8. Distribuția temperaturii în zona de colț a peretelui
a) Îmbinare de colț defectuoasă, b) Îmbinare de colț corectă

Aceste informații pot fi obținute atât grafic, cât și tabelar, ceea ce permite exportarea datelor într-un fișier Excel și utilizarea lor la întocmirea unor grafice comparative. (Fig.9)

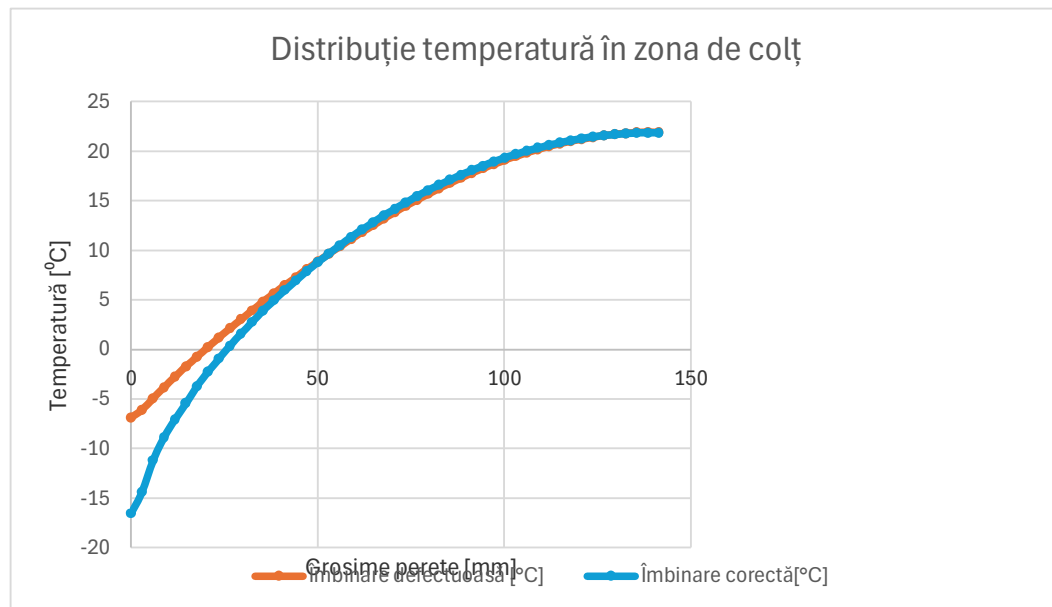


Fig.9. Reprezentarea comparativă a distribuției temperaturii în zona de colț a peretelui

4. Concluzii

Datorită progreselor înregistrate în ultimele decenii în domeniul tehnicii de calcul, simulările CFD au devenit un instrument deosebit de puternic în domeniul cercetării și al ingineriei.

Realizarea simulărilor CFD are un rol important în domeniul proceselor de transfer termic, permițând analiza mecanismelor transferului de căldură prin conducție, convecție și/sau radiație, identificarea punctelor critice în sistemele de izolație termică, estimarea evoluției unor parametri ai sistemelor în care au loc procese de transfer termic, optimizarea proiectării sistemelor de transfer termic și eficientizarea energetică a acestor sisteme.

În concluzie, Computational Fluid Dynamics (CFD) ar putea deveni un instrument indispensabil pentru simularea proceselor de transfer de căldură și dinamicii fluidelor în diverse aplicații. Capacitatea de analiză și optimizare a performanței termice, identificarea punctelor sensibile încă din faza de proiectare a sistemelor duce la îmbunătățirea eficienței energetice, a siguranței în utilizare și a fiabilității acestora. Posibilitatea de predicție a comportamentului unui sistem în diferite condiții de funcționare, fără a fi necesare costuri asociate realizării unor prototipuri sau standuri de încercări, fac din CFD un real sprijin pentru cercetătorii din multe domenii ingineresti, inclusiv HVAC-R, iar pe măsură ce cererea pentru sisteme eficiente din punct de vedere energetic și de înaltă performanță continuă să crească, importanța CFD în simularea termică va crește, devenind o componentă critică în dezvoltarea soluțiilor tehnice.

Referințe

- [1] X.Q. Li, P.E. Campana, H.L. Li, J.Y. Yan, K. Zhu, Energy storage systems for refrigerated warehouses, *Energy Procedia* 143 (2017) 94–99.
- [2] J.A. Evans, E.C. Hammond, A.J. Gígiel, A.M. Fostera, L. Reinholdt, K. Fikiin, C. Zilio, Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores, *Appl. Therm. Eng.* 62 (2014) 697–705.
- [3] A.M. Foster, L.O. Reinholdt, T. Brown, Reducing energy consumption in cold stores using a freely available mathematical model, *Sustain. Cities Soc.* 21 (2016) 26–34.
- [4] X.Jiang, A. Lin, H.Ma,X. Li, Y. Li, Minimizing the thermal bridge through the columns in a refrigeration room, *Applied Thermal Engineering* 165 (2020) 114565.
- [5] EN ISO 10211-1, Thermal bridges in building construction: heat flows and surface temperatures. Part 1. General Calculation Methods, 1995.
- [6] "Definition and effects of thermal bridges []". *passipedia.org*. Retrieved 2017-11-05.
- [7] I. Garrido, S. Lagüela, P. Arias, Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings, *Energy Build.* 158 (2018)1358–1367.
- [8] <http://server.ce.tuiasi.ro/~ddiaconu/download/FOC/Imprastierea%20fumului%20si%20gazelor%20fierbinti%20-%20analiza%20CFD.pdf> - drd. ing. Zeno Grigoras
- [9] <http://ro.insta3dm.com/info/what-is-finite-element-analysis-and-how-does-i-63479542.html>
- [10] <https://sim-flow.com/download/cfd-simulation-software/>
- [11] Bode F. Simularea numerica a proceselor de transfer termic – Aplicații, UTPRESS Cluj-Napoca, 2021, ISBN 978-606-737-505-3

- [12] A. Kecebas, M. Kayveci, Effect on optimum insulation thickness, cost and saving of storage design temperature in cold storage in Turkey, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 2010 Volume (Issue) 25(2): 117-127
- [13] J.A. Evans, A.M. Foster, J.-M. Huet, L. Reinholdt, K. Fikiin, C. Zilio, et al., Specific energy consumption values for various refrigerated food cold stores, *Energy Build.* 74 (2014) 141–151.
- [14] X.Q. Li, P.E. Campana, H.L. Li, J.Y. Yan, K. Zhu, Energy storage systems for refrigerated warehouses, *Energy Procedia* 143 (2017) 94–99.
- [15] J.A. Evans, E.C. Hammond, A.J. Gigiel, A.M. Foster, L. Reinholdt, K. Fikiin, C. Zilio, Assessment of methods to reduce the energy consumption of food cold stores, *Appl. Therm. Eng.* 62 (2014) 697–705.
- [16] A.M. Foster, L.O. Reinholdt, T. Brown, Reducing energy consumption in cold stores using a freely available mathematical model, *Sustain. Cities Soc.* 21 (2016) 26–34.
- [17] I. Garrido, S. Lagüela, P. Arias, Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings, *Energy Build.* 158 (2018) 1358–1367.
- [18] A. Reilly, O. Kinnane, The impact of thermal mass on building energy consumption, *Appl. Energy* 198 (2017) 108–121.